



ENTRIA-Arbeitsbericht-09

„Endlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit – Technik- und Sicherheitsaspekte“

Im Auftrag der ENTRIA-Forschungsplattform
Vertikalprojekt 5

Ing.(grad.) Gerhard Schmidt
Dipl.-Ing. (BA) Beate Kallenbach-Herbert

Unter Mitarbeit von:
Dipl.-Ing. Anne Minhans
Dipl.-Geol. Stefan Alt

Kontakt

Öko-Institut e.V.
Büro Darmstadt
Dipl.-Ing. (BA) Beate Kallenbach-Herbert
Rheinstrasse 95
D-64295 Darmstadt
Tel.: +49 6151 8191 109
Mail: b.kallenbach@oeko.de
www.oeko.de

ENTRIA ist ein in der Forschung zur Entsorgung radioaktiver Reststoffe in Deutschland neuartiges Verbundprojekt von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus unterschiedlichen Disziplinen, die bisher nur sporadisch kooperierten. Um seine neuen Arbeitsweisen und die Vielfalt integrierter disziplinärer Perspektiven transparent zu machen, werden in den Arbeitsberichten wichtige Zwischenergebnisse vorgestellt. Dies dient einerseits der projektinternen Information. Andererseits werden diese Zwischenergebnisse auch der interessierten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Letzteres geschieht, um Einblicke in die ENTRIA-Forschungspraxis zu gewähren und Ausgangsmaterial für spätere Veröffentlichungen offen zu legen. ENTRIA lebt vom pluralen Austausch. Die Beiträge geben allein die Meinung der Autorin oder des Autors wieder.

ENTRIA wird vom BMBF unter dem Kennzeichen **02S9082 A bis E** gefördert (Zeitraum 2013 bis 2017).

Zitierweise

Schmidt et al. 2017: Schmidt, G.; Kallenbach-Herbert, B.: VP5-Endlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit – Technik- und Sicherheitsaspekte, ENTRIA-Arbeitsbericht

ISSN (Print):

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	9	
Tabellenverzeichnis	12	
Zusammenfassung	15	
1	Einleitung	22
2	Übergeordnete Beschreibung der Option	26
2.1	Sicherheitsphilosophie und Grundprinzipien der Option Endlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit	26
2.1.1	Die Sicherheitsphilosophie bei der Endlagerung	26
2.1.2	Grundprinzipien der geologischen Endlagerung	28
2.2	Aufgabe der Option Endlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit	31
2.2.1	Langzeitsicherer Einschluss der Abfälle und Behinderung von Migrationsvorgängen	31
2.2.1.1	Einfluss von Wasser im Endlager	31
2.2.1.2	Betrachtungen zum Isolationszeitraum	35
2.2.1.3	Einschlussgüte von Endlagern	40
2.2.2	Weitere Aufgaben für Endlager	42
2.2.2.1	Schutz gegen natürliche Einwirkungen	42

2.2.2.2	Schutz gegen beabsichtigte menschliche Einwirkungen mit dem Ziel der Freisetzung	45
2.2.2.3	Erschweren des Zugriffs auf spaltbare Materialien	45
3	Endlagersystem	50
3.1	Radioaktive Abfälle	50
3.1.1	Grundsätzliche Betrachtungen zum Gefährdungspotenzial radioaktiver Abfälle	50
3.1.2	Für die Endlagerung relevante Abfalleigenschaften	53
3.1.2.1	Zusammensetzung des abgebrannten Kernbrennstoffes	53
3.1.2.2	Eigenschaften des abgebrannten Kernbrennstoffs	58
3.2	Endlagersystem und relevante Teilsysteme	60
3.2.1	Geologische Barrieren	61
3.2.1.1	Hydraulische Durchlässigkeit	61
3.2.1.2	Diffusion	68
3.2.1.3	Selbstheilung und Konvergenz	70
3.2.1.4	Sorption	71
3.2.1.5	Wärmeeigenschaften	75
3.2.1.6	Übersicht über günstige und ungünstige Wirtsgesteinseigenschaften	77
3.2.2	Technische und geotechnische Barrieren	79
3.2.2.1	Brennstoff und Abfallmatrix als Barriere	79
3.2.2.2	Endlagerbehälter als Barriere	82
3.2.2.3	Puffermaterial als Barriere	86

3.2.2.4	Strecken- und Schachtverschlüsse als Barriere	88
3.2.3	Kombination von Barrieren	89
3.2.3.1	Barrierenkombinationen bei Steinsalz- und Tonsteinkonzept	90
3.2.3.2	Barrierenkombination bei der Endlagerung im kristallinen Hartgestein	100
3.3	Fazit	101
4	Das Endlager als Anlage	102
4.1	Das Endlager als Anlage nach dem Atomgesetz	102
4.2	Das Endlager als Bergwerk	106
4.2.1	Unvereinbarkeit von Gewinnungs- und Endlagerbergwerken	106
4.2.2	Zielkonflikt Rohstoffausbeutung und Endlagernutzung	108
4.2.3	Zugang zum Endlagerbergwerk	109
4.2.4	Bewetterung	113
4.2.5	Ausbau	113
4.2.6	Wasserhaltung	114
4.2.7	Fazit	115
4.3	Erkundung	115
4.3.1	Übertägige Erkundung	117
4.3.2	Untertägige Erkundung	121
4.4	Errichtung	122
4.5	Betrieb	123

4.6	Verschluss, Betriebsabschluss und Nachbetrieb	125
5	Langzeitsicherheitsanalyse (LZSA) und Langzeitsicherheitsnachweis (LZSN)	131
5.1	Aufgabe der LZSA bzw. des LZSN	132
5.2	Prognose über lange Zeiträume	138
5.2.1	Rolle der Prognosesicherheit	138
5.2.2	Umgang mit Prognoseunsicherheiten	140
5.3	Prinzipielle Vorgehensweise	142
5.3.1	FEP-Katalog und Szenarienentwicklung	142
5.3.2	Transport- und Expositionsmodelle	147
5.3.2.1	Konzeptuelle Transportmodelle	147
5.3.2.2	Modelle zur Expositionsberechnung	149
5.3.3	Rechentechnische Umsetzung	151
5.3.4	Ergebnisse	153
5.4	Beispiele für LZSA	155
5.4.1	Safir-2 Mol (Belgien)	157
5.4.1.1	Rahmenbedingungen der Langzeitsicherheitsanalyse in Belgien	157
5.4.1.2	Gegenstand der Analyse	158
5.4.1.3	Ergebnisse der Analyse	158
5.4.2	Bure (Frankreich)	163
5.4.2.1	Langzeitsicherheitsanalyse Dossier Argile	164
5.4.2.2	Ergebnisse der Langzeitsicherheitsanalyse	164
5.4.3	Benken (Schweiz)	168

5.4.3.1	Langzeitsicherheitsanalyse Entsorgungsnachweis Benken	169
5.4.3.2	Ergebnisse der Langzeitsicherheitsanalyse	169
5.4.4	Beantragtes Endlager Forsmark (Schweden)	172
5.4.4.1	Langzeitsicherheitsanalyse für das beantragte Endlager Forsmark	172
5.4.4.2	Ergebnisse der Langzeitsicherheitsanalyse für das beantragte Endlager Forsmark	173
5.4.5	Yucca Mountain NV (USA)	175
5.4.5.1	Natürliche Einwirkungen auf das Endlager Yucca Mountain	176
5.4.5.2	Ergebnisse der Analyse für Magmazuläufe	180
5.4.6	Gorleben (Deutschland)	182
5.4.6.1	Langzeitsicherheitsanalyse Gorleben	183
5.4.6.2	Ergebnisse der VSG	185
5.5	Fazit	187
6	Safeguards und Risiko der nuklearen Proliferation	189
6.1	Ziele der Proliferationsüberwachung	190
6.2	Proliferationsüberwachung von Endlagern	191
6.3	Die Proliferationsattraktivität von Endlagern	193
6.4	Ansätze zur Entwicklung von Proliferationsüberwachung bei Endlagern	195

7	Unterschiede der Endlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit gegenüber den Charakteristika mit erweiterter Rückholbereitschaft	197
	Literaturverzeichnis	205

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Vereinfachte Skizze des Verbleibs abgebrannter Brennelemente und hochradioaktiver Abfälle aus der Wiederaufarbeitung bis hin zu deren Endlagerung	24
Abbildung 2-1:	Einschluss der radioaktiven Stoffe zur Vermeidung bzw. Limitierung der Auswirkungen	27
Abbildung 2-2:	Zeitliche Entwicklung der Freigabefähigkeit zweier hochradioaktiver Abfallarten	38
Abbildung 2-3:	Beispielschema für ein Einlagerungsfeld in einem Endlager	48
Abbildung 3-1:	Wärmeleistung abgebrannter Brennelemente über die Zeit nach Abbrand (in GWd(th)/tSM) und nach Brennstofftyp (Uran, MOX)	59
Abbildung 3-2:	Dosisentwicklung nach einem Behälterversagen durch Abscheren (ausgelöst durch Erdbeben und Bewegung entlang einer Störung) beim geplanten Endlager Forsmark (Schweden)	64
Abbildung 3-3:	Fließpfade gemäß Sicherheitsanalysen für das Endlager Yucca Mountain, Nevada (USA)	66
Abbildung 3-4:	Dosisverlauf gemäß Sicherheitsanalysen für das Endlager Yucca Mountain. Darstellung für den Standardfall	67

Abbildung 3-5:	Sorption und Desorption durch Ionenaustausch an einer Silikatmatrixoberfläche	72
Abbildung 3-6:	Verlauf der Konzentrationskurve bei geringer und mittlerer Sorption	73
Abbildung 3-7:	Günstige und ungünstige Gesteinseigenschaften von Wirtsgesteinen	78
Abbildung 3-8:	Technische und geologische Barrieren im Zusammenwirken (Beispiel)	91
Abbildung 3-9:	Räumlicher Aufbau und Ausbreitungswege beim schweizerischen Entsorgungsnachweis (liegende Darstellung)	95
Abbildung 3-10:	Referenzfall beim Entsorgungsnachweis am Standort Benken	97
Abbildung 4-1:	Zugänge zum Endlagerbergwerk in Kristallingesteinen	110
Abbildung 4-2:	Ebenerdiger Zugang zum früher beantragten Endlager Yucca Mountain	112
Abbildung 4-3:	Modell für Echos bei einer seismischen Erkundung	119
Abbildung 4-4:	Ergänzung seismischer Profile mit Bohrerkundungen	121
Abbildung 4-5:	Beispielauslegung für einen Streckenverschluss in Tonstein	129
Abbildung 5-1:	Überblick über das Zusammenspiel der verschiedenen Elemente eines Safety Case	137
Abbildung 5-2:	Geologische Schichtenfolge und ihre Konzeptualisierung	149

Abbildung 5-3:	Beispiel für ein Modell zur Darstellung möglicher Expositionspfade in der Biosphäre	150
Abbildung 5-4:	Dosisbelastung aus endgelagerten verglasten Abfällen aus der Wiederaufarbeitung am fiktiven Standort Mol/Belgien (nur Spalt- und Aktivierungsprodukte)	160
Abbildung 5-5:	Dosisbelastung aus endgelagerten abgebrannten Brennelementen am fiktiven Standort Mol/Belgien (nur Spalt- und Aktivierungsprodukte)	161
Abbildung 5-6:	Die Langzeitsicherheits-Funktionen in den vier Phasen der geologischen Endlagerung hochradioaktiver Abfälle	163
Abbildung 5-7:	Verbleib von aus der Abfallverpackung freigesetztem Iod-129 in der französischen Langzeitsicherheitsanalyse für Tonstein	165
Abbildung 5-8:	Dosisverlauf im Referenzfall für abgebrannte Brennelemente	167
Abbildung 5-9:	Dosisverlauf im Referenzfall für verglaste hochradioaktive Abfälle	168
Abbildung 5-10:	Rechnerische Dosisverlauf für den Referenzfall am Standort Benken für abgebrannte Brennelemente (oben), verglaste hochradioaktive Abfälle (Mitte) und mittelradioaktive Abfälle (unten)	171
Abbildung 5-11:	Auswirkungen im „Central corrosion case“ im Fernfeld beim Endlager Forsmark	174

Abbildung 5-12:	Lage des Endlagerstandorts Yucca Mountain im Vulkanfeld Südliches Nevada	177
Abbildung 5-13:	Dosisverläufe (in mrem/a) für den Fall des Eindringens von Magma in den Endlagerbereich am Standort Yucca Mountain	180
Abbildung 5-14:	Dosisverlauf bei allen modellierten Ereignissen bei Yucca Mountain im Vergleich	181

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Überblick über potenzielle Wirtsgesteine für Endlager in Deutschland hinsichtlich des Vorkommens von Wasser	33
Tabelle 2-2:	Radiologische Charakteristika einiger Bestandteile von abgebranntem Kernbrennstoff	37
Tabelle 3-1:	Massenzusammensetzung einer Tonne abgebrannten Kernbrennstoffs (Abbrand 45 GWd/tSM, Abklingzeit 4 Jahre)	54
Tabelle 3-2:	Zusammensetzung einer Tonne abgebrannten Brennstoffs nach Aktivitätskonzentration, (Abbrand 45 GWd/tSM, Abklingzeit 4 Jahre)	56

Tabelle 5-1:	Langzeitsicherheitsnachweis für das früher beantragte Endlager Yucca Mountain	154
Tabelle 5-2:	Überblick über die betrachteten Langzeitsicherheitsanalysen (international)	156
Tabelle 5-3:	FEPs eines Eruptionseignisses in der Langzeitsicherheitsanalyse für Yucca Mountain	179
Tabelle 7-1:	Gegenüberstellung von Auslegungsmerkmalen eines Endlagers ohne Rückholbarkeit und einer alternativen Option mit erweiterter Rückholbarkeit	200

Zusammenfassung

Die vorliegende Übersichtsdarstellung macht deutlich, dass und welche Gefahren von radioaktiven Abfällen ausgehen und dass diese daher über sehr lange Zeiträume hinweg sicher von der belebten Umwelt ferngehalten werden müssen. Es wird aus den beschriebenen Anforderungen her deutlich, dass hierfür ausschließlich passive Maßnahmen in Frage kommen, die ohne menschliches Zutun wirksam sind, da administrative Sicherheitsvorkehrungen hierfür zu unzuverlässig sind.

Die Auswahl der geologischen und die Konzeption der technischen Systeme, die für diesen Langzeiteinschluss erforderlich sind, sind eng auf die Abfalleigenschaften abzustimmen. Die Abfallzusammensetzung und die für den Langzeiteinschluss wichtigsten Abfalleigenschaften wie die Wärmeerzeugung und die Mobilität der Schadstoffe werden beschrieben und Folgerungen aus diesen Eigenschaften abgeleitet.

Die geologischen und technischen Barrieren, die den Einschluss über die erforderlichen Zeiträume gewährleisten können und sollen, werden in ihrer Wirkung dargestellt. Es wird deutlich, dass für den geologischen Langzeiteinschluss mehrere Wirtsgesteine infrage kommen und dass jedes dieser Wirtsgesteine spezifische Vor- und Nachteile aufweist. Aus der Zusammenstellung der typischen Wirtsgesteinseigenschaften wird deutlich, dass kein Wirtsgestein grundsätzlich zu bevorzugen ist. Wirtsgesteine können nur standortbezogen und im Kontext eines Endlagerkonzepts bewertet werden. Günstig für die Endlageraufgabe wirken sich z. B. eine geringe hydraulische Durchlässigkeit, niedrige Diffusionsraten und selbstheilende Eigenschaften des Wirtsgesteins aus. Begünstigende geologische Eigenschaften an geeigneten Standorten sind

ferner Stabilität und zuverlässige Prognostizierbarkeit der einschließenden geologischen Formation und die Abwesenheit von Unsicherheitsfaktoren wie z. B. jüngerer Vulkanismus oder überdurchschnittliche Hebungstendenzen, die mittels Eignungskriterien aus der Auswahl ausgeschlossen werden können.

Um den Einschluss zu gewährleisten, ist stets eine Kombination verschiedener Barrieren erforderlich, da keine Barriere allein den Einschluss bewerkstelligen kann bzw. die durch die Auffahrung des Endlagerbergwerks unvermeidlichen Verletzungen der geologischen Barriere zu kompensieren sind. Die technischen Barrieren bedürfen daher sorgfältiger Auslegung und Qualitätssicherung bei der Errichtung.

Da dem Abfallbehälter während der Betriebsphase des Endlagers eine erhebliche Sicherheitsbedeutung zukommt, muss dieser ebenfalls als wichtige Barriere mindestens bis zum Verschluss des Endlagers zuverlässig zur Verfügung stehen. Je nach Wirtsgestein und Sicherheitskonzept ist die Bedeutung des Behälters nach dem Verschluss unterschiedlich einzuordnen. Bei der Endlagerung in durchlässigen Wirtsgesteinen, wie in geklüftetem kristallinem Hartgestein, ist der Behälter in Zusammenhang mit dem Puffermaterial über den gesamten Nachweiszeitraum hinweg die entscheidende Barriere. Dies erfordert zuverlässige Vorhersagen zu den Korrosionseigenschaften des Behältermaterials, aufwändige Qualitätssicherung bei Behälterherstellung, -beladung und -verschluss. Bei anderen Wirtsgesteinen wird der Behältereinschluss als Barriere nur zeitweilig benötigt, um z. B.

- während der Betriebsphase Aerosolemissionen zu unterbinden,

- die Handhabung der Abfälle zu ermöglichen (Handling, Abschirmwirkung, etc.), oder
- im Havariefall eine Behälterbergung zu ermöglichen.

Die Behälter verlieren danach aber ihre Bedeutung, da entweder das verfüllte Bohrloch (bei der Bohrlochlagerung) oder die Verfüllung des Einlagerungsbereichs oder der Verschluss in Kombination mit der Konvergenz (Steinsalz) bzw. Setzung (Tonstein) diese Funktionen übernehmen und den Behälter (ggf. nach der so genannten thermischen Phase von einigen hundert Jahren) bedeutungslos machen. Entsprechende Behälterkonzepte sind entwickelt und stehen grundsätzlich zur Verfügung.

Das Endlager ist als Anlage zwar durchaus vergleichbar mit anderen kerntechnischen Anlagen, besitzt aber einige Besonderheiten. Zum einen werden radioaktive Stoffe darin ausschließlich in geschlossener Form in Behältern gehandhabt, so dass – entsprechende Vorkehrungen gegen Störfälle vorausgesetzt – Emissionen oder Kontaminationsfälle nicht zu erwarten sind. Zum anderen ist das Endlagerbergwerk aber als untertägige Anlage nach Atomgesetz zu betreiben, wodurch sich komplexe und möglicherweise auch konkurrierende Sicherheitsanforderungen (etwa bezüglich der Bewetterung) ergeben. Weiterhin ist das Endlager den geologischen und bergtechnischen Randbedingungen anzupassen und kann daher nicht rein ingenieurtechnisch ausgelegt und realisiert werden. Schließlich ist das Endlager dadurch charakterisiert, dass seine zentrale Zweckbestimmung – das langfristige Fernhalten des Gefahrenpotentials von der belebten Umwelt – im Wesentlichen den Zeitraum *nach* dem Betrieb der Anlage betrifft. Da weltweit nur wenige Anlagen dieser Art überhaupt errichtet werden und jede Anlage auch noch den wirtsge-

steins- und standorttypischen Bedingungen anzupassen ist, haben Endlager einen hohen Prototypcharakter. Bei gleichen Wirtsgesteinen kann noch ein gewisser Teil der Technik auf andere Anlagen übertragen werden, bei unterschiedlichen Wirtsgesteinen ist der übertragbare Anteil hingegen sehr gering.

Erkundung, Errichtung, Einlagerungsbetrieb und insbesondere der Verschluss des Endlagers sind Tätigkeiten, die auf die Langzeitsicherheit des Endlagers gerichtet sind; die Betriebssicherheit muss währenddessen ebenfalls gewährleistet werden.

Charakteristisch für Endlager ist der zu führende Langzeitsicherheitsnachweis. In Langzeitsicherheitsanalysen werden die Sicherheitseigenschaften des jeweiligen Endlagers untersucht. Die vollständige Analyse wird der zuständigen Genehmigungsbehörde vorgelegt und von dieser überprüft. Findet die Analyse die Zustimmung der Prüfbehörde, liegt der Langzeitsicherheitsnachweis vor. Für das Endlager im finnischen Olkiluoto wurde auf Basis der Ende 2012 vorgelegten Langzeitsicherheitsanalyse im November 2015 die weltweit erste Errichtungsgenehmigung für ein geologisches Endlager erteilt. Vollständige Sicherheitsanalysen im Rahmen von Anträgen für Errichtungs- und Betriebsgenehmigungen wurden für das inzwischen aufgegebenes Projekt Yucca Mountain in den USA und für das schwedische Endlagerprojekt am Standort Forsmark vorgelegt. Im Jahr 2017 soll die Analyse im Kontext des Antrags für die Errichtung des französischen Endlagers CIGÉO folgen. Im Kapitel „Langzeitsicherheitsanalyse (LZSA) und Langzeitsicherheitsnachweis (LZSN)“ werden Beispiele für Langzeitsicherheitsanalysen auszugsweise vorgestellt und charakteristische Aspekte der einzelnen Projekte herausgearbeitet.

Allen Langzeitsicherheitsanalysen ist gemein, dass sie anhand von Dosisberechnungen, die auf Modellen und konservativen Annahmen basieren, die erreichte Einschlussqualität demonstrieren und die Übereinstimmung mit den national festgelegten Dosisbegrenzungen darlegen. Alle Analysen betrachten dabei einen Zeitraum von einer Million Jahre, manche Analysen gehen noch darüber hinaus. Bei allen Analysen ist zu erkennen, dass die berechnete Dosis aus Endlagern im Zeitraum von einer Million Jahren noch in radiologisch relevanten Größenordnungen liegt, keineswegs sind die Auswirkungen aus Endlagern in Zeiträumen bis 1 Million Jahre im völlig zu vernachlässigenden Wertebereich.

Bei allen Analysen tragen nur wenige Radionuklide im Abfall zur Dosis bei. Die zentrale und bestimmende Eigenschaft ist dabei neben der Löslichkeit die geochemische Mobilität sowie die radiologische Wirksamkeit der Elemente bzw. Nuklide. Es sind die drei Nuklide Iod-129, Chlor-36 und Selen-79, die in allen Analysen dominante Beiträge liefern. Die Anzahl der beiträgenden Radionuklide und ihr Spektrum nimmt deutlich in denjenigen Fällen zu, in denen die geologische Barriere nur sehr gering (Endlager im kristallinen Hartgestein, z. B. Schweden im Falle erhöhter Behälterkorrosion oder beim Abscheren eines Behälters infolge der Neuentstehung einer geologischen Störung) oder gar nicht (Yucca Mountain) am Einschluss teilnimmt. Die herausragende Rolle der Güte des geologischen Einschlusses ist an diesem Unterschied am deutlichsten zu erkennen.

Insbesondere an der amerikanischen Analyse für Yucca Mountain wird deutlich, zu welchen Folgen die Unwirksamkeit des geologischen Einschlusses führt. Hier bestimmt im Wesentlichen die niedrigere Geschwindigkeit der Auflösung der Brennstoffmatrix die Dosis. Der Austrag von Radionukliden

aus dem Endlager beginnt bereits nach einem sehr kurzen Zeitraum und bleibt dann für praktisch eine Million Jahre auf einem ähnlichen oder gleichbleibenden und vergleichsweise sehr hohen Niveau. Auch das Spektrum der zur Dosis beitragenden Radionuklide ist im Fall Yucca Mountain erheblich ausgeweitet. Die höchsten Dosiswerte sind im Szenario einer Magmaintrusion in den Endlagerbereich zu verzeichnen, das wegen der Platzierung des Standortes in einer der geologisch aktivsten Zonen der USA als Szenario zu untersuchen war.

Als entgegengesetztes Extrem, nämlich den vollständigen Einschluss in der geologischen Barriere, kann die deutsche Analyse für den Endlagererkundungsstandort Gorleben dienen. Aufgrund des Einschlusses im Wirtsgestein Salz liegt hier das Schwergewicht darauf nachzuweisen, dass die Salzbarriere als Ganzes erhalten bleibt (Betrachtung von Diapirismus, Rinnenbildung, etc.), dass die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs unter Berücksichtigung des Wärmeintrags nicht beeinträchtigt wird und dass die Maßnahmen zur Verfüllung und zum Verschluss auch für die verletzten Bereiche des Wirtsgesteins zu einem vollständigen bzw. sicheren Einschluss führen. In der vorgelegten Analyse kann daher auf Dosisberechnungen für die Biosphäre verzichtet werden und stattdessen die Einhaltung eines vereinfachten Geringfügigkeitskriteriums nachgewiesen werden. Allerdings wurde anhand der Analyse noch umfangreicher Klärungsbedarf ausgewiesen, der sich im Wesentlichen auf geotechnische Sachverhalte, aber auch auf die hier beschriebene Philosophie der Nachweisführung bezieht.

Große Fortschritte sind bei der Klärung der Proliferationsüberwachung bei Endlagern zu verzeichnen, bei der Deutschland eine wichtige Rolle übernahm. Die Anforderung, wegen des Gehaltes spaltbarer Stoffe in Endlagern deren Überwa-

chung mit geeigneten Mitteln fortsetzen zu müssen, gilt für alle Endlager weltweit, weil es spaltstofffreie Endlager aus grundsätzlichen Erwägungen weltweit kaum geben wird. Die Proliferationsüberwachung beim Endlagerbetrieb und der Einlagerung bietet dabei wenig Neuland und kann mit den üblichen Mitteln der Überwachung, angepasst an die besonderen Rahmenbedingungen eines Bergwerksbetriebs, bewerkstelligt werden. Im Prinzip gilt das auch für die Überwachung im Nachbetrieb, bei der man sich auf die Verifikation beschränken kann, dass keine Hinweise auf ein Wiederauffahren des Endlagerbereichs vorliegen. Ein erheblich anderes Herangehen bei der Proliferationsüberwachung wäre dann erforderlich, wenn im Falle einer dauerhaften Offenhaltung des Endlagers Behälter und Einlagerungsbereiche offenblieben.

1 Einleitung

Bei der nuklearen Stromerzeugung entstehen radioaktive Abfälle. Diese bedürfen wegen der damit einhergehenden Risiken generell einer zuverlässigen und langfristigen Nachsorge. Die Ausführungen in dieser Studie konzentrieren sich auftragsgemäß auf diejenigen Abfallarten mit den höchsten Radioaktivitätskonzentrationen, die abgebrannten Brennelemente und die verglasten hochradioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung. Gemäß (BMUB 2015) ist auch die Option vorgesehen, andere, Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung im Endlager für die insbesondere hochradioaktiven Abfälle einzulagern, die im Wesentlichen aus der Asse und der Urananreicherung stammen. Diese Abfallströme werden im Folgenden nicht weiter berücksichtigt, um eine einheitliche Basis für die Betrachtung unterschiedlicher Endlagerkonzepte in geologischen Formationen zu gewährleisten.

Im Folgenden wird für die endzulagernden Brennelemente durchgängig der Begriff „abgebrannte Brennelemente“ verwendet. Die Begriffe „Wärme entwickelnde Abfälle“ und „hochradioaktive Abfälle“ werden weitgehend synonym verwendet und umfassen die abgebrannten Brennelemente und die verglasten hochradioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung.

Aufgrund des in Deutschland beschlossenen Ausstiegs aus der Kernenergienutzung ist das endzulagernde Inventar an abgebrannten Brennelementen und verglasten hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung gut prognostizierbar. Im nationalen Entsorgungsprogramm (BMBU 2015) werden folgende Mengen angegeben:

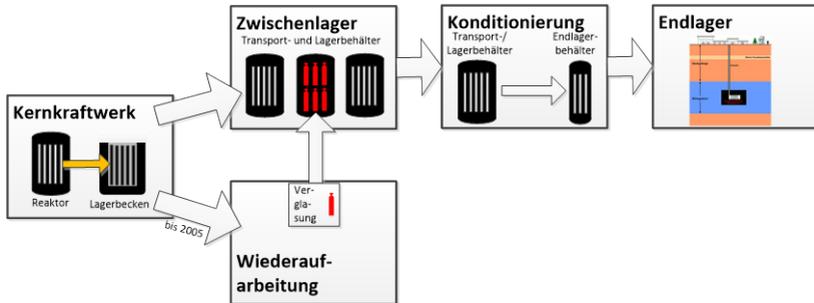
- 1.100 Transport- und Lagerbehälter mit abgebrannten Brennelementen aus Leistungsreaktoren, entsprechend etwa 10.500 Tonnen Schwermetall (tSM) und
- 291 Transport- und Lagerbehälter mit zurückzuführenden radioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung (WAA-Abfälle).
- 10 – 12 tSM endzulagernde hochradioaktive Abfälle in Form von abgebrannten Brennelementen aus Nicht-Leistungsreaktoren erwartet.

Die WAA-Abfälle resultieren aus der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelementen aus Leistungsreaktoren mit einer Masse von etwa 6.450 tSM.

Der Weg der abgebrannten Brennelemente mit den Optionen Wiederaufarbeitung und „direkte Endlagerung“ ist in Abbildung 1-1 skizziert.

Bis 1994 war in Deutschland die Wiederaufarbeitung der gesetzlich vorgeschriebene Weg, von 1994 bis 2005 waren beide Wege (Wiederaufarbeitung und „direkte Endlagerung“ abgebrannter Brennelemente) zulässig. Seit Mitte 2005 ist eine Verbringung abgebrannter Brennelemente aus Leistungsreaktoren zur Wiederaufarbeitung im Ausland gesetzlich verboten und ihre Zwischenlagerung in standortnahen Zwischenlagern vorgeschrieben.

Abbildung 1-1: Vereinfachte Skizze des Verbleibs abgebrannter Brennelemente und hochradioaktiver Abfälle aus der Wiederaufarbeitung bis hin zu deren Endlagerung



Quelle: Eigene Abbildung

Der vorliegende Bericht fokussiert auf die Option Endlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit („wartungsfreie Tiefenlagerung“) als eine der im ENTRIA Projekt detailliert zu untersuchenden Varianten. Er stellt damit einen Beitrag für eine Gesamtschau aller drei im ENTRIA Projekt zu behandelnden Optionen („Endlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit“, „Tiefenlagerung mit Rückholbarkeit“, „Oberflächenlagerung“) dar und soll zu interdisziplinären Verständigung über diese Optionen beitragen. Bezüglich der praktischen Umsetzung ist zu beachten, dass die meisten der international diskutierten und geplanten Endlagerkonzepte Überlegungen zur Rückholbarkeit zumindest in Ansätzen beinhalten.

Die Ausführungen basieren auf dem dokumentierten Stand von Wissenschaft und Technik und berücksichtigen die wesentlichen Endlagerkonzepte in verschiedenen Wirtsgestei-

nen, die international einen hinreichend fortgeschrittenen Planungsstand erreicht haben. Diese Konzepte sollen hier gleichberechtigt behandelt werden, eine Vorfestlegung auf derzeit oder in der Vergangenheit in Deutschland diskutierte Konzeptbestandteile ist nicht intendiert.

Die übergeordnete Beschreibung der Option, die Sicherheitsphilosophie und die Aufgabenstellung bei der Endlagerung sind in Kapitel 2 dargelegt. Kapitel 3 beschreibt das Endlager-system, bestehend aus den Abfällen und den Endlagerteilsystemen (Barrieren). In Kapitel 4 wird das Endlager als Anlage beschrieben, einschließlich der in dieser Anlage ablaufenden Tätigkeiten. Die für die Sicherheit solcher Anlagen relevante Langzeitsicherheitsanalyse ist an Beispielen in Kapitel 5 näher beschrieben. Da in ein Endlager auch große Mengen spaltbarer Stoffe wie Plutonium und Uran eingelagert werden, sind die aus dem Spaltstoffgehalt resultierenden Maßnahmen der Proliferationsüberwachung in Kapitel 6 behandelt. Die wesentlichen Unterschiede zwischen der Option ohne und mit Vorkehrungen zur Rückholbarkeit sind in Kapitel 7 gegenübergestellt.

Das Autorenteam bedankt sich herzlich bei Herrn Prof. Dr. Klaus-Jürgen Röhlig und Herrn Dr. Elmar Plischke, TU Clausthal, für die intensive Diskussion und ihre Anregungen während der Erstellung des Berichts. Herrn Dr. Peter Hocke, ITAS am KIT, danken wir für den sorgfältigen Review des Berichts und seine Hinweise, die insbesondere zur Verbesserung der Lesbarkeit und Verständlichkeit für eine interdisziplinäre Leserschaft wertvoll sind.

2 Übergeordnete Beschreibung der Option

2.1 Sicherheitsphilosophie und Grundprinzipien der Option Endlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit

2.1.1 Die Sicherheitsphilosophie bei der Endlagerung

In den frühen Jahren der Kernenergienutzung war für die schwach- und mittelradioaktiven Abfälle das Prinzip „dilute-and-disperse“ (Verdünnen und Verteilen) durchaus verbreitet – z. B. die gezielte Verklappung von Abfällen im Meer. Im Unterschied dazu setzte sich – ausgehend von einer Empfehlung der US-amerikanischen National Academy of Sciences (NAS 1957) – die Auffassung durch, dass radioaktive Abfälle, die einen bestimmten Aktivitätsgehalt überschreiten, von der Umwelt ferngehalten werden sollen. Basierend auf diesem Prinzip von „concentrate-and-contain“ entwickelte sich die Sicherheitsphilosophie für die Endlagerung von (hoch-)radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen. Sie ist in den Specific Safety Requirements der IAEA folgendermaßen charakterisiert:

„The specific aims of disposal are:

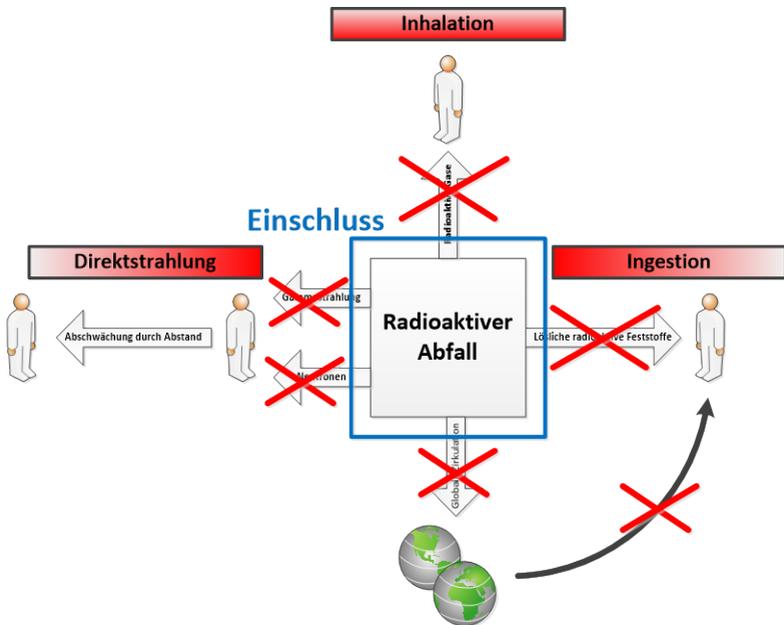
(a) To contain the waste;

(b) To isolate the waste from the accessible biosphere and to reduce substantially the likelihood of, and all possible consequences of, inadvertent human intrusion into the waste;

(c) To inhibit, reduce and delay the migration of radionuclides at any time from the waste to the accessible biosphere;

(d) To ensure that the amounts of radionuclides reaching the accessible biosphere due to any migration from the disposal facility are such that possible radiological consequences are acceptably low at all times.” (IAEA 2011), 1-10, S. 3

Abbildung 2-1: Einschluss der radioaktiven Stoffe zur Vermeidung bzw. Limitierung der Auswirkungen



Quelle: Eigene Darstellung

International besteht derzeit übereinstimmend die Ansicht, dass diese Prinzipien in Bezug auf hochradioaktive Abfälle mit

sehr langen Halbwertszeiten nur durch die Lagerung in tiefen geologischen Formationen gewährleistet werden können.

Erfolgt der Einschluss dauerhaft und absolut vollständig, werden Auswirkungen auf den Menschen und die Umwelt gänzlich vermieden. Erfolgt der Einschluss unvollständig oder über zu kurze Zeiträume, dann verbleiben Auswirkungen, die in ihrem Ausmaß auf ein akzeptiertes Maß zu begrenzen sind.

2.1.2 Grundprinzipien der geologischen Endlagerung

Hochradioaktive Abfälle stellen über sehr lange Zeiträume ein Gefahrenpotenzial für den Menschen und die Umwelt dar. Während die Auswirkungen durch die Direktstrahlung durch Maßnahmen zur Abschirmung und zum Abstandhalten vergleichsweise einfach begrenzt werden können, müssen aufwändige Maßnahmen getroffen werden, um auch langfristig zu verhindern, dass sich Nuklide (oder andere Schadstoffe) in der Biosphäre ausbreiten und durch unterschiedliche Prozesse in die Nahrungskette oder die Atemluft gelangen.

Um die Schäden durch hochradioaktive Abfälle langfristig auszuschließen, werden mit der geologischen Endlagerung Isolationszeiträume von 100.000 bis 1 Million Jahre angestrebt. Derartige Zeiträume sind mit „aktiven Maßnahmen“, die regelmäßige Kontrollen und Interventionen von Menschen und Organisationen erfordern nicht einmal annähernd abzudecken. Bereits bei Zeiträumen von wenigen hundert Jahren wird die Prognostizierbarkeit, ob die dann lebenden Menschen und Umgebungsbedingungen die erforderlichen Schutz- und Kontrollmaßnahmen gewährleisten können, schwierig bis unmöglich.

Der für die Isolierung hochradioaktiver Abfälle notwendige strenge Nachweis der Sicherheit wäre daher bei Konzepten, die von aktiven Maßnahmen wie Überwachung, Wartung und Instandhaltung abhängig sind, schon nach vergleichsweise kurzen Zeiträumen als unzureichend einzuordnen.

Bei der Sicherheitsbeurteilung der Endlagerung soll daher nur von solchen begrenzenden Faktoren Kredit genommen werden, die in ihrem Zusammenwirken den gesamten geforderten Einschlusszeitraum überdauern, ausschließlich selbsttätig (passiv, wartungsfrei) wirksam sind und keines geplanten überwachenden und schützenden (aktiven) Eingriffs durch Menschen und deren Organisationen bedürfen.

Damit unterscheiden sich Endlager von anderen risikobehafteten konventionellen und nuklearen Anlagen ganz grundlegend. Üblicherweise wird bei der Schadensvorsorge Kredit davon genommen, dass Menschen im Falle drohender Schäden vorsorglich schützende Maßnahmen ergreifen werden und im Falle des Eintretens durch geeignete Handlungen aktive Schadensminimierung betreiben. Ein Endlager soll hingegen nach seinem Verschluss für alle nachfolgenden (langen) Zeiträume inhärent sicher sein. Die „wartungsfreie Tiefenlagerung“ orientiert sich vollständig an diesem Prinzip der passiven Sicherheit und trifft daher keine Vorkehrungen zur Rückholbarkeit der Abfälle.

Das bedeutet, dass künftige Ereignisse und Entwicklungen so gut wie möglich prognostiziert und in ihrer Wirkung auf das Endlager untersucht werden müssen. Potenzielle Entwicklungen dürfen nicht mit dem Argument ausgelassen werden, dass sie durch Menschen und Überwachungsmaßnahmen rechtzeitig erkannt würden, durch menschliche Handlungen unterbunden oder in ihren Auswirkungen begrenzt werden könnten.

Alle Maßnahmen der Schadensvorsorge sind daher bereits bei Wirtsgesteins- und Standortauswahl, bei Planung, Genehmigung, Errichtung, Einlagerung und Verschluss zu berücksichtigen.

Mit den Methoden der Geologie ist es möglich, das Alter geologischer Formationen über Zeiträume von Milliarden von Jahren zu bestimmen, ihre zurückliegende Entwicklung mit geeigneten Methoden aufzuklären und zu beschreiben sowie Rückschlüsse auf ihre Stabilität und relevante Einflussfaktoren zu ziehen. Aufbauend auf diesen Methoden können auch Vorhersagen über zukünftige Entwicklungen getroffen werden, die Aussagen über die Entwicklung wesentlicher Merkmale wie Tiefenlage, Mächtigkeit sowie Einfluss und Entwicklung von Störungen ermöglichen. Diese Prognostizierbarkeit stellt einen Eckpfeiler für die Nutzung geologischer Formationen für die langfristige Isolierung radioaktiver Abfälle dar.

Durch die für den Endlagerbetrieb aufzufahrenden Schächte und Hohlräume und das Einbringen wärmeentwickelnder und chemisch artfremder Stoffe (Abfälle, ggf. Ausbau) wird die geologische Barriere gestört. Diese und ggf. auch natürlich vorkommende Störungen müssen durch künstliche Barrieren kompensiert werden. Diese Funktion übernehmen die geotechnischen Barrieren wie Versatz, Strecken- und Schachtverschlüsse sowie die technischen Barrieren, vor allem die Abfallbehälter. Die geotechnische und technische Barrieren sind auf die jeweiligen geologischen Gegebenheiten abzustimmen.

2.2 Aufgabe der Option Endlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit

2.2.1 Langzeitsicherer Einschluss der Abfälle und Behinderung von Migrationsvorgängen

2.2.1.1 Einfluss von Wasser im Endlager

Eine der zentralen Aufgaben der geologischen Endlagerung ist es, die Abfälle einzuschließen bzw. die Migration von Schadstoffen zu behindern und zu verzögern. Dabei spielt der Zutritt von Wasser¹ (als Transport-, Lösungs- und Reaktionsmedium) eine zentrale Rolle. Steht kein Wasser zur Verfügung, werden die radioaktiven Stoffe nicht aufgelöst und können sich nur über sehr eingeschränkte und sehr langsame Diffusion in Festkörpern bewegen.

Untertägig unterliegt Wasser Einschränkungen seiner Beweglichkeit und kommt auch nur in bestimmten untertägigen Bereichen vor, die in Tabelle 2-1 für die wesentlichen für die Endlagerung relevanten Wirtsgesteine zusammengestellt sind. Eine zusammenfassende Beschreibung der Eigenschaften von Steinsalz, Tonstein und Kristallinen Gesteinen insbesondere auch im Hinblick auf die Verfügbarkeit und den Einfluss von Wasser in den entsprechenden Formationen findet sich beispielsweise in (Bollingerfehr et al. 2011).

Wasservorkommen in der Formation, deren Beweglichkeit eingeschränkt ist, kommt bei der Sicherheitsbewertung ein geringerer Stellenwert zu. So ist in hochkonsolidiertem Ton-

¹ Unter dem Begriff „Wasser“ werden im folgenden auch Lösungen subsummiert, beispielsweise (gesättigte) Salzlösungen, da bei natürlichen Vorkommen immer eine mehr oder weniger starke Anreicherung mit Mineralien und anderen Stoffen und kein reines H₂O vorliegt, eine weitere Differenzierung hier aber nicht erforderlich ist.

stein zwar aus der Entstehungszeit der Formation herrührendes Porenwasser vorhanden. Während der ursprüngliche Wassergehalt durch die Alterung der geologischen Schicht (durch den ausgeübten Druck und erhöhte Temperaturen) weitgehend verschwand, ist der noch vorhandene Restgehalt sehr fest an die Gesteinsmatrix gebunden. Dieses Wasser ist daher praktisch unbeweglich und kann sich in der Matrix nur über sehr langsame Diffusion bewegen.

Demgegenüber steht Wasser, das sich in den Klüften einer Hartgestein-Formation befindet, für Transportvorgänge ohne wesentliche Einschränkungen in der Beweglichkeit zur Verfügung. Schon geringe Druckunterschiede reichen aus, um in kurzer Zeit sehr große Distanzen zu überbrücken (hohe Durchströmungsgeschwindigkeiten) und gelöst vorliegende Stoffe mit zu transportieren.

Tabelle 2-1: Überblick über potenzielle Wirtsgesteine für Endlager in Deutschland hinsichtlich des Vorkommens von Wasser

Wirtsgestein	Gesteinsarten	Vorkommen von Wasser	Anmerkungen
Hartgestein	Granit	<ul style="list-style-type: none"> • in Klüften 	ergänzende technische Barriere erforderlich
Salz	Steinsalz in flacher Lagerung (Salzkissen)	<ul style="list-style-type: none"> • als Formationswasser in geringen Konzentrationen diffus, 	Beweglichkeit stark eingeschränkt
	Steinsalz in steiler Lagerung (Salzstock)	<ul style="list-style-type: none"> • als Kristallwasser in Nebengesteinen in hoher Konzentration, • als Sole-Einschluss 	
Ton	Hochkonsolidierter Tonstein	<ul style="list-style-type: none"> • gebundenes Formationswasser, • in Sandeinschlüssen 	Beweglichkeit stark eingeschränkt

Quelle: Eigene Darstellung

Sehr unterschiedlich ist im Rahmen der Eignungserkundung die Erkennbarkeit von Wasservorkommen in ansonsten über-

wiegend wasserarmen geologischen Formationen. Während Bohrungen unmittelbaren, aber nur exemplarischen Aufschluss bieten, kommen hierfür Methoden zum Einsatz, die solche Vorkommen auch aus einiger Entfernung orten können (via Echoanalysen mit Funkwellen unterschiedlicher Wellenlängen analog zu Radar, im hörbaren Bereich via Echolotung oder mittels mechanischen Erschütterungen wie im Falle von seismischen Analysen). Alle Methoden haben spezifische Detektionsgrenzen, unterhalb derer die jeweilige Methode keine sichere Erkennung von Wasservorkommen, Klüften oder Wassereinschlüssen mehr gewährleisten oder jenseits derer die wachsende Entfernung zum Objekt oder die komplexe Vielfalt an Echos verschiedenster Objekte keine zuverlässige Ortung mehr erlaubt. Diese verbleibende Unsicherheit im Erkundungsstadium eines Endlagers ist daraufhin zu bewerten, welchen Stellenwert ihr letztlich im Sicherheitsnachweis zukommt. Kann nicht ausgeschlossen werden, dass es zu einem Kontakt von vorhandenen Wasservorkommen mit den endgelagerten Abfällen kommen kann, sind dieser Fall und seine Auswirkungen im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse zu untersuchen.

In praktisch wasserundurchlässigen, aber mittels langsamer Diffusion überbrückbaren Wirtsgesteinen (Tonstein) beschränkt das Wirtsgestein das Spektrum freisetzbarer Stoffanteile auf solche, die sich geochemisch hochmobil verhalten. Diesen gelingt es nach sehr langen Zeiten, in geringem Umfang in die Biosphäre zu gelangen. Allen anderen endgelagerten radioaktiven Stoffen gelingt es nicht, die geologische Barriere zu überwinden. In wasserdurchlässigen und wasserdurchflossenen Endlagergesteinen ist mit einer Auslaugung radioaktiver Abfallbestandteile im Fall eines Versagens der technischen Barrieren zu rechnen. Die erhaltenen Dosiswerte

stammen dabei aus einer Vielzahl unterschiedlicher Radionuklide, da unter diesen Bedingungen der vollständige Einschluss entweder gar nicht oder nur für wenige Abfallbestandteile gelingt.

2.2.1.2 Betrachtungen zum Isolationszeitraum

In der Literatur finden sich unterschiedliche Ansätze zur Begründung eines erforderlichen Isolationszeitraums. Häufig wird die Radiotoxizität, etwa im Vergleich zur Radiotoxizität von Natururan, zur Argumentation herangezogen (vgl. z. B. OECD/NEA 2009). Diese sehr vereinfachte Betrachtung vernachlässigt allerdings verschiedene Eigenschaften der Radionuklide, die für die damit verbundene potenzielle Strahlendosis relevant sind. Nachfolgend wird daher ein alternativer Ansatz vorgestellt, der die „Rechtfertigung“ für die geologische Endlagerung aus Betrachtungen ableitet, die sich an den Freigrenzen der einzelnen in den hochradioaktiven Abfällen enthaltenen Nuklide orientieren, siehe beispielsweise (Kirchner et al. 2015, S. 117 f.). Bei dieser orientierenden Betrachtung werden die endlagerspezifischen Rückhalte-mechanismen nicht berücksichtigt:

Die Werte für die uneingeschränkte Freigabe radioaktiver Stoffe orientieren sich gemäß der Strahlenschutzverordnung an dem Ziel, dass *„für Einzelpersonen der Bevölkerung nur eine effektive Dosis im Bereich von 10 Mikrosievert im Kalenderjahr [$\mu\text{Sv/a}$] auftreten kann* (StrlSchV 2016). Entsprechende Werte werden unter Anwendung unterschiedlichster Szenarien, die sich bei einer uneingeschränkten Verwendung ergeben könnten, ermittelt. In diese Szenarien gehen eine Reihe von Eigen-

schaften der Radionuklide ein, wie z. B. deren Dosisfaktoren², deren Anreicherung in Boden und Pflanze, ihre Gammastrahlungsintensität etc.

Unter Berücksichtigung der Halbwertszeiten der im hochradioaktiven Abfall vorhandenen Nuklide kann ermittelt werden, nach welchen Zeiträumen das Inventar die Freigabewerte unterschreitet, also nicht mehr auf Grund seines Gefährdungspotenzials besonders verwahrt werden müsste.

In Tabelle 2-2 sind für ausgewählte langlebige Nuklide aus abgebranntem Kernbrennstoff die genannten Stoffcharakteristika angegeben.

² Dosisfaktor: Dosis pro Einheit inhalierter oder mit Nahrung / Trinkwasser aufgenommener Aktivität eines Radionuklids, in Sv/Bq. Dosisfaktoren fassen unterschiedliche Faktoren zusammen wie die Strahlungsart und –energie, die biologische Halbwertszeit, die Anreicherung des Radionuklids in bestimmten Organen, etc.

Tabelle 2-2: Radiologische Charakteristika einiger Bestandteile von abgebranntem Kernbrennstoff

Radio-nuklid	Halbwerts-zeit $t_{1/2}$, (Jahre)	Masse (g/tSM)	Aktivität (GBq/tSM)	Frei-gabe StrIS chV (Bq/g)	Vielfache der Frei-gabegren-ze (1/tSM)
Tc-99	210.000	5.670	692	0,6	1.153.000
Nb-94	20.000	0,007	0,009	0,2	42
I-129	16.700.000	809	1,69	0,06	28.160
Np-237	210.000	634	18,5	0,09	206.000
Pu-239	24.000	5.450	14.000	0,04	350.000.000

Quellen: Eigene Zusammenstellung; Aktivitäten aus ORIGENS-Abbrandrechnung (1 tSM UOX, 45 GWd(th)/tSM); Dosisfaktoren aus BfS-Publikation; Freigabewerte aus Strahlenschutzverordnung 2012

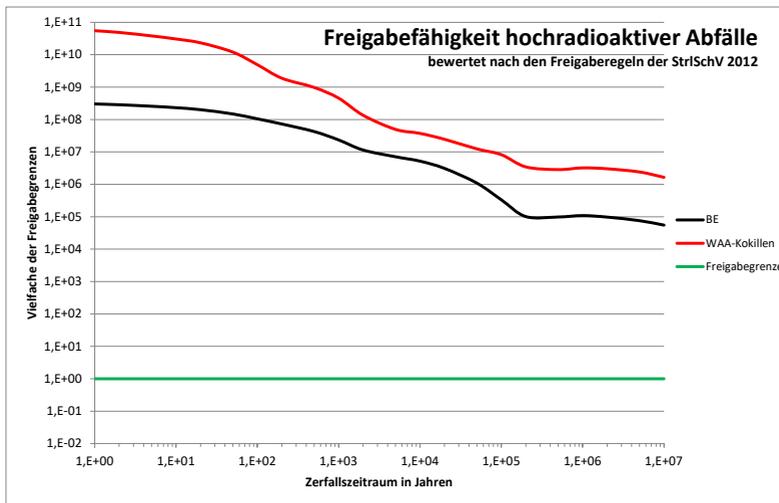
In Abbildung 2-2 ist die entsprechende Zerfallskurve für abgebrannte Brennelemente (BE) und für hochradioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (WAA-Kokillen) dargestellt.

Zur Ermittlung der Vielfachen der Freigabegrenzen wird die vorliegende Aktivitätskonzentration jedes Nuklids im Abfall in Bq/g durch den jeweiligen Freigabewert³ in Bq/g geteilt. Dieser

³ Freigabewerte für die einzelnen Radionuklide in der Strahlenschutzverordnung (StrISchV 2016) bzw. der Strahlenschutzrichtlinie der EU (EU 2013). Die Unterschiede, die sich aus der Verwendung der beiden unterschiedlichen Zahlenwertlisten oder aus der Auswahl des Freigabemodus (unbedingte Freigabe, Freigabe zur Deponierung von Beton, Freigabe zum Einschmelzen von Metallen) ergeben sind geringfügig und für die hier vorliegende Aufgabenstellung ohne jeden Belang.

Zahlenwert gibt an, ob der betreffende Nuklidanteil für sich genommen das Freigabekriterium erfüllt (Ergebnis kleiner als Eins) oder um welchen Faktor das Freigabekriterium überschritten ist (Ergebnis größer als Eins).

Abbildung 2-2: Zeitliche Entwicklung der Freigabefähigkeit zweier hochradioaktiver Abfallarten



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

Es ist daraus erkennbar, dass die hochradioaktiven Abfallarten auch nach 10 Mio. Jahren (rechte Zeitgrenze in der Darstellung) radioaktiven Zerfalls nicht bis unter die heute geltenden Freigabegrenzen zerfallen sind: sie sind immer noch um das 100.000-fache bzw. millionenfache radioaktiver als dies heute geltende Freigabegrenzen erlauben würden.

Interessant bei dieser Analyse ist noch, dass hochradioaktive Glaskokillen über den gesamten Verlauf hinweg um eine bis zwei Größenordnungen höhere Überschreitungen der Freigabegrenze aufweisen und daher keineswegs als weniger gefährlich als abgebrannte Brennelemente bezeichnet werden können. Der Unterschied resultiert daraus, dass bei den Glaskokillen das Uran entfällt (das anderweitig endgelagert werden muss) und die Spaltprodukte und Aktiniden daher höher konzentriert in der Glasmatrix vorliegen.

Auch diese Betrachtungsvariante über Freigabevielfache kommt daher zu dem Ergebnis, dass sich die Endlagerung solcher Abfälle und der dabei eingesetzten Barrieren zum Einschluss über Zeiträume über 10 Millionen Jahre und länger erstrecken muss.

Es ist auch nicht möglich, den nötigen Isolationszeitraum so weit zu reduzieren, dass Endlager überflüssig werden oder sich die Ansprüche an die Langzeitisolation in Endlagern wesentlich reduzieren lassen. Wesentlich und maßgebend sind hierfür die bei der Kernspaltung gebildeten langlebigen Spaltprodukte wie Iod-129, wie Tabelle 2-2 zeigt.

Mit den langen Zeiträumen, über die die Abfälle gefährlich bleiben werden, entfallen alle Überlegungen zu einem Schutzkonzept, das auf einer Dauerüberwachung durch Menschen und Organisationen beruht. Die ethische Anforderung, dass kommende Generationen nicht beständig und fortdauernd mit der aufwändigen Risikovermeidung, -minimierung und -beseitigung von Altlasten zu behelligen sind, würde von solchen Konzepten nicht im Ansatz erfüllt.

Der identifizierte lange Zeitraum macht weiterhin deutlich, dass alle Sicherheitsüberlegungen von vornherein alle Phänomene einzubeziehen haben, die in diesen Zeiträumen auftreten können. Überlegungen, die zu eng auf den heutigen Verhältnissen aufbauen, wie z.B. auf klimatisch günstige Standortverhältnisse, gehen daher bei der Endlagerung fehl. Für heutige günstige Verhältnisse, z.B. in Wüstengebieten oder in Permafrostgebieten, muss – sofern von diesen Verhältnissen im Sicherheitsnachweis Kredit genommen wird – zweifelsfrei gezeigt werden, dass diese Verhältnisse über viele Millionen Jahre angehalten haben und dies mit Sicherheit auch künftig weiterhin werden. Gelingt dieser Nachweis nicht, z.B. weil keine Belege aus vergangenen geologischen Zeiträumen vorgelegt werden können, fehlt solchen Optionen die nötige zeitliche Zuverlässigkeit.

Da die einzuschließenden radioaktiven Stoffe sehr langlebige Bestandteile aufweisen, muss sich der Nachweiszeitraum nach dem wissenschaftlich bestmöglichen Nachweisstand richten. Dieser ist in der Fachwelt heute mit einer Größenordnung von einer Million Jahren akzeptiert (AkEnd 2002, Streffer et al. 2011).

2.2.1.3 Einschlussgüte von Endlagern

Die Einschlussgüte eines Endlagers bemisst sich danach, ob und in welchem Umfang es radioaktiven Stoffen gelingt, aus dem Endlager in die Biosphäre überzugehen. Erfolgt der Einschluss vollständig, ist eine unendlich hohe Einschlussgüte gegeben. Dies kann bei Steinsalz (in flacher oder steiler Lagerung) gelingen, da die Diffusionsraten bei kristallinem Steinsalz praktisch null sind und daher keine Ausbreitung erfolgen kann. Dies setzt allerdings ideal konvergierte Verhältnisse voraus, so dass die Ausbreitung über technische und geo-

technische Barrieren hinweg keine Rolle mehr spielt. Bei anderen Wirtsgesteinen ist diese Idealform des Einschlusses aus grundsätzlichen Erwägungen nicht (bzw. nur durch technische Barrieren, vgl. Kapitel 3.2.2) erreichbar, daher stellt sich die Frage, wie durchlässig Wirtsgesteine gerade noch sein dürfen.

Die Einschlussgüte von Endlagern in partiell durchlässigen Wirtsgesteinen (Tonstein, ideale Hartgesteine), in klüftig-durchlässigen Gesteinen (reale Hartgesteine) oder gar in gänzlich wasserdurchlässigen Wirtsgesteinen (z. B. Tuff) bemisst sich danach, welche Anteile der endgelagerten Stoffe dauerhaft eingeschlossen bleiben und welchen Anteilen es gelingt, im Laufe der Zeit den Einschluss zu verlassen und in die belebte Umwelt über zu gehen. In diesem Kontext ist zu beachten, dass für die Einschlussgüte immer das gesamte Endlagersystem mit seinen unterschiedlichen Barrieren zu betrachten ist (zur Kombination von Barrieren siehe Kapitel 3.2.3). Daraus ergeben sich der früheste Zeitpunkt, zu dem mit einer Freisetzung zu rechnen ist sowie der Verlauf der rechnerisch ermittelten Dosis.

Gemäß den Sicherheitsanforderungen für Endlager des BMUB, damals BMU, (BMU 2010) muss die Endlagerung sicherstellen, dass *„Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem Endlager langfristig die aus der natürlichen Strahlenexposition resultierenden Risiken nur sehr wenig erhöhen“*. Für sogenannte wahrscheinliche Entwicklungen (die *„für diesen Standort prognostizierten normalen Entwicklungen und für vergleichbare Standorte oder ähnliche geologische Situationen normalerweise beobachtete Entwicklungen“*) soll daher die effektive Dosis für eine Einzelperson der Bevölkerung 10 $\mu\text{Sv/a}$ nicht überschreiten. Für weniger wahrscheinliche Entwicklungen (*„die für diesen Standort unter ungünstigen geologischen oder klimatischen Annahmen eintreten können*

und die bei vergleichbaren Standorten oder vergleichbaren geologischen Situationen selten aufgetreten sind^{d)}) beträgt das Dosiskriterium 100 $\mu\text{Sv/a}$.

Gemäß internationaler Empfehlungen wären grundsätzlich auch höhere Dosis-Richtwerte möglich: (IAEA 2011, S. 11) gibt einen Richtwert von 0,3 mSv an. Mit dem deutlich geringeren Wert im nationalen Regelwerk wird in besonderer Weise die Reduzierung des Risikos für zukünftige Generationen hervorgehoben. Die Endlagerkommission (2016, S. 283), thematisiert die im internationalen Vergleich schärferen Anforderungen, stellt diese jedoch nicht in Frage. Sie empfiehlt allerdings, in zukünftigen Sicherheitsanforderungen zu überdenken, ob unterschiedliche Dosiswerte für die beiden Wahrscheinlichkeitsklassen verwendet werden sollen, oder ob für beide der gleiche Wert anzusetzen ist.

2.2.2 Weitere Aufgaben für Endlager

2.2.2.1 Schutz gegen natürliche Einwirkungen

Da der Abfall im Endlager durch geologische, geotechnische bzw. technische Vorkehrungen gegen die Einwirkung durch zirkulierende Grundwässer geschützt sein muss und sich in großer Tiefe befindet, können Vorgänge an der Erdoberfläche wie Klimawechsel (Warm- und Kaltzeiten), extreme Wetterereignisse, Hochwasser oder Überflutungen nicht auf diesen einwirken.

Von Erdbeben sind endgelagerte Behälter geringer tangiert als an der Erdoberfläche, da der gesamte Behälter allseitig von Verfüllmaterial umschlossen und daher der erzwungenen Be-

wegung gleichmäßig ausgesetzt ist. Scherkräfte⁴, wie sie bei der Oberflächenlagerung des gleichen Behälters z. B. durch die Massenträgheit auftreten, kommen bei der untertägigen Lagerung nach vollständiger Umschließung der Endlagergebinde mit dem Versatzmaterial allenfalls entlang von Klufflächen vor. Daher ist ein endgelagerter Behälter bei Erdbeben geringeren mechanischen Belastungen ausgesetzt als ein oberirdisch zwischengelagerter Behälter.

Das Gleiche gilt auch für Erdbebeneinwirkungen auf verfüllte Schachtröhren oder Zuwegungen zu einem Endlager, für Streckenverschlüsse und verfüllte Strecken. Während diese Objekte im Betrieb und im Rahmen der Rückholbereitschaft gegen Erdbeben auszulegen sind, damit es nicht zu unbeherrschbaren Zuständen kommen kann (wie z. B. zu Wasser einbrüchen über die Schachtröhre) sind die Anforderungen im verschlossenen Endlager signifikant geringer.

Erdbeben und ihre Einwirkungen auf die Wirtsgesteinsformation, insbesondere den einschlusswirksamen Gebirgsbereich⁵, sind bei der Eignungsbewertung des Standortes zu berücksichtigen. Führen diese zur Neubildung oder zur Reaktivierung vorhandener geologischer Störungen in der Wirtsgesteinsformation, sind sie im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises für das Endlagers abzubilden.

⁴ Scherkräfte treten beispielsweise auf, wenn das Ober- und Unterteil eines Bauteils in unterschiedliche Richtungen beschleunigt werden, was im ungünstigen Fall zum Bruch durch „Abscheren“ der beiden Teile führt.

⁵ „Der einschlusswirksame Gebirgsbereich ist der Teil des Endlagersystems, der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen (Schachtverschlüsse, Kammerabschlussbauwerke, Dammbauwerke, Versatz, ...) den Einschluss der Abfälle sicherstellt.“ Definition in den Endlagersicherheitsanforderungen (BMU 2010)

Sind Einwirkungen dieser Art auf das Endlager über den Nachweiszeitraum hinweg (1 Mio. Jahre) wahrscheinlich oder soll im Rahmen des Sicherheitsnachweises die Robustheit der Sicherheitsaussagen demonstriert werden, dann kann das Auftreten einer solchen neu gebildeten Störung oder die Reaktivierung einer bestehenden Störungszone unterstellt und auf ihre Auswirkungen hin untersucht werden. Bei Wirtsgesteinen, die zur Konvergenz fähig sind (Steinsalz, Ton/Tonstein), erfolgt dabei ein Eigenverschluss oder eine Selbstheilung, da diese eigenständig in solche entstehenden Zonen hineinfließen und diese selbsttätig wieder verschließen können. Bei Wirtsgesteinen, die bei Kontakt mit Wasser quellfähig sind (Tonstein), erfolgt der Verschluss durch das Aufquellen und aufgrund des hohen Quelldrucks in beschleunigter Weise. Bei nicht selbstheilenden Wirtsgesteinen (Hartgestein, Tuff) ist dies nicht möglich, hier bleibt die Störung aktiv und kann zu dauerhaft erhöhten Durchflüssen führen. Eine Senkung der Durchflussrate tritt erst ein, wenn der Störungsbereich durch Ablagerungsvorgänge (geochemische Niederschläge, Ablagerung von Tonpartikeln, organisches Material, etc.) verschlossen wird.

Durch Klimaschwankungen (Warm- / Kaltzeiten) kann es in hydraulisch durchlässigen Untergrundbereichen zu veränderten hydraulischen Bedingungen kommen (Veränderungen von Fließwegen und -bedingungen). Erhöhte Auflasten bei Gletscherüberlagerung oder durch Relaxation bei zurückgehender Bedeckung führen zu geologischen Veränderungen (Golder 2011). Diese sind aber weit weniger gravierend als sie für Lagereinrichtungen an der Oberfläche zu erwarten wären (massive Zerstörungen, völliger Kontrollverlust über die Einrichtungen und die Schutzsysteme, etc.); zudem sind diese Veränderungen und die betreffenden Auswirkungen auf das

Endlagersystem wesentlich zuverlässiger prognostizierbar als unter den zu erwartenden Bedingungen an der Erdoberfläche.

2.2.2.2 Schutz gegen beabsichtigte menschliche Einwirkungen mit dem Ziel der Freisetzung

Die unmittelbare Einwirkung auf Abfallbehälter mit dem Ziel, einen Teil des darin befindlichen Inventars mit terroristischer Absicht freizusetzen, also ohne Bergung und Entnahme, ist durch die mächtige Überdeckung des Endlagers unmöglich. Selbst in Sabotageabsicht vor dem Verschluss des Endlagers eingebrachte Sprengkörper vermögen nach dem Verschluss keine unmittelbaren Freisetzungen aus dem Endlager in die Biosphäre mehr zu bewirken. Schäden, die ein solches Vorgehen am einschlusswirksamen Gebirgsbereich möglicherweise bewirken könnten, würden sich in der Biosphäre erst nach so langen Verzögerungszeiträumen erkennbar zeigen, dass die Tat und die Schadenswirkung zeitlich völlig entkoppelt wären. Die eigentliche Zielsetzung einer solchen Tat ginge daher völlig verloren.

Die Endlagerung stellt daher den nach heutigem Stand von Wissenschaft und Technik bestmöglichen Schutz gegenüber beabsichtigten menschlichen Einwirkungen mit dem Ziel der Freisetzung radioaktiver Stoffe dar, die andere Lagerformen nicht bieten können.

2.2.2.3 Erschweren des Zugriffs auf spaltbare Materialien

Spaltbare Materialien, wie sie in Endlagern für hochradioaktive Abfälle eingelagert werden, ermöglichen die Herstellung von Nuklearwaffen. Endlager dieser Art unterliegen daher der internationalen Spaltstoffüberwachung („Safeguards“). Ziel die-

ser Safeguards ist es, Abzweigungen solcher Materialien aus der friedlichen Nutzung rechtzeitig zu erkennen.

Die Abzweigung von spaltbaren Materialien ist unterschiedlich aufwändig, je nachdem welche Materialien sich in welchem Zustand befinden, ob diese leicht zugänglich vorliegen bzw. welcher Aufwand getrieben werden muss, um diese Materialien zu extrahieren und in militärisch nutzbare Formen zu überführen. Die Überführung leichter zugänglicher Materialien in eine schwerer zugängliche Form trägt daher zur Proliferationsresistenz bei. Diese Aufgabenstellung erfüllen Endlager, insbesondere aus folgenden Gründen:

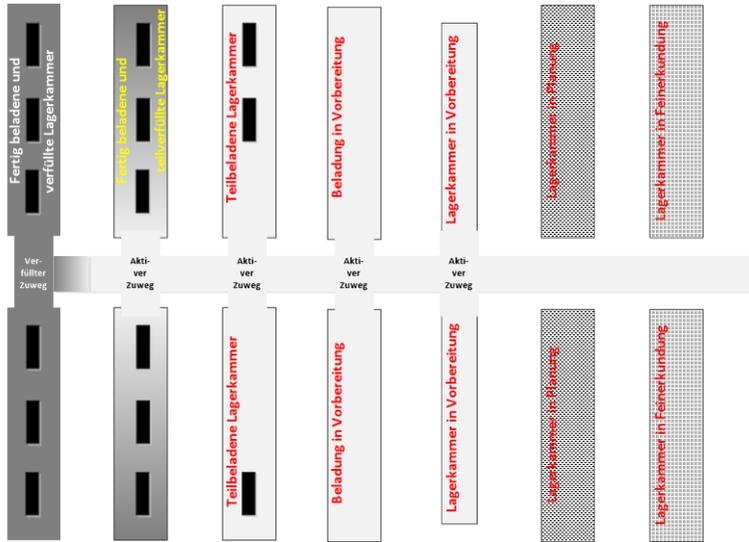
- a. Bereits während des Einlagerungsbetriebs werden Behälter und Abfälle so gelagert, dass eine beabsichtigte Rückholung zum Zwecke der Spaltmaterialabzweigung erschwert wird. Dazu trägt bei, dass abschließend beladene Lagerkammern einschließlich der Zuwegungen bereits im laufenden Betrieb verfüllt werden (siehe Beispielschema für einen Einlagerungsablauf in Abbildung 2-3), um die Zugänglichkeit zu den Behältern mit Abfällen zu erschweren und sich dadurch auch notwendige Überwachungsmaßnahmen erheblich vereinfachen (Küppers 2008)⁶,
- b. Nach dem Verschluss der Einlagerungsfelder und der Schächte wäre eine beabsichtigte Rückholung mit einem erheblich höheren bergtechnischen Aufwand verbunden und wäre, wegen der Auffälligkeit von Aktivitä-

⁶ Kriterium der Unzugänglichkeit bei der Beurteilung der Proliferationsresistenz: „In einem Endlager kann insbesondere der Verschluss von Lagerbereichen zur Herbeiführung der Unzugänglichkeit dienen.“

ten und der technischen Einrichtungen, mit hoher Zuverlässigkeit detektierbar.

Abbildung 2-3 skizziert an einem vereinfachten Beispielschema, wie die Einlagerung in einem Feldbereich des Endlagers erfolgt. Die Endlagergebäude werden dabei in Lagerkammern abgelegt (hier: Konzept der Streckenlagerung) und der verbleibende Hohlraum schließlich mit Verfüllmaterial verfüllt (je nach Wirtsgestein können dazu Salzgrus, Bentonit oder Mischmaterialien eingesetzt werden). Während ein Teil der Lagerkammern bereits vollständig beladen und verfüllt vorliegt, befinden sich andere Lagerkammern in der Beladungsphase, bei weiteren ist die Beladung in Vorbereitung, in Planung oder in der Vorerkundung.

Abbildung 2-3: Beispielschema für ein Einlagerungsfeld in einem Endlager



Quelle: Eigene Darstellung

Bei beladenen und verfüllten Lagerkammern setzt in den Wirtsgesteinen Steinsalz oder Ton/Tonstein bereits die Konvergenz des Hohlraums ein. Das bedeutet, dass Decken, Boden und Wände des Hohlraums sich in den Hohlraum hineinverformen und die zunächst lose oder mechanisch verdichtete eingebrachte Verfüllung zunehmend verdichten. Die Konvergenz des Hohlraums ist ein sicherheitserhöhender Vorgang, da er zu einem wirksamen Abschluss des Gebindes führt. Umgekehrt wären Eingriffe in diesen Vorgang, beispielsweise um Spaltstoffkontrollen an den eingelagerten Behältern auszuführen, mit einer Sicherheitseinschränkung verbunden, da

hierfür Wegsamkeiten geöffnet bleiben müssten. Da Sicherheitsmaßnahmen eine höhere Priorität zukommt als Safeguards-Überwachungsmaßnahmen (Küppers 2008), ist die Safeguardsüberwachung diesen Randbedingungen anzupassen. Dies ist üblich und zulässig.

Da das Wieder-Öffnen von Schächten und Beräumen von Verfüllmaterial mit einfachen Mitteln detektiert werden kann (z. B. mittels Überwachungskameras, Foto- und Videoüberwachung von Materialtransporten untertage), kann die Spaltstoffüberwachung anstelle des Einzelobjekts Behälter auf die Verfüllgrenzbereiche des Endlagers übergehen. Die Sicherstellung, dass diese veränderte Proliferationsüberwachung erfolgen kann, kann durch ein entsprechendes Einlagerungsdesign erfolgen bzw. gefördert und vereinfacht werden (siehe als Beispiel Abbildung 2-3).

Aufgrund des erschwerten Zugangs wäre ein Zugang zum endgelagerten Spaltmaterial nur in Zeiträumen von Jahren realisierbar und ist daher als Reaktion gegenüber einer kurzfristigen äußeren Bedrohung kaum attraktiv.

Vergleicht man das Maß an speziellen Techniken und speziellem Knowhow, das zur Realisierung und Beherrschung eines solchen Vorhabens erforderlich wäre, und seine allgemeine Verfügbarkeit (insbesondere bergtechnische Verfahren und Hilfsmittel) mit ausschließlich an der Erdoberfläche realisierbaren Szenarien (Urangewinnung, Anreicherung, ggf. Reaktorbetrieb/Wiederaufarbeitung/Metallurgie), ergibt sich jedenfalls kein Vorteil bei der untertägigen Gewinnung der Spaltstoffe. Dass bei der untertägigen Variante bereits spaltbares Plutonium vorliegt, ist dabei aus der Sicht des an einer Abzweigung Interessierten nicht unbedingt attraktiver, da es von intensiv gammastrahlenden und auch von langlebigen Spaltprodukten

erst noch abgetrennt werden müsste und selbst dann nicht in einer für die Waffenherstellung günstigen Zusammensetzung vorläge. Da außerdem bei der Handhabung und Bergung der Lagerbehälter mit einem gewissen Freisetzungsrisiko von flüchtigen Spaltprodukten zu rechnen ist (die wiederum zur Entdeckung des Vorhabens beitragen können), bestehen gegenüber den obertägigen Varianten größere Risiken bei der Realisierung einer Abzweigung.

Entsprechend des Entdeckungsrisikos und des hohen Zeitbedarfs sind einfache Überwachungsmaßnahmen (z. B. Satellitenbeobachtung des näheren Standortumfelds mit niedriger Frequenz) bereits aussichtsreich, um die Abzweigung spaltbaren Materials zu verhindern.

Die Endlagerung erschwert Proliferation, endgelagerte spaltbare Materialien sind nur mit hohem Aufwand für diesen Zweck rückgewinnbar und eine Rückgewinnung aus dem Endlager weist keine relevanten „Vorteile“ im Vergleich zu anderen Varianten der Spaltmaterialabzweigung auf.

3 Endlagersystem

3.1 Radioaktive Abfälle

3.1.1 Grundsätzliche Betrachtungen zum Gefährdungspotenzial radioaktiver Abfälle

Abgebrannte Brennelemente bestehen aus einem breiten Gemisch an verschiedensten Bestandteilen. Je nach betrachtetem Pfad, auf dem Schäden zustande kommen können, sind dabei unterschiedliche Abfallbestandteile dominierend.

Für den Aufenthalt in der unmittelbaren Umgebung der Abfälle spielt die **Gammastrahlung** aus dem radioaktiven Zerfall die wichtigste Rolle. Ihre Intensität geht im Laufe der ersten 500 Jahre zurück, sie bleibt aber auch nach diesem Zeitraum auf einem so hohen Niveau, dass schon der kurze Aufenthalt im nicht abgeschirmten Strahlungsfeld zu einem unmittelbaren Schaden führen würde. Die Intensität geht auf geringere Werte zurück, wenn die Strahlung in größerem Abstand oder nach dem Durchgang durch Metalle (z. B. Behältermaterialien), Beton (z. B. Gebäude), Wasser (als Bodenbestandteil) oder durch Bodenmaterialien (z. B. Bodenschichten von typischerweise einigen 100 m über dem Endlager) betrachtet wird. Um diesen Belastungspfad zu beherrschen, reicht es aus, die Abfälle dauerhaft so unterzubringen, dass ein unbeabsichtigter direkter Kontakt mit den Abfällen unmöglich oder mindestens sehr unwahrscheinlich gemacht wird (Abstandskriterium) bzw. die notwendige Abschirmung gewährleistet ist.

Ebenfalls beim Aufenthalt in unmittelbarer Umgebung des Abfalls spielt noch der **Neutronenfluss** eine Rolle. Diese Neutronen entstehen beim Zerfall einiger weniger Radionuklide bzw. bei deren Spontanspaltung. Die Neutronenerzeugung geht noch rascher zurück als die Gammastrahlung (als Beispiel für einen relevanten Neutronenerzeuger in abgebranntem Kernbrennstoff kann Curium-244 dienen, dessen Halbwertszeit 18,1 Jahre beträgt). Die Wirkung der erzeugten Neutronen ist ebenfalls lokal und auf das nahe Umfeld beschränkt, in einiger Entfernung von der Quelle ist der Neutronenstrom nur noch sehr schwach oder gar nicht mehr erkennbar.

Zahlreiche Pfade sind denkbar, die mit einer **Inhalation** oder einer **Ingestion**⁷ solcher radioaktiver Stoffanteile einhergehen, wobei auch der Anteil der **Alpha- und Beta-Strahlung** relevant ist. Expositionen über einen Kontakt mit der Haut sind zwar grundsätzlich vorstellbar, aber hinsichtlich der radiologischen Wirkung von untergeordneter Bedeutung. Die Inhalation setzt voraus, dass entweder gasförmige Radionuklide (z. B. C-14-haltiges Methan oder –kohlendioxid) oder luftgetragene und einatmungsfähige Partikel (Aerosole) vorliegen. Bei Ingestion gelangen in Wasser gelöste oder in Pflanzen oder Tieren enthaltene Stoffanteile über Trinkwasser oder Nahrung in den Körper. Während direkt inhalierbare Abfallbestandteile nur dann zu potenziell relevanten Belastungen führen, wenn der Abfall freiliegt, ist die Ingestion immer dann möglich, wenn der Abfall mit Wasser in Kontakt käme, lösliche Bestandteile herausgelöst und das kontaminierte Wasser in Trinkwasser oder auf landwirtschaftlich genutzte Flächen gelangen würde. Auch Ingestion oder Inhalation von über den Gaspfad freigesetzten Stoffen oder eine Inhalation von über den einen dieser Pfade kontaminierten Stäuben ist denkbar. In wasserfreien, aber nicht ideal abdichtenden Gesteinsschichten können sich ferner mobile Stoffanteile über Diffusion eigenständig bewegen, nach sehr langen Zeiten die Schicht verlassen und in genutzte Trinkwasserhorizonte übergehen.

Dabei können einmal in die Luft (Kohlenstoff-14 als Methan oder Kohlendioxid) oder in das genutzte Trinkwasser (z. B. gelöstes Iod-129) übergegangene radioaktive Stoffe weiterhin in der Umwelt zirkulieren (z. B. in den Luftschichten der nördlichen oder südlichen Hemisphäre oder in den Meeren und Ozeanen) und über diese globale Zirkulation weitere Scha-

⁷ Inhalation bezeichnet die Aufnahme radioaktiver Stoffe durch Einatmen, Ingestion die Aufnahme durch Nahrungsmittel und Trinkwasser

denseffekte auslösen. Es ist ferner für die meisten freisetzbaren Stoffanteile in radioaktiven Abfällen als praktisch unmöglich anzusehen, einmal freigesetzte radioaktive Stoffe vollständig wieder aus der Umwelt zu entfernen, sobald eine gewisse Verteilung erfolgt ist. Insofern sind solche Freisetzungen als irreversibel bzw. nur durch die Kernumwandlungen der betreffenden Nuklide in Teilen reversibel und die damit einhergehenden Schäden als schwer beherrschbar anzusehen.

3.1.2 Für die Endlagerung relevante Abfalleigenschaften

3.1.2.1 Zusammensetzung des abgebrannten Kernbrennstoffes

Massenanteile

Die Zusammensetzung abgebrannten Uran-Brennstoffs aus Leichtwasserreaktoren hängt im Wesentlichen vom Abbrand (der mit dem Brennstoff [Angabe in Tonnen Schwermetall, tSM] erzeugten Energie [Angabe in Gigawatt-Tagen, GWd]) und der Abklingzeit ab. Für einen Abbrand von 45 GWd/tSM nach vier Jahren Abklingzeit sind in Tabelle 3-1 die nach der Masse relevantesten Nuklide aufgeführt.

Tabelle 3-1: Massenzusammensetzung einer Tonne abgebrannten Kernbrennstoffs (Abbrand 45 GWd/tSM, Abklingzeit 4 Jahre)

Nuklid	t 1/2 (a)	m (g/t)
U-238	4,40E+09	820.000
Ce-142	5,00E+11	18.500
U-235	7,00E+08	6.730
Tc-99	2,10E+05	5.670
Zr-93	1,50E+06	5.590
Pu-239	2,40E+04	5.450
U-236	2,30E+07	4.700
Nd-144	2,00E+15	4.240
Cs-137	3,02E+01	4.010
Sr-90	2,85E+01	3.890
Pu-240	6,60E+03	2.330
Rb-87	4,80E+10	2.270
Cs-135	2,30E+06	1.440
Pd-107	6,50E+06	1.300
Pu-241	1,44E+01	1.240
I-129	1,60E+07	809
Pu-242	3,80E+05	647
Np-237	2,10E+06	634
H-3	1,23E+01	347
Am-241	4,33E+02	309

Quelle: Eigene Berechnung

Aus der Tabelle ist erkennbar, dass die Massenzusammensetzung von nicht abbrennbarem Uran-238 dominiert ist und

einen geringen Restbestand an nicht gespaltenem Uran-235 enthält (ursprünglicher Gehalt: ca. 43.000 g/t). Mit abnehmenden Massenanteilen sind Spaltprodukte und Aktiniden vertreten. Die Halbwertszeiten dieser Nuklidbestandteile weisen eine Bandbreite zwischen 12,3 Jahren für Tritium (H-3) und 500 Mrd. Jahren (für Cer-142) auf.

Aktivität

Stoffe mit langen Halbwertszeiten sind nur gering radioaktiv. Daher ändert sich die Nuklidreihenfolge drastisch, wenn die Bestandteile nach ihrer Aktivitätskonzentration im Kernbrennstoff geordnet werden. Dies geht aus Tabelle 3-2 hervor.

Für entsprechende Angaben zu verglasten hochaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung vgl. (Streffer et al. 2011, Fischer-Appelt et al. 2013).

Tabelle 3-2: Zusammensetzung einer Tonne abgebrannten Brennstoffs nach Aktivitätskonzentration, (Abbrand 45 GWd/tSM, Abklingzeit 4 Jahre)

Nuklid	t 1/2 (a)	A (Bq/tSM)
Pu-241	1,44E+01	5,38E+15
Cs-137	3,02E+01	4,71E+15
Ba-137m	4,85E-06	4,45E+15
Sr-90	2,85E+01	3,18E+15
Y-90	7,32E-03	3,18E+15
Cs-134	2,06E-01	2,37E+15
Ru-106	1,02E+00	1,55E+15
Rh-106	9,48E-07	1,55E+15
Ce-144	7,80E-01	1,34E+15
Pr-144	3,29E-05	1,34E+15
Pm-147	2,60E+00	1,31E+15
Eu-154	8,80E+00	5,89E+14
Kr-85	1,08E+01	3,38E+14
Pu-238	8,77E+01	1,85E+14
Sb-125	2,80E+00	1,73E+14
Cm-244	1,81E+01	1,68E+14
Eu-155	4,80E+00	9,20E+13
Sm-151	9,30E+01	5,26E+13
Am-241	4,33E+02	4,45E+13
Te-125m	1,57E-01	4,23E+13

Quelle: Eigene Berechnung

Radiologische Wirksamkeit und Zerfallsprodukte

Zwei Eigenschaften oder Effekte sind in den bis hier vorgestellten Kenngrößen für radioaktive Abfälle noch nicht enthalten. Zum einen handelt es sich um die radiologische Wirksamkeit der einzelnen Radionuklide, die u.a. durch Dosisfaktoren für die Ermittlung der Körperdosen bei innerer Strahlenexposition abgebildet wird. Dosisfaktoren geben an, welche radiologische Wirksamkeit in Sievert (Sv) ein z. B. über die Nahrung aufgenommenes Nuklid pro Bq ausübt. Diese Dosisfaktoren variieren für die effektive Dosis je nach Nuklid zwischen z. B. $2,8E-11$ (Tritium) und $1,1E-06$ Sv/Bq (Ac-237) also über fünf Größenordnungen.

So genannte Dosiskonversionsfaktoren berücksichtigen neben der radiologischen Wirksamkeit selbst auch die Transferprozesse, mit denen die Radionuklide z. B. aus dem Oberflächenwasser in den menschlichen Körper gelangen. Sie sind somit nicht nur vom Radionuklid, sondern auch stark von Annahmen, Szenarien und Modellen zu Klima, Ernährungsgewohnheiten u. ä. abhängig. So werden z. B. in (Andra 2005) für Nb-94 für eine Ernährung über landwirtschaftliche Produkte $6,7E-05$ (Sv/a)/(Bq/l), für Aufnahme nur über den Trinkwasserpfad dagegen $5,3E-08$ (Sv/a)/(Bq/l) angegeben. Auch die Berücksichtigung dieser Größen hat daher eine Bedeutung für die Relevanz der Nuklide hinsichtlich ihrer radiologischen Wirksamkeit.

Der zweite Effekt ergibt sich aus dem radioaktiven Zerfall einiger langlebiger Nuklide. Beim Zerfall einiger Nuklide entstehen langlebige Zerfallsprodukte und die Aktivitätskonzentration des Zerfallsnuklids nähert sich der des Ausgangsnuklids an. Zeichnet man nicht die Aktivitätskonzentration auf, sondern bewertet die Nuklidkonzentrationen z. B. nach ihrem Dosisfak-

tor, dann kann es durchaus sein, dass die Relevanz des Zerfallsnuklids über derjenigen des Ausgangsnuklids liegt. Der radioaktive Zerfall geht dann nicht mit einer Abnahme der radiologisch bewerteten Aktivität einher, sondern mit einer Zunahme.

3.1.2.2 Eigenschaften des abgebrannten Kernbrennstoffs

Wärmeerzeugung

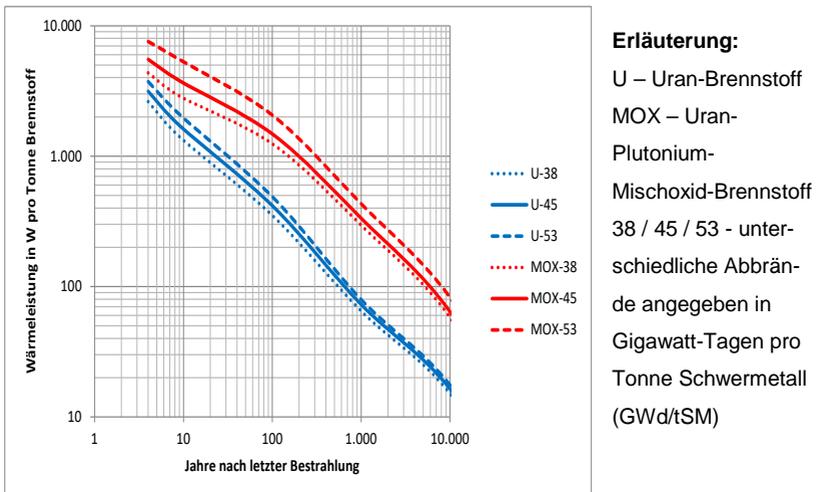
Eine für abgebrannten Brennstoff typische Eigenschaft ist die Wärmeerzeugung. Diese kommt durch den großen Umfang an radioaktiven Zerfällen (Kernumwandlungen) und durch deren Dichte (hohe Aktivität auf kleinem Raum) zustande. Wegen dieser Wärmeproduktion bedürfen abgebrannte Brennelemente und hochradioaktive Abfälle fortdauernder Kühlung über viele Jahrzehnte. Die Nuklide, die am stärksten zur Wärmeerzeugung beitragen, haben Halbwertszeiten von einigen Jahren bis einigen Jahrzehnten.

Für die Wärmeleistung abgebrannter Brennelemente sind drei Faktoren von zentraler Bedeutung: die Abkling- und Zwischenlagerzeit, der Abbrand⁸ und der Brennstofftyp (siehe Abbildung 3-1). Die Wärmeleistung steigt nahezu linear mit dem Abbrand des Brennelementes an. Da die Abbrände früher niedriger lagen, weisen ältere Brennelemente durchschnittlich eine geringere Wärmeleistung auf als neuere. Unterschiedliche Brennstofftypen, also Uran- oder MOX-Brennstoff, haben signifikant unterschiedliche Wärmeleistungen. Diesem Unter-

⁸ Der Abbrand bezeichnet die Ausnutzung des Brennstoffs im Reaktor, d.h. die pro Tonne Schwermetall erzeugte Energie. Er wird in der Einheit Gigawatt-Tage pro Tonne Schwermetall (GWd/tSM) angegeben.

schied wird mit einer gemischten Beladung von Transport- und Endlagerbehältern Rechnung getragen.

Abbildung 3-1: Wärmeleistung abgebrannter Brennelemente über die Zeit nach Abbrand (in GWd(th)/tSM) und nach Brennstofftyp (Uran, MOX)



Quelle: Eigene Berechnung

Löslichkeit und geochemische Mobilität

Für die sichere Endlagerung sind zwei weitere Eigenschaften der Abfallbestandteile von zentraler Bedeutung. Ein Faktor ist die Löslichkeit der Stoffe. Es gibt einerseits Stoffe, die sich auch bei Kontakt mit Wasser gar nicht auflösen, andererseits gibt es solche, die sich in praktisch beliebigem Umfang darin auflösen. Bei einigen Stoffen hängt die Löslichkeit von den

konkreten Bedingungen ab, ob etwa Sauerstoff anwesend ist (oxidierende Bedingungen) oder nicht. Da in Deutschland alle Endlager untertägig sein müssen, da der Sauerstoff unter Tage in einem verschlossenen Endlager durch große Mengen an korrodierendem Metall verbraucht wird und wegen des Einschlusses kein weiterer Sauerstoff hinzutreten kann, kann dieser Fall in der Normalentwicklung außer Acht gelassen werden. Stoffe, die sich nicht auflösen, bleiben daher zwar im Endlager erhalten und weiterhin gefährlich, sie lösen aber keine Schäden aus.

Die zweite Eigenschaft betrifft die Mobilität von Stoffen unter geologischen Bedingungen. So löst sich Cäsium zwar gut in Wasser, lagert sich aber fast vollständig an chemisch aktiven Oberflächen geologischer Schichten an und bewegt sich daher kaum. Diese Anlagerung bewirkt, dass sich Cäsium zwar aus dem engeren Umfeld des Endlagers herausbewegen, aber nicht bis in die Biosphäre gelangen kann. Stoffe, die auf diese Weise zurückgehalten werden, lösen ebenfalls keine Schäden aus.

Aus den Ausführungen am Beispiel des Referenzfalls für ein Tiefenlager in der Schweiz in Kapitel 3.2.3.1, dort insbesondere die Abbildung 3-10, sind die Auswirkungen unterschiedlicher Löslichkeit, Mobilität und radiologischer Wirksamkeit der Nuklide erkennbar. Von besonderer Bedeutung für den langzeitsicheren Einschluss erweisen sich die Nuklide C-14, I-129, Cl-36 und Se-79.

3.2 Endlagersystem und relevante Teilsysteme

Die Verhinderung und Verringerung künftiger Schäden durch freigesetzte radioaktive Stoffe lässt sich nur erreichen, wenn der Ausbreitung der Stoffe wirksame Mittel entgegengesetzt

werden. Sicherheitsfunktionen zur Reduzierung der Beweglichkeit von Stoffen und zu deren Einschluss werden durch **Barrieren** wahrgenommen.

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Barrieren bei der Endlagerung vorgestellt, ihre Wirksamkeit wird dargestellt und deren Grenzen werden diskutiert. Die bei der Endlagerung in geologischen Formationen wichtigen Gesteinsbarrieren werden in Kapitel 3.2.1 vorgestellt. Unvermeidlich müssen in jedem Endlagersystem auch technisch erstellte Barrieren eingesetzt werden. Deren Arten und Eigenschaften sind in Kapitel 3.2.2 dargestellt. Da keine dieser beiden Barrieretypen alleine ein vollständiges Einschlusssystem ergibt, sind die Kombinationen in Kapitel 3.2.3 diskutiert.

3.2.1 Geologische Barrieren

3.2.1.1 Hydraulische Durchlässigkeit

Die Bewegung von Wasser durch Gesteine wird durch Druckdifferenzen getrieben. Der Durchfluss steigt mit zunehmender Druckdifferenz und hängt außerdem von der hydraulischen Durchlässigkeit des Gesteins ab. Die mit dieser Art der Flüssigkeitsbewegung einhergehende Bewegung von Schadstoffen durch das Gestein wird als advektiver Schadstofftransport bezeichnet.

Gemäß (ÖI/GRS 2008, S. 50 f.) ist die Voraussetzung dafür, dass von einem „nach technischen Maßstäben dichten“ Gestein gesprochen werden, dass der advektive gegenüber dem diffusiven (siehe unten) Schadstofftransport von untergeordneter Bedeutung ist, was für hydraulische Durchlässigkeiten von 10^{-12} m/s oder weniger gewährleistet ist. Die in (OECD/NEA 2003) beschriebenen Ton- und Tonsteinstandorte weisen hyd-

raulische Durchlässigkeiten von 10^{-15} m/s bis zu $2 \cdot 10^{-15}$ m/s auf.

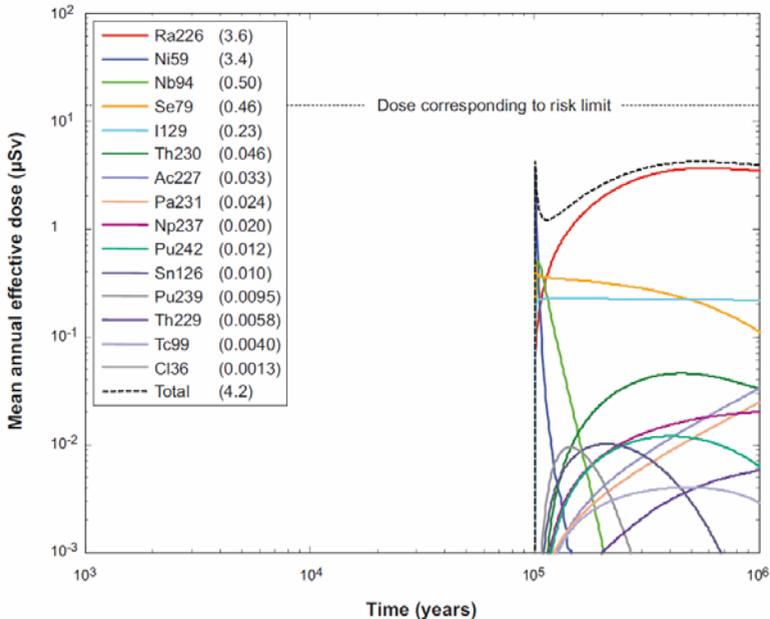
Geologische Schichten besitzen sehr unterschiedliche Durchlässigkeiten für Flüssigkeiten: es gibt solche mit sehr hoher Durchlässigkeit wie z. B. grobe Sande oder Kiese, aber auch solche mit sehr geringer Durchlässigkeit, wie z. B. Tonstein oder Steinsalz. Sande und Tone werden als porenwasserleitend bezeichnet (das Wasser bewegt sich aufgrund von Druckunterschieden durch die Poren). Feinporige Materialien besitzen eine geringere hydraulische Durchlässigkeit als grobporige, da die Bewegung des Wassers in feinen Strukturen stärker abgebremst wird.

Eine andere Kategorie stellen Gesteine dar, die an sich undurchlässig sind, aber Klüfte aufweisen, entlang derer sich Wasser vergleichsweise rasch bewegen kann. Granit und andere Kristallingesteine werden als Kluftwasserleiter bezeichnet. Das Wasser bewegt sich aufgrund des Druckunterschiedes durch Klüfte während das Gestein selber undurchlässig ist und am Transportgeschehen nicht teilnimmt. Die hydraulische Durchlässigkeit des betrachteten Blocks hängt in diesem Fall von der Größe, dem Zusammenhang und der hydraulischen Leitfähigkeit der Klüfte ab. Während Klüfte im Mikrometer-Bereich noch zu einigem Druckverlust führen und die Durchlässigkeit verringern, setzen Klüfte im mm-Bereich und größer dem Wasserdurchfluss kaum noch Widerstand entgegen. Eine typische Schwierigkeit bei der Endlagerung in solchen Gesteinen ist es daher, größere zusammenhängende Gesteinsbereiche mit insgesamt sehr geringer Klüftigkeit zu identifizieren, da schon wenige größere Klüfte zu hohen Durchflüssen führen können.

Als Beispiel für diese Eigenschaft ist in Abbildung 3-2 der Dosisverlauf im Fall des vollständigen Behälterversagens am Ende der Auslegungszeit nach 100.000 Jahren beim beantragten Endlager Forsmark (Schweden) in Granit aufgeführt (SKB 2011).

Wie zu erkennen ist, steigt nach einem solchen Ereignis die Dosis in der Biosphäre unmittelbar und steil an. Dies macht deutlich, dass Verzögerungs- und Rückhaltevorgänge durch Sorption, Diffusion, etc., in diesem Fall keine relevante Rolle spielen. Lediglich die in einem solchen Fall im Behälter ungelöst verbleibenden Urannuklide nehmen nicht an der Ausbreitung teil, da die Löslichkeit des Urans überschritten ist, Uran folglich nicht in Lösung geht und trotz der Flutung im (defekten) Behälter verbleibt.

Abbildung 3-2: Dosisentwicklung nach einem Behälterversagen durch Abscheren (ausgelöst durch Erdbeben und Bewegung entlang einer Störung) beim geplanten Endlager Forsmark (Schweden)

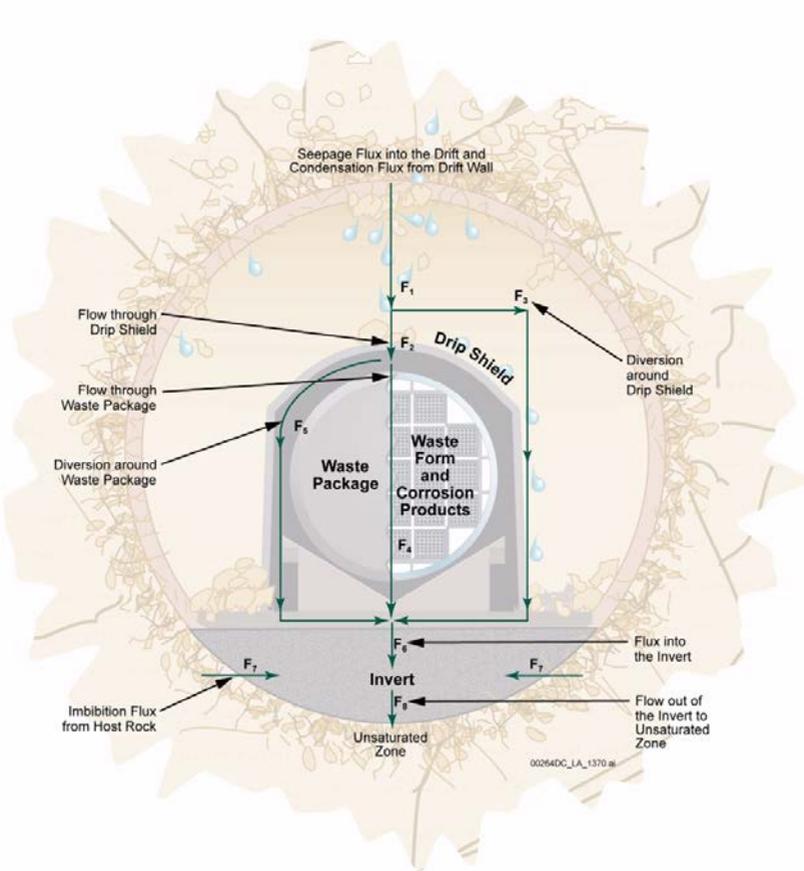


Quelle: (SKB 2011), die in Klammern in der Legende angegebenen Werte geben die Maxima der jährlichen effektiven Dosis in µSv an.

Ein Beispiel für den Schadstofftransport durch ein poröses Gestein zeigt die Langzeitsicherheitsanalyse für den Standort Yucca Mountain, Nevada (USA). An dem in der Wüste gelegenen und daher heutzutage extrem ariden Standort würde bei Kaltzeiten verstärkt Regen auftreten. Die geologischen Schichten über dem horizontal durch Stollen im Berg zugäng-

lichen Endlager bestehen aus Tuff, einem porösen Gestein mit hoher hydraulischer Durchlässigkeit. Die Einlagerungskavernen werden daher in Kaltzeiten mit Sickerwasser (seepage) sowie mit Kondensatwasser (aus der Verdunstung von Sickerwasser im erwärmten Einlagerungsfeld, „condensation“) beaufschlagt. Der weitere Fließpfad durch das Endlager (siehe Abbildung 3-3) verläuft über metallische Tropfschilde (drip shields) bzw. nach deren Versagen und nach Versagen der Behälterverpackung (zeitlich beschränkt wirksame technische Barrieren) durch den endgelagerten Abfall in die ungesättigte Zone und letztlich in das Grundwasser am Standort.

Abbildung 3-3: Fließpfade gemäß Sicherheitsanalysen für das Endlager Yucca Mountain, Nevada (USA)



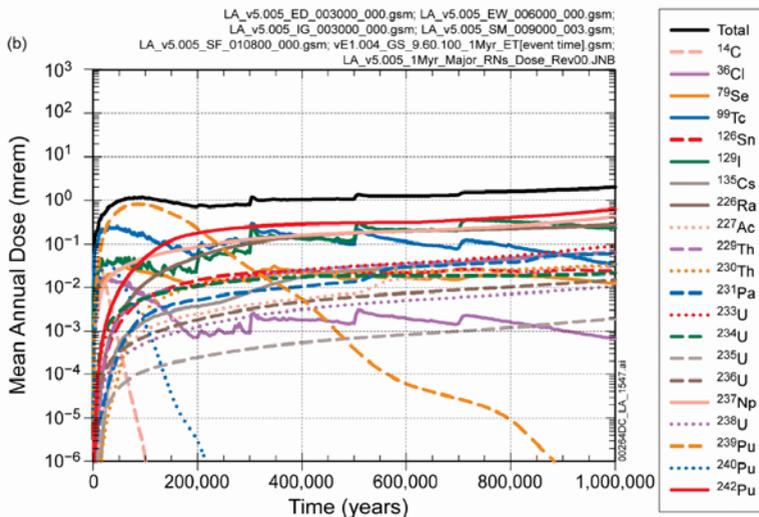
Quelle:(US-DOE 2008), S. 2.3.7-154

Im Standardfall führt dieser Durchfluss von Wasser durch die Abfälle zur Auflösung löslicher Stoffanteile, die mit dem

Grundwasser weitertransportiert werden und schließlich beim Übergang des Wassers in die Nahrungskette zu Dosisbelastungen führen. Der Verlauf dieser Belastungen durch die verschiedenen Radionuklide ist in Abbildung 3-4 dargestellt.

Bemerkenswert an diesem Fall ist die etwa bis 200.000 Jahre reichende Dominanz von Pu-239 für den Dosisverlauf, da diese bei allen anderen Langzeitsicherheitsanalysen nicht vorliegt. Dies rührt daher, dass für Plutonium in diesem Fall ein besonderer Transportmechanismus über Anlagerung an mobile Silikatminerale unterstellt wurde.

Abbildung 3-4: Dosisverlauf gemäß Sicherheitsanalysen für das Endlager Yucca Mountain. Darstellung für den Standardfall



Quelle: (US-DOE 2008), S. 2.4-434,

Für die Dosisangabe wird hier die Einheit Millirem (mrem) verwendet. 1 mrem entspricht 10 μ Sv

Ähnlich wie im Falle Forsmark, jedoch zeitlich wesentlich früher als im dort unterstellten Fall (Behälterversagen erst nach 100.000 Jahren), beginnen die Belastungen schon kurze Zeit nach dem Verschluss des Endlagers und bleiben danach für eine Million Jahre lang praktisch unverändert. Das Niveau der Dosis ist in beiden Fällen ähnlich hoch (ca. 10 $\mu\text{Sv/a}$). Typische Anzeichen verzögernder Sorption oder Diffusion, wie sie für Tonstein typisch sind und den Kurvenverlauf bestimmen (siehe z. B. Abbildung 3-10 auf S. 97), fehlen hier. An der Dosis beteiligte Radionuklide stammen aus einem breiten Spektrum: Spaltprodukte (Se-79, I-129, Cs-135) sind ebenso vertreten wie Aktivierungsprodukte (C-14, Cl-36) und sogar Aktiniden (U-238, Np-237, Pu-239) sowie Zerfallsprodukte des Urans (Th-230, Ra-226). Eine Besonderheit ist in diesem Fall jedoch die Gleichmäßigkeit des Austrags: der Umfang des Austrags erfolgt abhängig von der dargebotenen Wassermenge und der Löslichkeit.

In beiden Fällen, Forsmark und Yucca Mountain, ist also ein advektiver Schadstofftransport mit frei beweglichem Wasser zu unterstellen, so dass für den Einschluss und gegen die Auflösung durch eindringendes Wasser technische Barrieren vorgesehen sind, da ein vollständiger oder weitgehender geologischer Einschluss nicht gegeben ist bzw. als unwirksam unterstellt wird. Allerdings wurde bei Yucca Mountain nur von einer sehr begrenzten Verfügbarkeit der beiden technischen Barrieren „Drip Shield“ (Tropfschild) und Behälter ausgegangen, während im Falle Forsmark eine deutlich höhere Barrierenqualität und –verfügbarkeit des Behälters angestrebt ist.

3.2.1.2 Diffusion

Während die obigen Beispiele den Schadstofftransport in frei fließendem Wasser aufgrund von Klüften (Forsmark) oder Po-

rosität des Wirtsgesteins (Yucca Mountain) zeigen, sind Formationswässer in wenig durchlässigen Wirtsgesteinen anders zu beurteilen. Es gibt Gesteine, die so gering durchlässig sind, dass selbst bei hohen Differenzdrücken kein nennenswerter gerichteter Flüssigkeitstransport mehr erfolgt. Hoch konsolidierter Tonstein⁹ ist ein solches Material. Er enthält weiterhin Porenwasser, aber nur noch etwa ein Drittel seines ursprünglichen Wassergehaltes im frisch abgelagerten, unkonsolidierten Ton. Das Porenwasser ist wegen der geringen Porengröße gegenüber hydraulischen Druckdifferenzen unempfindlich, es ist weitgehend an die Tonsteinmatrix gebunden und in hohem Maße unbeweglich. In einem solchen Material findet weiterhin eine Bewegung des Wassers und von Schadstoffpartikeln statt, die durch Konzentrationsunterschiede getrieben wird und mit einer sehr geringen Geschwindigkeit erfolgt. Die Bewegung der Partikel in den engen Poren ist zudem ungerichtet (Brown'sche Bewegung), es findet im statistischen Mittel ein Stofftransport in Richtung der niedrigeren Konzentration statt. Die damit einhergehende Bewegung von Schadstoffen durch das Gestein wird als diffusiver Schadstofftransport bezeichnet. Gemäß (ÖI/GRS 2008, S. 52) liegen niedrige Porendiffusionskoeffizienten im Bereich von 10^{-11} m²/s vor¹⁰.

Am festesten gebunden ist Wasser, das in Salzkristallen eingeschlossen ist. Das Kristallgitter lässt Bewegungen von Was-

⁹ Als hoch konsolidiert wird ein Tongestein bezeichnet, wenn eine ursprünglich feuchte Tonschicht aufgrund von natürlichen Vorgängen hohem Druck und höheren Temperaturen ausgesetzt werden. Durch diese Vorgänge erfolgt eine Entwässerung, die Schichten werden kompakter, der Ton verfestigt sich und der Porenwassergehalt sinkt.

¹⁰ In (OECD/NEA 2003): wird dies als „effektiver Diffusionskoeffizient“ bezeichnet, dort angegebene gemessene Werte variieren für verschiedenen Ton- und Tonsteinstandorte und unterschiedliche Tracer zwischen 0,01 und $12 \cdot 10^{-11}$ m²/s.

ser noch weniger zu als dies in Tonsteinen noch möglich ist. Fein verteiltes Wasser in Salzgestein ist daher unbeweglich, Salz ist weder hydraulisch durchlässig noch lässt es Diffusion in nennenswertem Umfang zu.

3.2.1.3 Selbstheilung und Konvergenz

Allerdings löst sich Salzgestein bei großem Wasserangebot in diesem auf, Tonstein tut das wegen der Unlöslichkeit der Matrix nicht. Kommt Tonstein mit Wasser in Kontakt, dann nimmt dieser Wasser in seine Matrix auf, die Abstände der Matrix vergrößern sich durch die Einlagerung von Wasser, der Ton quillt, verliert seine Sprödigkeit und wird wieder beweglicher. Beim Quellen entstehen hohe Drücke, so dass sich das Material selbsttätig in Hohlräume hineinbewegt. Hochkonsolidierter Tonstein wird daher als selbstheilend bezeichnet.

Ähnliche Eigenschaften hat Salzgestein, das unter hohem Druck steht. Die Kristalle besitzen eine zwar geringe, aber merkliche Fließfähigkeit (Viskosität). Im Laufe von Jahrzehnten verschließen sich daher Hohlräume in Salz unter Gebirgsdruck, indem Salz sich in die Hohlräume hineinbewegt. Dieser Vorgang wird als Konvergenz bezeichnet. Handelt es sich um große Hohlräume, kann dieses Fließen zum Abreißen von Salzteilen führen. Verfüllt man Hohlräume, z. B. um eingelagerte Behälter, mit kleinteiligem Salzgrus, dann kann der Konvergenzprozess schon nach wenigen Jahren zum vollständigen Hohlraumverschluss führen. Mit zunehmender Vervollständigung der Konvergenz läuft der Bergdruck damit auf dem Behälter auf, er ist fest im Salz eingeschlossen und kann nicht mehr ohne Salzentnahme aus dem Bohrloch entnommen werden. Aber auch Wasser kann in solche vollständig konvergiereten Räume nicht mehr eindringen, das Behältermaterial ist damit gegen Lösungsangriff geschützt.

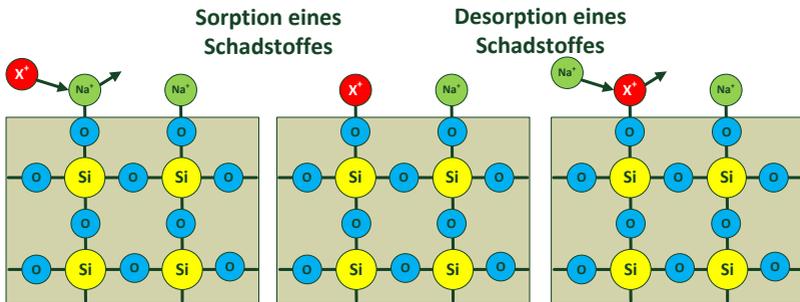
In kristallinen Gesteinen vorhandene oder neu entstehende Klüfte verschließen sich nicht selbsttätig, da sich diese Gesteine starr verhalten. Solche Klüfte werden bei Wasserdurchfluss durch die Ablagerung mitgeführter grober Teile (z. B. Organik oder Sand, in engeren Klüften auch Schluff- oder Tonpartikel) oder durch auskristallisierende Wasserbestandteile (z. B. gebildeter Kalkstein) nur sehr langsam wieder verschlossen. Dieser Vorgang ist im Gegensatz zur Konvergenz oder zum Quellen bei Tonstein unzuverlässig und kaum zuverlässig vorhersagbar.

3.2.1.4 Sorption

Gesteinsoberflächen sind infolge van-der-Waal'scher oder Coulomb'scher Anziehungskräfte sowie ionischer oder kovalenter Bindungen in der Lage, Schadstoffe anzulagern und mehr oder weniger fest zu binden. Dies wird als Sorption bezeichnet. Sorptionsvorgänge können in unterschiedlichen Geschwindigkeiten erfolgen und reversibel oder irreversibel sein.

Meist basiert die Sorption an Oberflächen auf Ionenaustauschvorgängen. Dabei befinden sich auf der Oberfläche der Gesteinsmatrix (z. B. Silikat, Aluminosilikat) aktive negativ geladene Andockstellen, die meist mit positiv geladenen Alkali (Natrium, Kalium) oder Erdalkali-Ionen (Calcium) besetzt sind. Im Wasser gelöst vorliegende Kationen können diese verdrängen und sich dort anlagern. In Abbildung 3-5 ist dieser Vorgang skizziert.

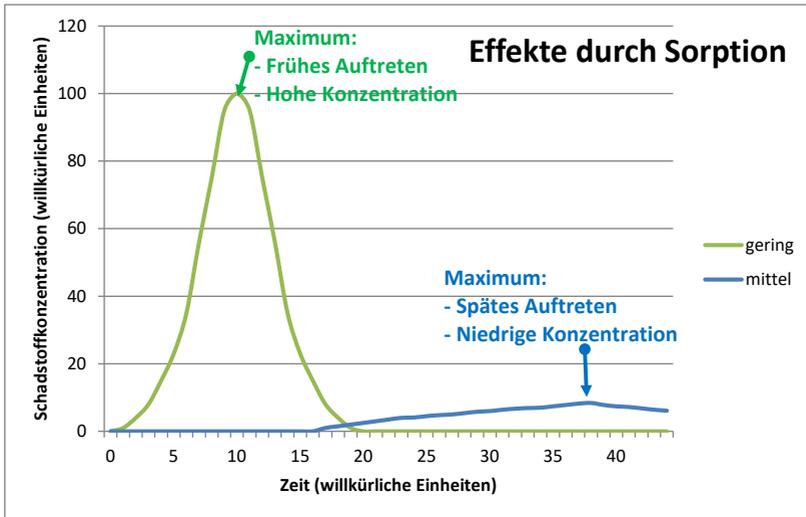
Abbildung 3-5: Sorption und Desorption durch Ionenaustausch an einer Silikatmatrixoberfläche



Quelle: Eigene Darstellung

Der Vorgang ist in der Regel reversibel, das sorbierte Ion löst sich wieder ab. Sehr stark an der Matrix sorbierende Kationen werden dabei länger gebunden. Im Endeffekt führt die vorübergehende Bindung an die Matrix zu einem verzögerten Weitertransport, so dass der Schadstofftransport gegenüber dem Wasserfluss verlangsamt wird (Retardation). In Abbildung 3-6 ist dieser Effekt skizziert, er führt zu einem verlangsamteten Stoffaustausch und zur entsprechenden Verringerung der Schadstoffkonzentration.

Abbildung 3-6: Verlauf der Konzentrationskurve bei geringer und mittlerer Sorption



Quelle: Eigene Darstellung

Die Wirtsgesteine Salz, Granit und Tonstein weisen extrem unterschiedliche Sorptionseigenschaften auf. Oberflächen von Salzkristallen sorbieren Kationen praktisch überhaupt nicht, sie weisen keinerlei Fähigkeit zur Sorption auf (siehe z. B. BfS 2005, S. 62). Granitische Klüfte weisen an der Oberfläche eine sehr geringe Fähigkeit dazu auf, die Anzahl und Dichte aktiver Stellen ist so gering, dass der Verzögerungseffekt meist vernachlässigbar gering und allenfalls noch von wissenschaftlichem Interesse ist. Allerdings tritt entlang von Klüften ein anderer Retardationseffekt auf, die so genannte Matrixdiffusion, d. h. die Diffusion und anschließende Sorption in Poren und Mikrorissen der Gesteinsmatrix (Neretnieks 1979).

In Tonstein ist Anzahl und Dichte aktiver Stellen sehr hoch, die Bindungskraft an die Matrix ebenfalls, so dass viele Kationen nahezu irreversibel auf die Tonmatrix aufziehen. In Kombination mit der geringen hydraulischen Durchlässigkeit von Tonstein und den geringen Abständen zwischen den Matrixschichten führt dieser Effekt dazu, dass sich die meisten kationisch vorliegenden Schadstoffbestandteile des abgebrannten Brennstoffs auch in extrem langen Zeiträumen von Millionen Jahren in Tonstein praktisch nicht fortbewegen.

Allerdings wirkt die Sorption nur auf kationisch vorliegende Schadstoffe. Bei anionisch vorliegenden Schadstoffen ist sie unwirksam, da diese nicht an die anionische Matrix gebunden werden können. In Kernbrennstoffen enthaltene Stoffe wie langlebiges Iod-129 unterliegen daher praktisch keinerlei Sorption, mit ein Grund für die hohe Mobilität. Weitere Stoffverbindungen, die nicht der kationischen Sorption unterliegen, sind:

- komplexiert vorliegende Kationen (z. B. Citrat- oder EDTA-komplexierte Kationen, an Humin- und Fulvinsäuren gebundene Kationen), weil sich diese entweder wie Anionen verhalten (z. B. Citrat- oder EDTA-Komplexe) oder ihre Ionenladung durch Komplexierung völlig verlieren,
- an mikroskopisch kleine Tonpartikel gebundene Kationen, beispielsweise nahezu irreversibel sorbiertes Americium, oder
- an Silikatnanopartikel gebundene Kationen (z. B. Plutoniumanlagerungen an kurz-kettigen Silikatabtrieben).

Die genannten Komplexe sind allerdings so großvolumig, dass sie sich allenfalls noch in sehr grobporigen Medien (wie z. B. Sand) bewegen können, in einer engen Tonmatrix beispielsweise sind sie hingegen vollständig immobil.

3.2.1.5 Wärmeeigenschaften

Wie in Kapitel 3.1.2.2 gezeigt, erzeugen abgebrannte Brennelemente und hochradioaktive Abfälle Wärme. Die Wirtsgesteine reagieren auf Wärme in unterschiedlicher Weise. Am sensibelsten sind dabei Ton, aber auch Tonstein und somit auch Puffer- und Verfüllmaterialien aus Bentonit (siehe beispielsweise (Meleshyn et al. 2016) und (Alt et al. 2016)).

Im Nahfeld endgelagerter Behälter, also im direkten Kontakt zwischen Behälteroberfläche und Wirtsgestein oder Puffermaterial kommt es bei Bentonit oder Ton bei Temperaturen oberhalb von ca. 100°C dazu, dass diese Materialien weiter entwässern und sich teilweise auch Mineralphasen umbilden können. In diesem Fall verliert das Material seine wichtigen Eigenschaften (z. B. sein hohes Sorptionsvermögen). Will man das vermeiden, muss die Kontakttemperatur unter dieser Schwelle bleiben. Dies kann man durch das Verhältnis zwischen Beladung (genauer: dessen thermischer Leistung) und Größe der Behälter (genauer: die Größe der Kontaktfläche zur Wärmeabfuhr) unter Berücksichtigung der Wärmeabfuhr (also auch der räumlichen Verteilung der Wärmequellen, s. unten) einstellen. Steinsalz und Granit sind gegen solche Effekte unempfindlich und vertragen deutlich größere Kontakttemperaturen ohne nachhaltige Materialveränderung. Allerdings ist man bei kristallinen Hartgesteinen darauf angewiesen, zur Verringerung der Größe des Spalts zwischen Wirtsgestein und Behälter und zur mechanischen, hydraulischen und chemischen Pufferung Bentonit als Puffermaterial einzusetzen, was die Sensitivität gegenüber Wärmeeintrag erhöht, so dass sich dieser Vorteil wieder relativiert. (zu Details der thermischen Auslegung eines Endlagers sowie zur Abhängigkeit der Endlagerfläche von der Oberflächentemperatur der Endlagerbe-

hälter in unterschiedlichen Wirtsgesteinen siehe z. B. (DBE Tec 2016)).

Ein weiterer Wärmeeffekt ist bei Salzstöcken zu beachten, da es dort zur Wechsellagerung thermisch insensibler und sensibler Salzarten kommt. Thermisch sensibel reagiert zum Beispiel Carnallit ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)¹¹. Entsprechend sind ausreichend bemessene Abstände zu solchen Vorkommen einzuhalten.

Ferner muss die Erwärmung der gesamten Endlagerformation durch die Summe aller eingelagerten Wärmequellen beurteilt werden. Je besser wärmeleitend die Formation ist (Salz > Granit > Ton > Tonstein), desto gleichmäßiger verteilt sich der Wärmeeintrag im Gebirge. Die Erwärmung der Formation über einige 100 Jahre nach Betriebsbeginn führt zu einer Erhöhung ihrer räumlichen Ausdehnung, was zu thermischen Spannungen im Gebirge führen kann. Umgekehrt führt die Abnahme der Wärmeerzeugung jenseits von ca. 400 Jahren zu umgekehrten Spannungen, wenn das Gebirge seine wärmebedingte Ausdehnung wieder verringert.

Die Grenzen einer Formation für die Aufnahme und Verteilung thermischer Leistungen, die Vermeidung thermisch induzierter Spannungsschäden und die Einhaltung von Sicherheitsabständen zu thermisch sensiblen Gebirgsbereichen stellen in der Regel eine Abwägung dar. Oft spielen hier auch noch Formationsgrenzen oder der Verlauf von geologischen Störungen im Gebirge eine Rolle. Die Angabe starrer Regeln, ab welchem Inventar thermische Grenzen erreicht sind, ist daher kaum möglich und auch nicht sinnvoll. In den meisten Län-

¹¹ Nicht zu verwechseln mit Carnallitit, das zu ca. 50% aus Carnallit, zu ca. 30% aus Natriumchlorid NaCl und zu etwa 20% aus Magnesiumsulfat $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ besteht.

dern, auch in Deutschland, sind die einzulagernden Inventare ohnehin so gering, dass solche Grenzen bei Weitem nicht erreicht werden. Um einen ungefähren Anhaltspunkt zu erhalten, kann die Begrenzung der Einlagerung auf 45.000 tSM-Äquivalente im Fall des geplanten französischen Endlagers CIGEO dienen. Im US-amerikanischen Fall wurde die Kapazität des früher beantragten Endlagers Yucca Mountain von ca. 55.000 tSM-Äquivalenten auf ca. 85.000 tSM erhöht, wobei allerdings thermische Begrenzungen des Wirtsgesteins (Vulkangestein, Tuff) gar keine Rolle spielten.

Insgesamt ist festzustellen, dass thermische Lastgrenzen nur in Ton oder Tonstein eine Rolle spielen und für das deutsche Inventar nur in Kombination mit anderen Aspekten wie dem verfügbaren Einlagerungsraum oder den Sicherheitsabständen zu geologischen Störungen relevant werden können.

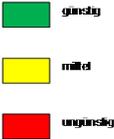
3.2.1.6 Übersicht über günstige und ungünstige Wirtsgesteinseigenschaften

Nachfolgend werden die wesentlichen Eigenschaften potenziell für die Endlagerung in Deutschland relevanter Wirtsgesteine dargestellt.

Bei dieser generischen, von konkreten Standortbedingungen unabhängigen Bewertung ist zu beachten, dass konkrete Wirtsgesteinsvorkommen an bestimmten Standorten zusätzliche Vor- und Nachteile aufweisen können oder entgegen der hier betrachteten Durchschnittseigenschaften anders zu bewerten sein können.

Abbildung 3-7: Günstige und ungünstige Gesteinseigenschaften von Wirtsgesteinen

Wirtsgesteine im Vergleich <small>modifiziert nach BGR 2007</small>			
Gesteinseigenschaften			
Eigenschaft	Steinsalz	Ton/Tonstein	Kristallgestein (z. B. Granit)
Temperaturleitfähigkeit	hoch	gering	mittel
Durchlässigkeit	praktisch undurchlässig	sehr gering bis gering	durchlässig bis gering gering durchlässig (Abhängig von Klüftung)
Festigkeit	mittel	gering bis mittel	hoch
Verformungsverhalten	viskos (Kriechen)	plastisch bis spröde	spröde
Lösungsverhalten	hoch	sehr gering	sehr gering
Sorptionsverhalten	sehr schlecht	sehr gut	bestenfalls mittel bis schlecht
Temperaturbelastbarkeit	hoch	gering	hoch



■ **günstig**
■ **mittel**
■ **ungünstig**

Quelle: Eigene Darstellung nach (BGR 2007)

Zu beachten ist, dass manche Eigenschaften gleichzeitig und je nach betrachtetem Aspekt in ungünstiger und günstiger Richtung wirken können. So sind die Festigkeit und das Verformungsverhalten bei kristallinem Hartgestein im Hinblick auf die bergtechnischen Aufgaben günstig, da sie die Erstellung und den Erhalt großer Hohlräume begünstigen. Im Hinblick auf den hydraulischen Einschluss wirken sich diese gleichen Eigenschaften aber ungünstig aus.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass

- alle drei Wirtsgesteine günstige ebenso wie ungünstige Eigenschaften aufweisen,
- es daher ein einziges ideales Wirtsgestein nicht gibt, das die Endlagerung in anderen Gesteinen ausschließt,
- umgekehrt auch keines der drei Wirtsgesteine eine so große Anzahl an nachteiligen Eigenschaften aufweist, dass es in jedem Fall und unabhängig vom konkreten Standort generell als ungeeignet eingestuft werden muss.

3.2.2 Technische und geotechnische Barrieren

Barrieren sind natürliche oder technische Komponenten des Endlagersystems, die Sicherheitsfunktionen ausüben. Solche Funktionen sind z. B. Rückhaltemechanismen, die einer Ausbreitung radioaktive Stoffe entgegenstehen. Je nach Typus können Barrieren eine vollständige oder unvollständige Rückhaltung radioaktiver Stoffe bewirken (Selektivität). Barrieren können darüber hinaus zeitweise (temporär, z. B. Behälter) oder dauerhaft (z. B. geologische Schichten) wirksam sein. Barrierenfunktionen können auch nur latent sein und ihre Wirkung erst beim Versagen anderer Barrieren entfalten. In diesem Kapitel werden die technischen und geotechnischen Barrieren in einem Endlager beschrieben.

3.2.2.1 Brennstoff und Abfallmatrix als Barriere

Der Brennstoff selbst (bei abgebrannten Brennelementen die Uranmatrix und die Zircalloy-Hüllrohre) und die Abfallmatrix (die Borosilikatglasmatrix bei hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung einschließlich des dünnwandigen Stahlbehälters) setzen der Freisetzung radioaktiver Stoffe Widerstände entgegen. Beide Barrieren sind allerdings in vielfältiger Hinsicht nur unvollständig wirksam.

Während der Betriebsphase des Endlagers muss die Freisetzung radioaktiver Stoffe aus den Abfällen verhindert werden. Da es durch Haarrisse im Metallmaterial, z. B. an Schweißnähten, schon früh zu einer Freisetzung leicht verdampfbarer Abfallbestandteile (z. B. von Cäsium oder Iod) aus der Abfallmatrix kommen kann, ist der Einsatz einer weiteren Barriere (z. B. eines gasdichten Behälters) zwingend erforderlich. Diese Notwendigkeit ist erst dann nicht mehr gegeben, wenn andere Barrieren die Einschlussaufgabe vollständig übernommen haben (z. B. wenn das Endlager verschlossen ist und die Formation durch Verfüllung in Kombination mit Konvergenz bzw. Setzung Gasdichtigkeit erreicht hat). Bei der geplanten Rückholbarkeit ergeben sich ggf. längere Zeiträume, während derer die Einschlusseigenschaften des Endlagergebindes (der Kombination aus Behälter und Abfallmatrix) erhalten bleiben müssen, um den Umgang mit den Abfällen über die für die Rückholbarkeit vorgesehenen Zeiträume zu ermöglichen.

In der Nachverschlussphase trägt die Abfallmatrix zur Radionuklidrückhaltung bei, so lange kein Kontakt mit Wasser erfolgt. Im Fall des Kontakts mit Wasser kann es aufgrund von Korrosion bzw. Auflösung der Brennstoff-/Abfallmatrix zu einer Freisetzung von Nukliden aus der Matrix kommen (Müller-Lyda/Rübel 2008). In Laborexperimenten wurden Verläufe von Freisetzungen beim Angriff von Wasser ohne oder mit erhöhten Salzkonzentrationen ermittelt (Müller-Lyda/Rübel 2008). Es zeigt sich, dass sich nach einem anfänglichen hohen Nuklidaustrag Rückstandsschichten auf der Oberfläche der Matrix bilden, die die weitere Auflösung der Matrix behindern und verlangsamen. Letztlich wirken diese aber nur teilweise als Barriere, da weiter Stoffe durch die Rückstandsschichten diffundieren und daher zwar langsamer, aber über lange Zeiträume letztlich nahezu vollständig freigesetzt werden. Nur für

einige sehr wenige Stoffbestandteile ist die Freisetzungsrates unter diesen Bedingungen auch langfristig nur niedrig.

Bei heutigen Sicherheitsanalysen geht man meist von einer sehr stark vereinfachten Modellierung des Auflösungsgeschehens aus. Wie die Modellierung einer unfallbedingten Beschädigung eines Behälters im beantragten schwedischen Endlager Forsmark zeigt (siehe Abbildung 3-2 auf S. 64), beginnt die Freisetzung von Abfallbestandteilen unmittelbar nach der unterstellten Behälterschädigung. Sie beschränkt sich aber auf die sehr gut löslichen Nuklidbestandteile und erfasst nicht das gesamte Inventar. So ist der freigesetzte Uran- und Plutoniumanteil aus dem Brennstoff unterrepräsentiert, während Radium-226 als Zerfallsprodukt des Urans die Dosiskurve anführt.

In der Konsequenz bedeutet dies, dass die Brennstoff- bzw. Glasmatrix

- eine unvollständige Barriere darstellt, aus der leicht flüchtige Radionuklide in einem Ausmaß freigesetzt werden, das während der Betriebsphase den Einsatz weiterer und zusätzlicher Barrieren erfordert,
- in der Nachverschlussphase bei der Abwesenheit von Wasser als Barriere zur Rückhaltung der Radionuklide beiträgt,
- bei Angriff mit Wasser oder salzhaltigen Lösungen allenfalls eine geringfügig verzögernde Wirkung besitzt und ihr daher im Hinblick auf Einschluss bzw. Rückhaltung keine vollwertige Barrierenqualität zukommt,

- die unterschiedliche Löslichkeit ihrer Inhaltsstoffe verstärkt zur Geltung bringt, indem gering lösliche Stoffe wie Uran und Plutonium verstärkt in der Matrix verharren.

3.2.2.2 Endlagerbehälter als Barriere

Behälter spielen bei der Endlagerung eine wichtige Rolle. Ihnen kommt, wie bei der oberirdischen Zwischenlagerung auch, die Funktion zu,

- den Abfall handhaben zu können (mechanische Funktion),
- verdampfbare oder gasförmig aus der Matrix diffundierende Stoffe (siehe Kapitel 3.2.2.1) einzuschließen und zurückzuhalten (Einschlussfunktion),
- durch Abschirmung der Gamma- und Neutronenstrahlung die Handhabbarkeit zu gewährleisten (Abschirmfunktion, sofern diese nicht durch die Einlagerungstechnik gewährleistet wird).

Die rein mechanische Funktion ist mit der Einlagerung in das Einlagerungsfeld nicht mehr erforderlich. Dies ist bei der geplanten Rückholbarkeit anders, da die Rückholbereitschaft über längere Zeiträume weiterhin gewährleistet werden muss.

Während der Betriebsphase des Endlagers müssen die beiden letztgenannten Funktionen weiter aufrecht erhalten bleiben, solange für diese noch kein gleichwertiges Äquivalent vorhanden ist. Dies kann in unterschiedlichen Endlagerkonzepten auf verschieden Weise realisiert werden, wobei letztendlich der Einschluss und die Abschirmung durch das Wirtsgestein oder durch das Verfüllmaterial übernommen werden.

Bei einem in Deutschland für Steinsalz diskutierten und für das französische Endlager CIGEO geplanten Konzept sollen bei-

spielsweise Glaskokillen aus der Wiederaufarbeitung ohne zusätzliche Behälterverpackung in tiefen Bohrlöchern eingelagert werden. Dazu werden die Kokillen von einer Einlagerungsmaschine aus ihren Transportbehältern entnommen und fernbedient in Bohrlöcher abgesenkt. Die Aufgabe der Abschirmung wird nach der Einlagerung und dem ebenfalls fernbedient vorgenommenen Bohrlochverschluss vom Wirtsgestein übernommen.

Die Funktion des Gaseinschlusses kann je nach Konzept entweder durch ein vollständig konvergiertes Wirtsgestein, durch gasdichte Verschlüsse vor Einlagerungskammern oder auch durch Absaugen und Reinigen der Luft erfolgen.

Der Verlauf der Behälterdegradation ist extrem abhängig vom Behältermaterial und den geochemischen Bedingungen, unter denen der Angriff auf dieses Material erfolgt. Als Behältermaterialien werden je nach Wirtsgestein und Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit sauerstoffarmes Kupfer (Schweden, KBS-3-Konzept), Edelstähle, herkömmliche Stahlsorten oder auch Sonderlegierungen wie z. B. Titan-Palladium (besonders widerstandsfähig gegenüber salzhaltigen Lösungen) diskutiert.

Günstig wirken sich insbesondere reduzierende Bedingungen aus, da die Bildung korrosionsaggressiver Zwischenprodukte (z. B. von Chlor Cl_2 oder Peroxid H_2O_2 via Radiolyse¹²) verringert oder gänzlich unterbunden wird. Bei vielen Endlagerkonzepten werden daher als Puffermaterial chemisch reduzierende Materialien wie Bentonit vorgesehen (siehe Kapitel 3.2.2.3).

¹² Radiolyse: Chemische Reaktionen ausgelöst durch energiereiche Gammastrahlung, wie z. B. von Salz Na^+Cl^- zu elementarem Natrium Na und Chlor (Cl_2) oder von Wasser H_2O zu Wasserstoff (H_2) und Wasserstoffperoxid (H_2O_2)

Dies macht sich – im Vergleich zu Konzepten ohne solche Schutzschichten – in einer erheblichen Verringerung der durchschnittlichen Korrosionsraten und letztlich in einer Verlängerung der Behälterstandzeiten bemerkbar.

Nach Abschluss der Konvergenz bzw. der Setzung ist in undurchlässigen Gesteinen (Steinsalz, Tonstein) bei Konzepten ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit oder Anforderungen an die Bergbarkeit der Behälter als Barriere nicht mehr zwingend erforderlich. Die Auslegung der Behälter kann sich daher auf diese Phasendauer beschränken. Bei der Nachweisführung kann der Behälter danach entweder als nicht vorhanden unterstellt werden oder – je nach gewähltem Detailgrad der Modellierung – seine Degradationsprodukte¹³ als zusätzliche Barriere betrachtet werden.

Eine gänzlich andere Funktion übernehmen Behälter bei der Endlagerung in durchlässigen Wirtsgesteinen wie in klüftigem Hartgestein (skandinavisches KBS-3-Konzept in Schweden und Finnland) oder z. B. in hydraulisch durchlässigem Tuff (Yucca Mountain).

Hier trägt der Endlagerbehälter erheblich zur Einschlussfunktion bei, da eine wirksame geologische Barriere entweder gänzlich fehlt (Tuff) oder nur sehr eingeschränkte Funktion hat (im Sinne einer hydraulischen Durchflussbegrenzung im amerikanischen bzw. schwedischen Konzept). Entsprechend ist bei solchen Konzepten nachzuweisen, dass die Behälter für sehr

¹³ Degradationsprodukte sind je nach Behältermaterial Eisen-, Chrom-, Mangan-, Titanoxid oder -hydroxid, etc. Diese können mit gelösten Ionen wechselwirken und einige Radionuklide wirksam an ihre Oberfläche binden.

lange Zeiträume¹⁴ vollständig integer bleiben¹⁵. Bei Nachweiszeiträumen von 1 Mio. Jahren ist dieser Nachweis nicht trivial, da die wissenschaftlichen Grundlagen für eine entsprechend zuverlässige Prognose des Korrosionsverhaltens des Behältermaterials erforderlich sind. Einflussgrößen wie die Mineralisierung angreifender Wässer oder Lösungen (Salzgehalt) und Korrosionseigenschaften (Loch- bzw. Flächenkorrosion, Inertisierungsvorgänge, etc.) können in Laborexperimenten nur sehr schwierig und über vergleichsweise kurze Zeiträume getestet werden, es verbleiben auch bei sorgfältiger Ausführung stets erhebliche Unsicherheiten.

Zusammenfassend sind in Bezug auf Behälter als Barriere die folgenden Feststellungen zu treffen:

- Bei Endlagerkonzepten, bei denen die Hauptlast des Einschlusses von geologischen und geotechnischen Barrieren übernommen wird, spielen Behälter und damit verbundene Nachweiserfordernisse nur für die Phase bis zur Erreichung des vollständigen Einschlusses durch die geologische Barriere eine Rolle. Jenseits dieses Zeitraums hat die Behälterbarriere nur noch den Charakter einer – entbehrlichen – zusätzlichen Schutzfunktion.
- Bei anderen Konzepten ist der Nachweis der Barrierenzuverlässigkeit für den gesamten Zeitraum des Einschlusses

¹⁴ Im US-Konzept: vollständige Integrität über 1.000 Jahre, partielle Degradation bis 10.000 Jahre; im schwedischen Konzept: vollständige Integrität über 100.000 Jahre.

¹⁵ Zu Behälterstandzeiten in verschiedenen Langzeitsicherheitsstudien siehe (Müller-Lyda, I.; Rübel, A. 2008), dort insbesondere Tabelle 1, S. 4

von zentraler Bedeutung. Der Nachweis ist nicht trivial und bleibt mit erheblichen Unsicherheiten verbunden.

3.2.2.3 Puffermaterial als Barriere

Endlagerbehälter können nicht raumschlüssig in Hohlräumen (Einlagerungsstrecken, -stollen oder Bohrlöcher) eingelagert werden, es verbleibt aus praktischen Gründen stets ein Zwischenraum. Als Puffermaterial (auch Buffer oder Verfüllung / Backfilling bzw. Versatz) wird das Material im Zwischenraum zwischen dem Endlagerbehälter und dem Einlagerungshohlraum bezeichnet. Diesem Verfüllmaterial kommen verschiedene Funktionen zu, die von unterschiedlicher Relevanz für die verschiedenen Wirtsgesteine sind:

- **Mechanische Stabilität:** Das Puffermaterial verhindert, dass es zu Bewegungen des Behälters im Einlagerungshohlraum kommt.
- **Beschleunigung von Konvergenz/Setzung:** Die Verringerung des luftgefüllten Volumenanteils im Einlagerungshohlraum beschleunigt die Konvergenz- und Setzungsvorgänge.
- **Schutz vor eindringenden Lösungen:** Der für eindringende Lösungen verfügbare Raum wird erheblich verkleinert, so dass selbst bei einer unterstellten (z. B. unfallbedingten) Flutung des Einlagerungsbereichs kein ausreichendes Lösungsvolumen für eine korrosive Zerstörung des Behälters und für die Brennstoffauflösung zur Verfügung stehen würde. Entfaltet das Puffermaterial darüber hinaus auch noch eine Quellwirkung, wenn es in Kontakt mit Wasser tritt (Bentonit), verringert dies den verfügbaren Raum noch weiter.

- **Barriere gegen den Transport von Radionukliden in das Wirtsgestein:** Eine Reihe von Abfallbestandteilen wird bereits in der Pufferzone zurückgehalten und gelangt erst gar nicht bis zum Wirtsgestein bzw. zu den Verschlussbauwerken. Diese Barrierewirkung wird unten in Kapitel 3.2.3.1 (dort insb. Abbildung 3-10 auf S. 97) anhand des Referenzfalls für ein Tiefenlager in der Schweiz dargestellt. In dem Beispielfall wäre die Barrierewirkung des Puffermaterials nicht unbedingt erforderlich, da das Wirtsgestein die gleiche Funktion ausübt und von viel größerem Umfang ist. Bei Wirtsgesteinen ohne relevante eigene Rückhaltefunktion kann das Puffermaterial aber einen entscheidenden eigenen Beitrag zur Rückhaltung einnehmen.
- **Thermischer Puffer:** Das Puffermaterial ist in direktem Kontakt mit dem Behälter und daher höheren Temperaturen ausgesetzt. Durch die vergrößerte Kontaktfläche zum Wirtsgestein wird die thermische Einwirkung verringert.
- **Verringerung der Korrosionsrate beim Behältermaterial:** Das Puffermaterial kann bei entsprechender Auswahl die Korrosionsrate beim Behältermaterial deutlich verringern und so die Standzeiten verlängern bzw. zur Gewährleistung der ggf. erforderlichen Standzeiten beitragen (siehe Kapitel 3.2.2.2).
- **Verringerung der Sensitivität gegenüber seismischen Einwirkungen:** Wie in Kapitel 2.2.2.1 beschrieben verringert ein kraftschlüssig verfüllter Raum die Sensitivität der Behälter gegenüber natürlichen äußeren Einwirkungen wie Erdbeben.

Entsprechend der genannten Funktionen sowie der Verträglichkeit des Puffermaterials mit der thermischen Belastung im Bohrloch, der geochemischen Verträglichkeit mit dem anstehenden Wirtsgestein sowie praktischen Erwägungen erfolgt die Materialauswahl. In Tongesteinen und in Hartgestein ist Bentonit Standard, in Salz zerkleinertes Salz (Salzgrus).

Das Puffermaterial wird in der Regel vor bzw. unmittelbar nach Abschluss der Einlagerung in dem jeweiligen Einlagerungsbereich eingebracht, da eine Zugänglichkeit der Behälter in dieser Option nicht erhalten werden muss (weder für weitere Arbeiten noch für die Proliferationsüberwachung). Die Verfüllung bringt auch radiologische Vorteile (erhöhte Abschirmwirkung durch das Verfüllmaterial) und führt zu einem rascheren Abschluss von Konvergenz und von Setzungen. Die Verfüllung ist in Abbildung 2-3 auf S. 48 schematisch skizziert.

3.2.2.4 Strecken- und Schachtverschlüsse als Barriere

Nach Abschluss der gesamten Einlagerungsvorgänge sind bei dieser Option alle Strecken und schließlich auch die Schächte im Endlager zu verfüllen. Dies erfolgt mit entsprechend konstruierten und technisch zu errichtenden Verschlussbauwerken. Zentrale Aufgabe dieser Verschlüsse ist bei allen Endlagerkonzepten,

- den Zugang zu den Abfällen zu unterbinden (Schutzfunktion, Erhöhung der Proliferationsresistenz),
- den Zufluss von Wässern aus dem Deckgebirge zu unterbinden (bei undurchlässigen Wirtsgesteinen).

Bei konvergierenden bzw. zu Setzung neigenden Wirtsgesteinen spielen die technischen Verschlüsse nur so lange eine Rolle, bis alle Zuwegungen sich selbsttätig vollständig ver-

geschlossen haben. Danach verlieren sie ihre Barrierenfunktion, das Ausbreitungsgeschehen wird dann von den Ausbreitungseigenschaften der Formation selbst bestimmt.

Bei starren Wirtsgesteinen (Granit, Tuff) behalten die verschlossenen Schächte und Strecken ihren Charakter als sensitive potenzielle Schwachpunkte. Für diese gilt, dass die Qualität dieser Verschlüsse mindestens derjenigen Einschlussqualität des Wirtsgesteins entsprechen muss. Dies setzt z. B. voraus, dass für die Erstellung von Strecken möglichst gebirgschonende Verfahren einzusetzen sind, mit denen Umfang und Tiefe von Gesteinsauflockerungszonen begrenzt werden können, da solche Zonen sich nicht selbstständig wieder verschließen. Für die Konstruktion müssen quellende Baustoff-Elemente eingesetzt werden, um die Auflockerungszone unter Quelldruck verschließen zu können. Im Übrigen sind nur solche Baustoffe verwendbar, die für lange Zeiträume unter hoher Auflast (Gebirgsdruck) mechanisch integer bleiben und auch bei Einwirkung von Wasser nicht degradieren.

3.2.3 Kombination von Barrieren

Aus dem Kapitel 3.2.1 (Geologische Barrieren) ging hervor, dass

- verschiedene Wirtsgesteine sowohl günstige als auch ungünstige Eigenschaften aufweisen, die sie als Rückhaltebarriere qualifizieren,
- manche Eigenschaften nur eine Wirkung auf einen Teil der Abfallbestandteile haben (z. B. die Löslichkeit auf U- und Pu-Nuklide, die Sorption nur auf Kationen, die geochemische Mobilität ist nur bei ca. 90% der im Abfall enthaltenen Elemente gering).

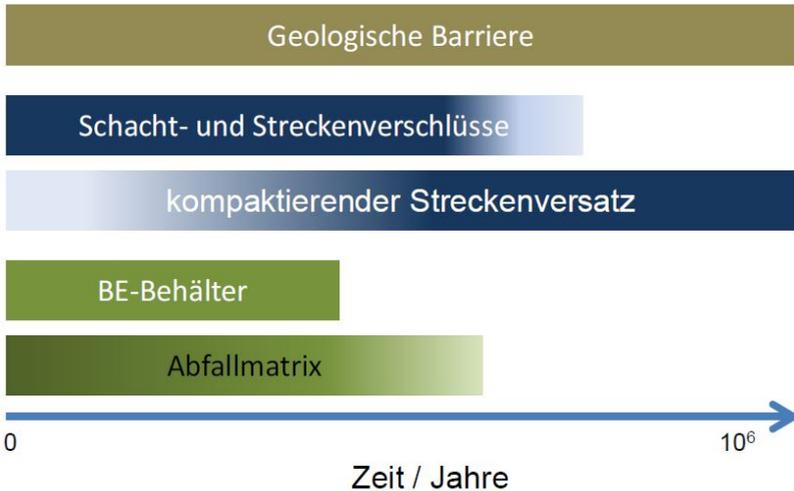
Aus Ausführungen zu den technischen und geotechnischen Barrieren (Kapitel 3.2.2) ist erkennbar, dass diese stets eine beschränkte zeitliche Zuverlässigkeit aufweisen, die häufig weit unter dem notwendigen Isolationszeitraum für die radioaktiven Abfälle liegt (z. B. die Behälterintegrität von Stahlbehältern oder dünnwandige Behälter aus herkömmlichem Stahl bei Glaskokillen).

Die Aufgabe des möglichst vollständigen, mindestens aber sehr weitgehenden Einschusses der radioaktiven Stoffe bei der Endlagerung besteht darin, die Barriereigenschaften geologischer und technischer Barrieren so zu kombinieren, dass dieses Ziel sicher erreicht wird. Darüber hinaus soll das Gesamtsystem robust sein, d. h. auch dann noch wirksam bleiben, wenn einzelne Barriereigenschaften nicht wie geplant verfügbar sind.

3.2.3.1 Barrierenkombinationen bei Steinsalz- und Tonsteinkonzept

Ein gegenüber dem Ausfall einzelner Barriereigenschaften robustes System lässt sich nur erreichen, wenn Barrieren in geeigneter Weise miteinander kombiniert werden. Diesbezügliche Zuordnungen und Festlegungen sind Gegenstand des jeweils zu erstellenden Sicherheitskonzepts. Abbildung 3-8 aus (Mönig et al. 2012) zeigt exemplarisch eine solche Kombination für ein Endlager im Steinsalz.

Abbildung 3-8: Technische und geologische Barrieren im Zusammenwirken (Beispiel)



Quelle: (Mönig et al. 2012)

In der frühen Phase sind noch sehr hohe Inventare wärmeerzeugender Radionuklide (insbesondere Sr-90, Cs-137 und Pu-238) in den Abfällen vorhanden. Nach mehr als 1000 Jahren geht diese „heiße Phase“ allmählich in die Langzeitphase über, die üblicherweise bis Millionen Jahre reicht. Für ein Endlager im Tonstein sind die Verhältnisse grundsätzlich ähnlich, während bei einem Endlager im Kristallin von einem abweichenden Barrierenkonzept auszugehen ist.

Die technische Barriere Behälter muss mindestens bis zum Betriebsabschluss zwingend – sowie günstigerweise bis zum Abschluss der Konvergenz- und Setzungsphase des Versatzes nach einigen 100 Jahren – den Gaseinschluss gewährleis-

ten. Diese Barriere ist bis zum Betriebsabschluss nicht ersetzbar und singular.

Damit die Abfälle über und unter Tage gehandhabt werden können, ist die Aufgabe des Behälters ferner die Reduzierung und Begrenzung der Gamma- und Neutronendosis. Diese Funktion ist bis zur Einlagerung in ein Bohrloch und dessen erfolgter Verfüllung (bei Bohrlochlagerung) bzw. bis zur Verfüllung der Einlagerungsstrecke (bei Streckenlagerung) ebenfalls unverzichtbar.

Degradiert der Behälter mit der Zeit (z. B. durch langsame Diffusion von Wasser und Metall-Wasser-Reaktion), bilden sich große Mengen an Eisenoxiden, die einige Radionuklide aus dem Abfall sehr fest zu binden vermögen. Außerdem stellt diese Reaktion sicher, dass ein stark chemisch reduzierendes Milieu erhalten bleibt, solange noch Metall vorhanden ist. Dieses Milieu immobilisiert Elemente wie Uran und Plutonium. Diese beiden chemischen Barrierewirkungen des Behälters ergänzen andere Barrieren sehr wirkungsvoll, sind aber nur begünstigende Funktionen, von denen im Sicherheitsnachweis in der Regel kein Kredit genommen wird.

Ähnliches gilt für die Barrieren Brennstoff- und Glasmatrix. Da diese für den weit überwiegenden Stoffanteil im Brennstoff bzw. Abfall wirksam sind (>90%), nur auf die leichter freisetzbaren und hochmobilen Abfallanteile Cäsium und Iod (sowie einige wenige weitere) nicht, ist die Barriere nur partiell wirksam. Ihr käme eine wirksame Schutzwirkung nur dann zu, wenn ein Behälterdefekt oder früher Dichtheitsverlust einträte, da die Barriere dann den freisetzbaren Nuklidanteil begrenzt (insb. Cs-137 und Kr-85).

Im Kontakt mit großen Mengen an Wasser bieten beide Barrieren keine dauerhafte Einschluss- und Verzögerungswirkung. Im Hinblick auf die Langzeitsicherheit wird dieser Barriere daher meist keine entscheidende Bedeutung zugeordnet, meist wird in der Langzeitsicherheitsanalyse konservativ ihre völlige Unwirksamkeit unterstellt (ggfs. nach einem bestimmten Zeitraum wie z. B. 10.000 Jahren).

Die Schutzfunktion des Versatzes (Puffermaterials) im Einlagerungshohlraum des Endlagerbehälters besteht darin, dass dieser

- den Zeitraum bis zum Abschluss der Setzungen bzw. Konvergenz des Hohlraums verkürzt,
- nach Abschluss der Kompaktion den Behälter vollständig einschließt und so, im Fall eines unterstellten Wassereintruchs, den Kontakt mit Wasser sowie eine anschließende Freisetzung von Schadstoffen verhindert bzw. verringert, und
- das Angebot an verfügbarem Luftsauerstoff für Oxidationsvorgänge verringert.

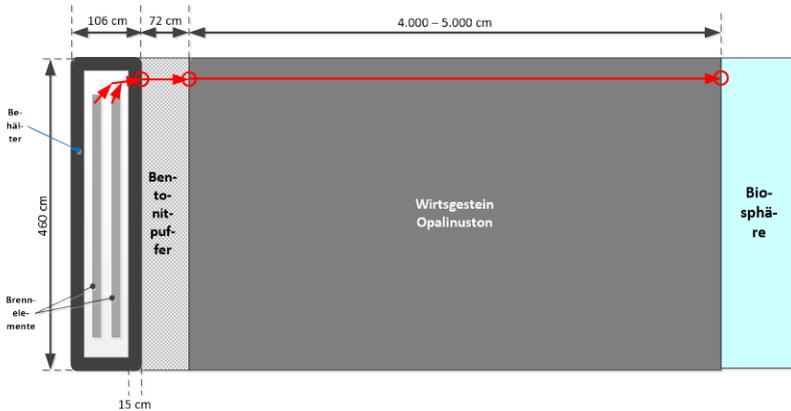
Die Strecken- und Schachtverschlüsse übernehmen bei Steinsalz und Tonstein die Verschlussfunktion. Ihre Funktion endet, wenn die Formation selbst sich durch Setzung und Konvergenz verschlossen hat. Auch diese technischen Barrieren haben in Kristallin eine deutlich erweiterte Sicherheitsfunktion.

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich hat bei Steinsalz und Tonstein die herausragende Funktion, dass er nahezu die gesamte Aufgabe der Rückhaltung übernimmt. Sein Erhalt in physischer Hinsicht und der Erhalt seiner Rückhalteigenschaften stellt daher die zentrale Sicherheitsfunktion dar.

Wasserabschluss, Diffusionskontrolle und Sorption sind die drei zentralen Funktionen, die letztlich zur Reduzierung des Lösungsangebots (ausschließlich diffundierendes Porenwasser) und zur Rückhaltung von Radionukliden für alle Zeiten (bei Steinsalz: keine Diffusion; bei Tonstein: Unterbindung der Diffusion bei zu großen Molekülen) bzw. zu Verzögerungen im Bereich von Millionen Jahren (bei Tonstein: irreversible Sorption) führen.

Die Wirkung der drei Barrieren Behälter, Puffermaterial und Wirtsgestein ist im nachfolgenden Beispiel, dem Standardfall („Reference Case“, wahrscheinliche / erwartete Entwicklung) aus der Langzeitsicherheitsanalyse für den Entsorgungsnachweis in der Schweiz (Tonstein), dargestellt. Diesem Standardfall liegt der in Abbildung 3-9 skizzierte räumliche Aufbau und die angedeuteten Ausbreitungswege zugrunde. Auf die Berücksichtigung von Schichten, die nur geringfügige Isolationsbeiträge liefern, wurde verzichtet. Die Übergänge jeweils in andere Kompartimente auf dem Ausbreitungspfad sind mit roten Kreisen angedeutet.

Abbildung 3-9: Räumlicher Aufbau und Ausbreitungswege beim schweizerischen Entsorgungsnachweis (liegende Darstellung)



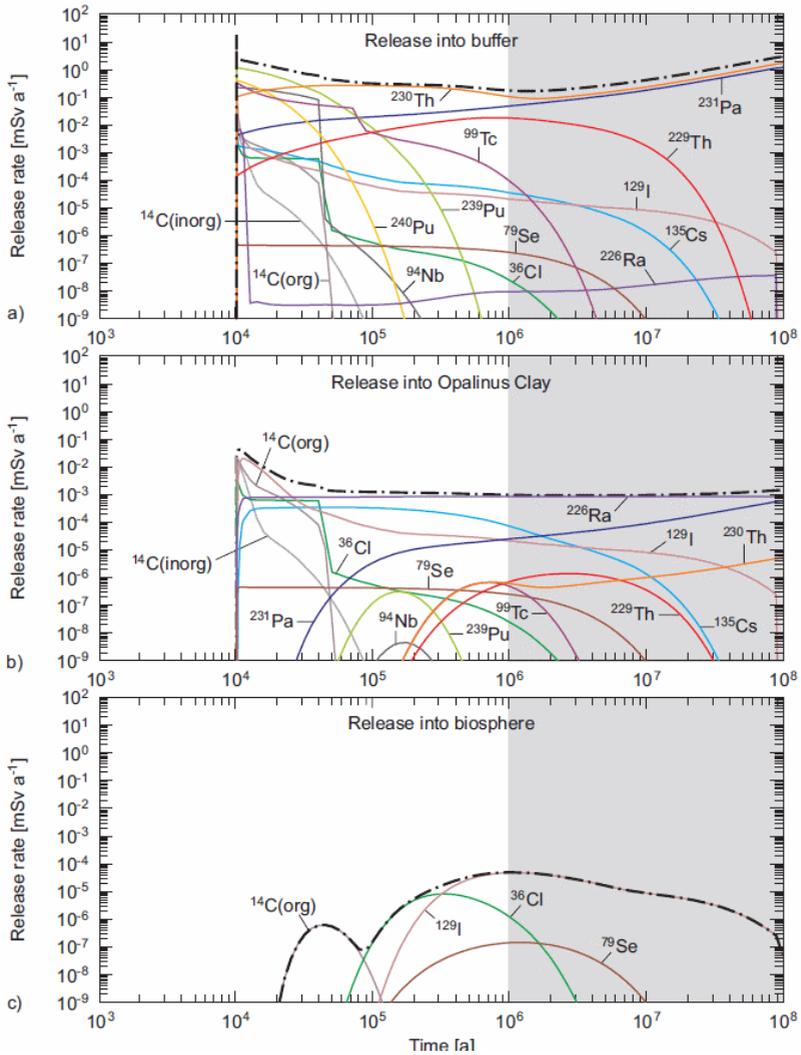
Quelle: Eigene Darstellung

In Abbildung 3-10 dargestellt sind die in die unterschiedlichen Kompartimente übergehenden Aktivitätsmengen bei abgebranntem Kernbrennstoff:

- „Release into Buffer“. Aus dem endgelagerten Brennstoff in den Puffer (Bentonit) übergehende radioaktiven Stoffe (Behälter als nicht vorhanden unterstellt),
- „Release into Opalinus Clay“: Aus dem Puffer in die geologische Tonschicht übergehende radioaktiven Stoffe,
- „Release into Biosphere“: Aus der geologischen Tonschicht in nichtisolierende Gesteinsschichten und die belebte Umwelt übergehende Stoffanteile.

Dargestellt ist nicht die Stoffmenge (in Gramm oder Becquerel), die jährlich übergeht, sondern deren radiologisch bewertetes Äquivalent (ausgelöste Dosisbelastung durch die Stoffmenge), so dass die radiologische Relevanz der unterschiedlichen Stoffe mit in die dargestellte Größe eingeht. Sowohl der zeitliche Verlauf als auch der Dosisverlauf sind logarithmisch aufgetragen.

Abbildung 3-10: Referenzfall beim Entsorgungsnachweis am Standort Benken



Quelle: (NAGRA 2002)

Im oberen Diagramm a) ist erkennbar, welche radioaktiven Stoffe den nach 10.000 Jahren als plötzlich defekt unterstellten Behälter (technische Barriere) in welchem Umfang verlassen und in die unmittelbare Behälterumgebung, das Puffermaterial aus Bentonit, diffundieren können. Der Vorgang ist für einen Zeitraum bis 100 Mio. Jahre, also weit über die geologischen Prognosemöglichkeiten hinaus, modelliert. Wie zu erkennen ist, handelt es sich um eine Vielzahl unterschiedlicher Radionuklide. Der Übergang der Radionuklide in das Puffermaterial nimmt für die meisten Radionuklide mit der Zeit ab, hält aber insgesamt über den gesamten modellierten Zeitraum weiter an. Sehr unterschiedlich sind die absoluten Höhen der Stoffbeiträge (11 Größenordnungen Unterschied = Verhältnis 1 : 10.000.000.000), aber auch die Verlaufsform ist sehr unterschiedlich.

Würde man die hier in den Puffer übergehenden Stoffanteile dem gesamten eingelagerten Stoffinventar gegenüberstellen, wäre daraus der Effekt erkennbar, den bei diesem Vorgang die Brennstoffbarriere ausübt. Sie steht der Ausbreitung vieler Stoffe bereits so weit entgegen, dass sich beispielsweise keine Urannuklide (U-238, U-235, U-233) unter den übergehenden Spezies befinden, wohl aber deren radioaktive Zerfallsprodukte (Th-230 und Ra-226, Th-231).

Die zweite Stufe, nämlich den Übergang radioaktiver Stoffe vom Puffermaterial in das Wirtsgestein, in diesem Fall Opalinuston, zeigt der Abbildungsteil b). Gegenüber dem Übergang in das Puffermaterial findet sich hier bereits eine erhebliche Reduzierung der Anzahl übergehender Stoffe als auch eine erhebliche Verringerung der resultierenden Freisetzungsrate auf etwa ein Tausendstel. Daraus ist der Barriereneffekt des Puffermaterials erkennbar: die Rückhaltung in dieser Barriere ist zwar insgesamt unvollständig, aber für einen Teil der Stoffe

bereits vollständig gegeben. Somit ändert sich auch die Reihenfolge der wichtigsten beitragenden Radionuklide. Auch ist erkennbar, dass der Übergang in den Opalinuston über sehr lange Zeiträume anhält und für einige wenige Radionuklide sogar ein Anstieg der Freisetzungsrates erwartet wird (Pa-231 und Th-230).

Den Effekt der Barriere Opalinuston zeigt der unterste Teil der Darstellung anhand des Überganges in die Biosphäre c). Hier gelingt es nur noch vier Radionukliden die Barriere zu überwinden, während der größte Teil des radioaktiven Inventars in der geologischen Barriere verbleibt und auch nach sehr langen Zeiten diese nicht in Richtung Biosphäre verlassen kann. Für die vier mobilen Radionuklide hat sich die Freisetzungsrates dabei kaum nennenswert verringert, aber für alle anderen ist die Barriere sehr wirksam, vollständig und effektiv.

Die Form des zeitlichen Verlaufs des Austrags hat sich gegenüber dem Diagrammteil b) ebenfalls deutlich verändert. Es liegen sehr stark abgeflachte Kurven vor. Die Austragsmaxima liegen für die mobilen Nuklide C-14 bei 50.000 Jahren, für Cl-36 bei 300.000 Jahren und für Se-79 bei einer Million Jahre. Während der Austrag in die Biosphäre für diese Radionuklide nach einer Million Jahre praktisch abgeschlossen ist (im Wesentlichen wegen des radioaktiven Zerfalls), hält er für I-129 nach dem Maximum noch weiter an, aber in zurückgehendem Umfang.

In weiteren Szenarien lässt sich feststellen, dass das Versagen verschiedener Barrieren – wie ein früheres Versagen des Behälters, eine beschleunigte Auflösung der Brennstoffmatrix oder der Unwirksamkeit des Puffermaterials – keine wesentlich andere Charakteristik der Dosiskurve und keine wesentlich größeren Dosisbelastungen zur Folge hat, wohl aber bei Un-

terstellung eines gleichzeitigen Versagens der Opalinuston-schicht. Die Hauptlast des Einschlusses trägt also die Rück-haltung in der Opalinuston-schicht. Während auf den Behälter oder die Pufferschicht verzichtet werden könnte, ohne das Schutzniveau wesentlich zu verringern, ist das Einschlussver-mögen der Opalinuston-schicht im Gesamtsystem nicht ersetz-bar.

Auch bei einer Einlagerung im Steinsalz trägt die geologische Barriere die Hauptlast, eine analoge bildliche Darstellung wie für Tonstein ist aber angesichts des im ungestörten Steinsalz praktisch nicht stattfindenden Schadstofftransports nicht sinn-voll.

3.2.3.2 Barrierenkombination bei der Endlagerung im kristallinen Hartgestein

Beim Barrierenkonzept im kristallinen Hartgestein liegt das Schwergewicht auf dem Endlagerbehälter und seiner Integri-tät.

In Kristallingesteinen ist es nahezu unmöglich, einen Ge-steinsbereich aufzufinden, dem die gleiche Rolle beim Ein-schluss der radioaktiven Stoffe zugeordnet werden könnte wie in den oben beschriebenen Konzepten in Steinsalz und Ton-stein. Dies ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass vollkommen ungeklüftete Formationen, die einen vollständigen hydraulischen Abschluss ermöglichen, praktisch nicht auffind-bar sind und dass die Rückhaltung durch Sorption gering ist.

Aufgrund der fehlenden Plastizität von kristallinen Hartgestei-nen erfolgt keine Konvergenz bzw. Setzung. Der langfristige Einschluss der Abfälle wird daher im schwedisch-finnischen KBS-3-Konzept durch einen langlebigen Behälter, also eine technische Barriere gewährleistet. Der Puffer hat im Sicher-

heitskonzept für ein Endlager im Kristallingestein eine andere Funktion als in den oben beschriebenen Fällen für Steinsalz und Tonstein. Er schützt den Behälter mechanisch und gewährleistet ein chemisches Milieu, das geringe Korrosionsraten des Behältermaterials bewirkt. Darüber hinaus wirkt er als rückhaltende Barriere für den Fall eines Behälterversagens.

3.3 Fazit

Der häufig verwendete Begriff des „Multibarrierenkonzept“ erweist sich vor dem Hintergrund dieser Betrachtungen zu den verschiedenen Wirtsgesteinen als komplexer als der Begriff auf den ersten Blick suggeriert, da nicht zu jedem Zeitpunkt mehrere Barrieren vorhanden sind und diese sich auch nicht rein additiv und voneinander unabhängig (redundant und diversitär) verhalten.

Aufgrund ihrer Eigenschaften, Rückhaltequalitäten und Verfügbarkeiten ist das Barrierenkonzept in jedem Fall differenziert und im Kontext des jeweiligen Endlagerkonzepts zu betrachten. Derartigen Effekten wird mit dem Begriff des Multibarrierekonzepts nicht angemessen Rechnung getragen. Dem entsprechend gewinnen in modernen Konzepten und Sicherheitsanalysen der Begriff der Sicherheitsfunktion (BMU 2010) und darauf basierende Ansätze zur Darlegung des Sicherheitskonzepts zunehmend an Bedeutung: Das Wirken der Barrieren lässt sich mittels der Zuweisung von Sicherheitsfunktionen beschreiben, die zeitabhängig, gemeinsam mit anderen Funktionen und ggf. auch latent oder als Reservefunktionen wirken können. Im Sicherheitskonzept werden diese Funktionen definiert und den Komponenten des Endlagersystems zugeordnet.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass

- bei keinem Konzept eine Barriere alleine den vollständigen Einschluss übernehmen kann, da dem Behälter mindestens bis zum Abschluss der Einlagerung die Barrierefunktion zukommt und weil alle geologischen Barrieren durch Bau und Betrieb des Endlagers zunächst in einem gestörten Zustand vorliegen,
- allen Barrieren mindestens partielle Bedeutung zukommt oder diese als begünstigende Momente an der Isolation des Gesamtsystems beteiligt sind,
- die Erfordernis der Wirksamkeit von Barrieren über die Zeit sehr unterschiedlich sein kann und je nach Rolle im Gesamtsystem von „zwingend“ bis „nice-to-have“ reichen kann,
- ihre Zuverlässigkeit und Dauerhaftigkeit sehr unterschiedlich zu beurteilen ist,
- das Gesamtsystem und die gesamten zeitlichen Abläufe darüber bestimmen, welchen Barrieren wann und mit welchem Zuverlässigkeitsgrad welche Funktion zukommt,
- vielen technischen und geotechnischen Barrieren nur eine zeitlich befristete Funktion zukommt.

4 Das Endlager als Anlage

4.1 Das Endlager als Anlage nach dem Atomgesetz

Endlager für abgebrannte Brennelemente und hochradioaktive Abfälle fallen formalrechtlich nicht unter die Definition einer „kerntechnischen Anlage“ nach dem Atomgesetz. § 9a(3) bestimmt aber, dass „der Bund [...] Anlagen zur Sicherstellung und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle einzurichten“ hat.

Gemäß § 9b (1) bedürfen die Errichtung, der Betrieb und die Stilllegung der in § 9a Abs. 3 genannten Anlagen der Planfeststellung.

Im Zuge der Neureglung eines Standortauswahlverfahrens mit dem Standortauswahlgesetz wurde § 9b (1a) ergänzt:

„In den Fällen, in denen der Standort durch Bundesgesetz festgelegt wurde, tritt an die Stelle der Planfeststellung eine Genehmigung. Die Genehmigung darf nur erteilt werden, wenn die in § 7 Absatz 2 Nummer 1 bis 3 und 5 genannten Voraussetzungen erfüllt sind; für die Stilllegung gelten diese Voraussetzungen sinngemäß.“

Wie bei (anderen) kerntechnischen Anlagen auch ist der Nachweis zu führen, dass ein Endlager sicher und gefahrlos für Mensch und Umwelt betrieben werden kann. Der Sicherheitsnachweis wird bei Endlagern als „Safety Case“ bezeichnet, weil er sich aufgrund der Besonderheiten bei Endlagern erheblich von Sicherheitsberichten für andere kerntechnische Anlagenarten unterscheidet¹⁶. Die folgenden Unterschiede konstituieren solche Besonderheiten von Endlagern gegenüber anderen kerntechnischen Anlagen:

- Planungs-, Genehmigungs- und Errichtungsprozesse für Endlager erstrecken sich über eine Dauer von mehreren Jahrzehnten. Während dieser Zeit finden zahlreiche Sicherheitsbewertungen auf verschiedenen Niveaus statt. Eine einmalige Sicherheitsbewertung, womöglich wie üblich erst am Ende des gesamten Zeitraums, würde diese Prozesse nicht angemessen abbilden.

¹⁶ Vgl. I.Müller-Lyda/M.Sailer: Anhang Safety Case - Anforderungen und Inhalte eines Safety Case für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle. – Braunschweig/Darmstadt 2008

- Während dieser Zeit nehmen aufgrund der fortschreitenden Erkundung, aber auch später während der Errichtung die Kenntnisse über den genauen Aufbau, die Eigenschaften und die günstigen und ungünstigen Besonderheiten der geologische Formation erheblich an Detailgrad zu, da es sich in erheblichen Teilen nicht um eine normierbare und am Reißbrett mit genormten Bestandteilen planbare Anlage handelt. Technische und sicherheitsgerichtete Optimierungen finden daher laufend und nicht nur einmalig bei der Auslegung der Anlage statt. Diesem wachsenden Erkenntnis- und Planungsstand wird in jeweils angepasste Safety Cases auf dem jeweils erreichten Stand Rechnung getragen.
- Gleiches gilt für den Nachweis der Langzeitsicherheit der Anlage, für die es bei anderen kerntechnischen Anlagentypen im Hinblick auf Methoden, Durchführung, Detailtiefe sowie Zuverlässigkeits- und Qualitätserwartung keine Entsprechung gibt. Auch hier handelt es sich eher um einen Iterationsprozess als um einen statischen Nachweis, so dass zur Abbildung des erreichten Kenntnisstands regelmäßige vorläufige Darstellungen angemessen sind.
- Aufgrund der langen Verfahrensdauer können sich relevante Weiterentwicklungen des Standes von Wissenschaft und Technik ergeben, die ggf. im Safety Case zu reflektieren sind.

Die Anforderungen an einen „Sicherheitsbericht“ wie er für andere kerntechnische Anlagen, die nach § 7 des Atomgesetzes zu genehmigen sind, nach den Vorgaben der Atomrechtlichen Verfahrensverordnung AtVfV (AtVfV 2006), § 3 (1), zu

erstellen ist, sind daher für Endlager nicht ausreichend und beziehen sich auch formal nicht auf Endlager.

Der Safety Case für Endlager hat sowohl den Betriebs- als auch den Nachbetriebszeitraum zu umfassen. Bestandteile des Safety Cases für die *Betriebsphase* sind sicherheitstechnische und radiologische Aspekte wie z. B.

- Strahlenschutz der Beschäftigten (Gamma- und Neutronendosis) und der Umgebung (Abluft) unter der Randbedingung, dass im Endlager kein Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen erfolgt,
- Bergwerkssicherheit und Arbeitsschutz einschließlich Betrachtung der Möglichkeit und der Auswirkungen von Unfällen bei der Lagerung, dem ober- und untertägigen Gebindetransport einschließlich Umladevorgängen sowie bei Einlagerungsvorgängen,
- Einwirkungen von außen auf die Anlage, wie z. B. Erdbeben, Überflutung, Terroraktivitäten,
- Weitere Betriebssicherheitsaspekte des Langzeitbetriebs wie Kompetenzerhalt, Personalzuverlässigkeit und –erhalt.

Der Safety Case für die Nachbetriebsphase ist im Detail in Kapitel 5 beschrieben.

Weitere rechtliche Anforderungen im Hinblick auf Endlager, insbesondere im Hinblick auf die geforderte Vorsorge gegen Schäden, sind in (Barth / Schulze 2008) dargestellt. Im Hinblick auf Auswirkungen eines Endlagers ist noch erheblich, dass diese gemäß Nr. 11.2 Anlage 1 des (UVPG 2013) der Pflicht zur Umweltverträglichkeitsprüfung unterliegt und die

Auswirkungen der Anlage auf Menschen und die Umwelt im Rahmen dieser Prüfung ebenfalls thematisiert werden.

4.2 Das Endlager als Bergwerk

Endlager sind keine Bauwerke wie andere kerntechnischen Anlagen, da der entscheidende Teil der Tätigkeiten untertage in einem Bergwerk erfolgt. Sie unterliegen daher zusätzlich den Regeln des Bundesberggesetzes (BbergG 2015). Die Tätigkeiten erfolgen in enger Anpassung an die vorgefundenen natürlichen Gegebenheiten in der gewählten Formation.

4.2.1 Unvereinbarkeit von Gewinnungs- und Endlagerbergwerken

Endlagertätigkeiten unterscheiden sich erheblich von denen in Bergwerken, deren Bestimmung die Förderung von Bodenschätzen ist. Im Zentrum der Tätigkeit von Förderbergwerken steht die möglichst optimale Beraubung des errichteten Bergwerks an Bodenschätzen. Dies hat als Nebenfolgen die Erstellung von riesigen Hohlräumen, angepasst an die vorkommenden Bodenschätze, die maximal mögliche Ausbeutung des Bodenschatzes bis auf möglichst niedrige Restbestände (wie z. B. Sicherheitspfeiler oder der Erhalt von Schweben zur Vorbeugung gegen Einstürze) und die enge Orientierung des Abbaus am Verlauf der ausbeutbaren Schichten.

Die Zielsetzungen bei der Endlagerung sind hingegen die möglichst schonende Auffahrung von Hohlräumen (zur Minimierung der Störungszonen), die Minimierung der Hohlraumerstellung zur möglichst frühzeitigen Erreichung der Konvergenz und der möglichst weitgehende Erhalt der isolierenden Schichten. Sofern das Wirtsgestein (geologische Barriere) entscheidende Beiträge zum Einschluss der Schadstoffe leis-

tet, stehen diese Zielsetzungen denjenigen bei einem Förderbergwerk diametral gegenüber, sie sind miteinander unvereinbar. Es ist ganz offenkundig, obwohl naheliegend und unübersehbar, dass diese grundlegende Unvereinbarkeit der beiden Tätigkeiten Endlagerung und Rohstoffgewinnung bei früheren Projekten (z. B. Asse, Morsleben) vernachlässigt wurde und nachträglich zu erheblichen Schwierigkeiten beigetragen hat (Asse: Wassereinbruchgefahr durch sehr gering bemessene Schweben gegen das Deckgebirge; Morsleben: erheblicher Mehraufwand für die Verfüllung unnötiger Hohlräume). Bei beiden Projekten wurde auch anfänglich die vorgesehene Betriebsdauer unterschätzt, was – in Verbindung mit den großen aufgefahrenen Hohlräumen – zu Problemen mit der Statik dieser Hohlräume geführt hat.

Als wichtige Grundsätze gelten daher bei der Endlagerung:

- Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle, bei denen das Wirtsgestein wesentlich zum Einschluss beiträgt, sind grundsätzlich in eigenständig und exklusiv zu diesem Zweck aufgefahrenen Bergwerken zu errichten. Die Auf-fahrung ist dabei möglichst schonend zu gestalten.
- Bergwerke, die bereits früher für die Rohstoffgewinnung dienten, sind unter derartigen Umständen (Einschluss-funktion des Wirtsgesteins) ungeeignet für den Zweck der Endlagerung.
- Die vorgesehene Betriebsdauer des Endlagers ist auf kei-nen Fall zu unterschätzen. Bei der Bemessung (z. B. im Hinblick auf die Statik von Schächten und Hohlräumen) sollten im Gegenteil großzügigere Betriebsdauern als er-wartet vorgesehen werden, um in jedem Fall Engpässe zu

vermeiden, die mit Zielkonflikten und sicherheitstechnisch fragwürdigen Entscheidungen einhergehen könnten.

4.2.2 Zielkonflikt Rohstoffausbeutung und Endlagernutzung

Zielkonflikte zwischen Rohstoffausbeutung und Endlagernutzung sind nur für Steinsalz relevant. Bei Tonstein und bei Kristallin sind in Tiefen von 500 m und mehr solche Konflikte weder historisch belegt noch nach heutiger Kenntnis künftig zu erwarten, da beide in ihrer Bedeutung als Baustoffe nur beschränkt geeignet sind und – wegen des erheblich höheren Aufwands – eine Gewinnung aus oberflächennäheren Vorkommen gleicher oder ähnlicher Qualität weniger aufwändig und daher viel günstiger ist. Allerdings ist zu beachten, dass Aussagen zum Wert oder Unwert von Materialien in der Zukunft immer spekulativ sein werden – so sind z. B. Metalle der seltenen Erden heute wirtschaftlich relevant, was noch in jüngerer Vergangenheit kaum vorhersagbar gewesen sein dürfte.

Gleichwohl können in Ton- oder Kristallingestein Nutzungskonflikte, insbesondere durch Pläne zur Nutzung tiefliegender Grundwasserleiter zur Geothermianwendung bestehen. Auch für Salzformationen können sich z. B. Ziel- oder Nutzungskonflikte aus deren Eigenschaft ergeben, als Zwischenlager für Kohlenwasserstoffe (Erdöl, Erdgas) zu wirken.

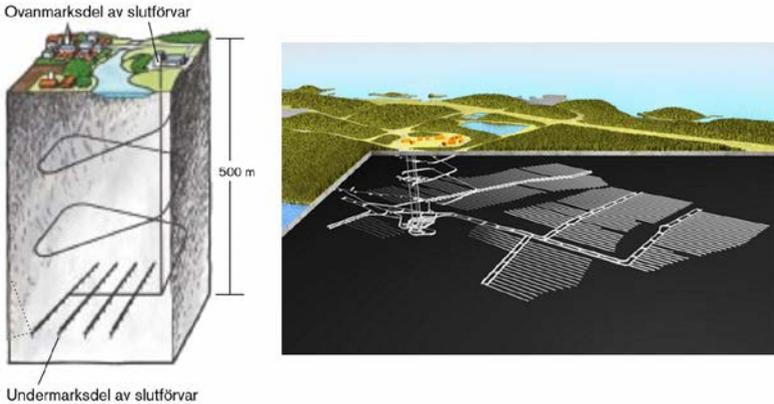
Die nachträgliche Nutzung eines Steinsalzvorkommens, das bereits als Endlager genutzt wurde, zur Gewinnung von Salz unter der Randbedingung, dass die Kenntnis über das Endlager verlustig ging, kann zu einer mindestens temporären Zerstörung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs führen. Gleiches gilt für mögliche Explorationen im Hinblick auf Kohlenwasserstoffe, die in Salzstrukturen eingeschlossen sein

können. Szenarien mit solchen unbeabsichtigten Eingriffen sind im Rahmen der Sicherheitsbewertung zu untersuchen. In (Beuth et al. 2012b) sind hierzu verschiedene Überlegungen zur Szenariengestaltung angeführt, aber nicht rechnerisch ausgeführt.

4.2.3 Zugang zum Endlagerbergwerk

Über die Zugänge zum Endlager erfolgen der Transport der Abfallgebinde, der Personen- und Materialtransport und der Abtransport des Haufwerks, das beim Auffahren der Einlagerungsbereiche anfällt. Außerdem dienen sie der Bewetterung (siehe Kapitel 4.2.4). Grundsätzlich sind für den Zugang zum Endlagerbergwerk drei Varianten üblich. In Kristallingesteinen mit begrenzter Kluftwasserverfügbarkeit spielen spiralförmig in die Tiefe führende Zuwege eine wesentliche Rolle. In Abbildung 4-1 sind die Zuwegungen im schwedischen KBS-3-Konzept und im finnischen Endlagerkonzept skizziert.

Abbildung 4-1: Zugänge zum Endlagerbergwerk in Kristallingesteinen



Quelle: Links: (SKB 2007), rechts: (Posiva 2015)

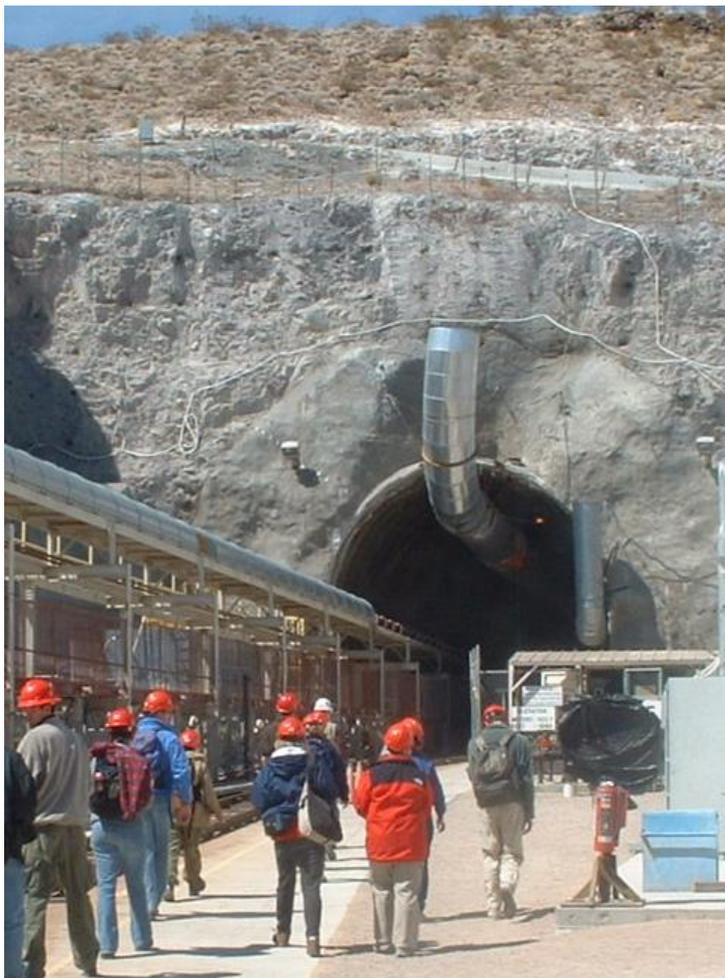
Alternativ sind auch Rampen mit eher gerader Streckenführung in Diskussion (zum Beispiel in der Schweiz und in Frankreich), die den Zugang einschließlich der obertägigen Anlagen in größerer Entfernung zu den untertägigen Anlagen ermöglichen.

Im deutschen Konzept wird bislang wegen der hohen Wasserführung im Deckgebirge die Schachtförderung bevorzugt, da sich Schächte gegenüber eindringenden Wässern leichter abdichten lassen als spiralförmige Zuwegungen.

Eine Besonderheit beim früher beantragten Endlager Yucca Mountain ist in Abbildung 4-2 gezeigt. Der Zugang zu diesem Endlager sollte ebenerdig über sanft ansteigende Rampen (Stollen) erfolgen.

Alle Zugänge zum Endlager sind nach Beendigung der Einlagerung dicht zu verschließen, da offene Schächte oder Rampen Einfallstore für Wässer darstellen würden (siehe Kapitel 4.6). Bei der Option mit verlängerter Offenhaltung zur Rückholung gilt dies nicht, hier müssen die Zuwegungen offengehalten, dauerhaft repariert (insb. gegen Wassereinbrüche abgedichtet) und sorgfältig gewartet werden, was eine zusätzliche Sicherheitsanforderung darstellt.

Abbildung 4-2: Ebenerdiger Zugang zum früher beantragten Endlager Yucca Mountain



Quelle: „Tour group entering North Portal of Yucca Mountain“, Image by Daniel Mayer taken on 2002-03-25 © 2002 and released under terms of the GNU FDL. – http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Tour_group_entering_North_Portal_of_Yucca_Mountain.jpg. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons

4.2.4 Bewetterung

Untertägige Bergwerke bedürfen grundsätzlich der Bewetterung. Da im Einlagerungsbetrieb nicht mit offenen radioaktiven Stoffen umgegangen wird, sind die radiologischen Anforderungen an die Bewetterung im Normalbetrieb relativ gering und vor allem auf störfallbedingte Vorsorge auszulegen (u.a. Monitoring). Bei Endlagern in Tonstein, insbesondere aber bei solchen im Kristallin, spielt je nach dem Urangehalt im Wirtsgestein die untertägige Konzentration an aus anstehendem Gestein stammenden Radonfolgeprodukten eine wichtige Rolle für die Bewetterung. Weitere Ausführungen zu den Anforderungen an die Bewetterung, u.a. im Hinblick auf die weitgehende Vermeidung der Ausbreitung von Schadstoffen einschließlich Rauchgasen bei Störungen und Störfällen finden sich in (ESK 2015).

Die Bewetterung erfolgt in der Regel über die ohnehin bestehenden einziehenden und ausziehenden Schächte. Erfolgt die Bewetterung über separate Schächte, dann sind diese nach Ende der Einlagerung und beim Verschluss auch separat zu verschließen. Da es sich um vergleichsweise bescheidene Schachtdurchmesser handelt, stellt der langzeitsichere Verschluss solcher Wetteröffnungen keine besondere Herausforderung dar.

4.2.5 Ausbau

In starren Wirtsgesteinen wie im Kristallin ist an sich kein Ausbau erforderlich, weil erstellte Öffnungen (Strecken, Schächte, Einlagerungshohlräume) auch ohne Verbau über Jahrzehnte stabil bleiben. Es kann aber erforderlich sein, Wassereinbrüche über größere und ergiebige Klüfte zu beherrschen. Je nach Ergiebigkeit kann das anfallende Wasser entweder ge-

sammelt und nach übertage gepumpt werden oder die Klüfte selbst müssen mit Injektionen (z. B. mit Zement unter Druck) verschlossen werden. Um diese Schwachstellen zu minimieren, sind geologische Störungen bei der Planung von Zuwegungen, Strecken und Einlagerungsfeldern sorgfältig zu erkunden und zu berücksichtigen.

In Wirtsgesteinen mit hoher Plastizität (z. B. gering konsolidierter Ton) ist schon in geringen Tiefen ein umfangreicher Ausbau von Schächten und Strecken erforderlich. In sehr gering konsolidiertem Ton ist der Ausbau bereits parallel mit der Auf-fahrung zu erstellen, da sich ohne Ausbau keine Hohlräume erstellen lassen. In Gesteinen mit geringerer Plastizität (Steinsalz, Tonstein) kann der Ausbau in größeren Tiefen erforderlich sein, wenn der Hohlraum unter hohem Gebirgsdruck für mehrere Jahrzehnte stabil bleiben soll. Bei konvergierenden Räumen kann ein Nachschneiden oder das Setzen von Ankern erforderlich werden, wenn die Verformungen zu groß werden und andernfalls sogar Löserfälle drohen würden.

4.2.6 Wasserhaltung

Eine Wasserhaltung während des Betriebs eines Bergwerks wird erforderlich, wenn über Klüfte zutretende Wässer abgeführt werden müssen. Dieser Effekt spielt insbesondere beim Betrieb von Endlagern in klüftigen Hartgesteinsformationen eine Rolle.

Bei anderen Wirtsgesteinen ergäbe sich die Erfordernis einer Wasserhaltung nur, wenn ein Störfall eintritt, der mit einem Wasserzutritt über den Schacht oder die Rampe verbunden ist (siehe z. B. für Tonstein (Larue et al. 2010, S. 26)). Für die Folgen eines derartigen Störfalls jenseits der Schachtausle-

gung wäre eine Wasserhaltung eine Vorsorgemaßnahme. Im Normalbetrieb wäre diese Maßnahme nicht erforderlich.

4.2.7 Fazit

Endlager sind Bergwerke mit völlig anderem Charakter als Bergwerke mit Gewinnungscharakter. Die oberste Priorität hat bei Endlagern der Erhalt der isolierenden Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sowie die vollständige und möglichst zügige Verheilung sämtlicher bergbaulicher und betrieblicher Zuwegungen mittels Verfüllung und Verschluss unter Ausnutzung von Konvergenz und Setzungen.

Eine verlängerte Offenhaltung des Bergwerks erzwingt Einschränkungen bei dieser Zielsetzung, da hierbei die Dauer der Betriebsfähigkeit des Bergwerks erheblich verlängert wird. Geschieht dies über Zeitdauern von 100 Jahren und länger, sind damit erhebliche Sicherheitseinschränkungen verbunden (Stabilität von Schächten, Strecken und Hohlräumen, Aufrechterhaltung der betrieblichen Sicherheit auf hohem Niveau, etc.).

4.3 Erkundung

Die Erkundung eines potenziellen Endlagerstandorts erfolgt in mehreren Ebenen. Zunächst ist zu fragen, ob die großräumige Umgebung für ein Endlager grundsätzlich geeignet ist. So sind in Deutschland Gebiete mit jüngerem Vulkanismus, Erdbebengebiete, Gebiete mit großräumigen Vertikalbewegungen oder aktiven Störungszonen für ein Endlager grundsätzlich ausgeschlossen (AkEnd 2002, Endlagerkommission 2016), um damit die Auswirkungen möglicher Vorgänge, die die Endlagersicherheit langfristig beeinträchtigen können, zu vermeiden oder zu begrenzen. Im Gegensatz dazu ist dies in ande-

ren Ländern nicht immer der Fall (z. B. Yucca Mountain in den USA in einer aktiven Vulkanismus- und Erdbebenzone). Diese Beurteilung kann in Deutschland aufgrund fortgeschrittener geologischer Kenntnis durchgeführt werden, ohne dass es expliziter Untersuchungen bedarf.

Die zweite Ebene ist die grundlegende Festlegung auf geeignetes Wirtsgestein. In Deutschland sind hierfür Steinsalz, Tonstein und kristallines Hartgestein gesetzt, siehe § 1 (StandAG 2017). Das Spektrum im internationalen Bereich ist noch geringfügig breiter angelegt, insbesondere in Ermangelung der drei genannten Wirtsgesteine. Wie in Kapitel 3.2.1.6 gezeigt, gibt es unter den drei genannten Wirtsgesteinstypen keine eindeutig zu bevorzugenden Gesteinsarten, also auch keine, die per se als ungeeignet herausfallen.

Eine Nicht-Eignung kann auf der dritten Ebene, der der einzelnen geologischen Formationen, durchaus gegeben sein. Die Erkundung eines potenziellen Endlagerstandorts kann durchaus zum Ergebnis kommen, dass dieser für die Endlagerung nicht geeignet ist oder solche gravierenden Nachteile aufweist, dass er in Konkurrenz mit geeigneteren Standorten ausfällt.

Ziel der Erkundung eines potenziellen Endlagerstandorts ist

- dessen Eignungsfeststellung,
- die Beurteilung der Isolationseigenschaften sowie der Gewährleistung ihres Erhalts über den Betrachtungszeitraum („Integrität“), und
- die Identifizierung geeigneter Bereiche zur Platzierung der Abfälle.

Erkundung ist in jedem Fall ein gestufter Vorgang. Die anfänglichen allgemeinen Kenntnisse über das Vorhandensein einer

potenziell geeigneten Gesteinsformation sind dabei noch eher als Vermutungen zu bezeichnen, wie sie sich aus allgemeinen geologischen Kenntnissen oder aus der Auswertung von Bohrerkundungen ergeben, die aufgrund anderer Vorhaben erstellt wurden (z. B. bei der Suche nach Bodenschätzen).

4.3.1 Übertägige Erkundung

Im engeren Sinne übertägig erkundet werden nur solche Formationen, die die Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen, z. B. (AkEnd 2002, Endlagerkommission 2016), erfüllen und zu dem Kreis der potenziell geeigneten Wirtsgesteine gehören.

Besteht die Gesteinsformation aus potenziell geeigneten Wirtsgesteinen, kann zunächst eine übertägige Erkundung durchgeführt werden. Im Rahmen der Erkundung des Salzstockes Gorleben kamen folgende übertägigen Erkundungsmethoden zur Anwendung (Brasser 2008):

- Kartierungen (geologisch, photogeologisch, bodenkundlich, hydrochemisch)
- Hydrologische Untersuchungen
- Geophysikalische Untersuchungen (seismische, gravimetrische, geothermische geoelektrische Messungen, elektromagnetische und geophysikalische Bohrlochmessungen)
- Bohrungen (Salzstockerkundung und Salzspiegelbohrungen, hydrogeologische Aufschlussbohrungen und Kernbohrungen, Grundwasser-Messstellen und Brunnen für Pumpversuche, Schachtvorbohrungen)
- Hydraulische Tests und Pumpversuche.

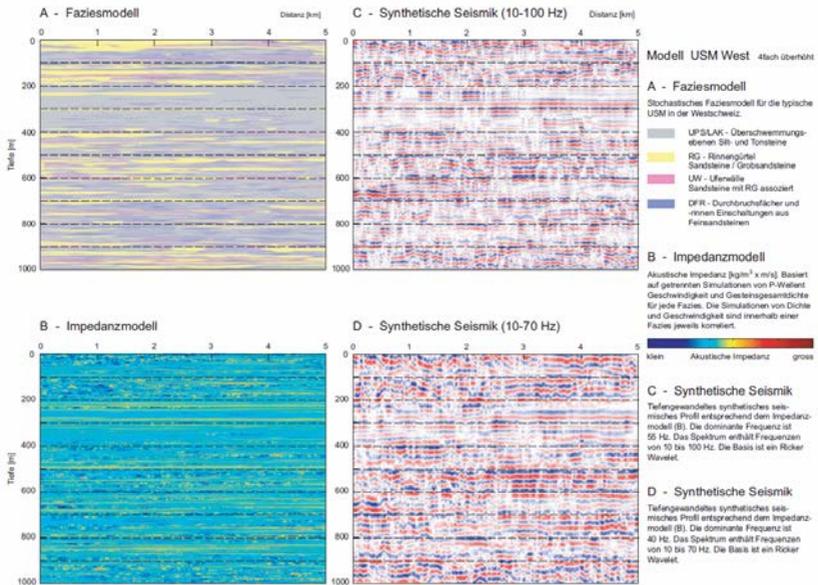
(Bollingerfehr et al. 2011) nennen außerdem Laserscan-Befliegungen, Auswertung von Luftbildaufnahmen bzw. Fernerkundungsdaten, aerogeophysikalische Messungen sowie geodätische Präzisionsnivelements und/oder Satelliten- bzw. Flugzeug-gestützte Messungen sowie geochemische Untersuchungen der Gesteine und Grundwässer und setzen diese Methoden in Relation zu allgemeinen sowie Wirtsgesteins-spezifischen Erkundungszielen.

Die seismische Untersuchung wird im Folgenden etwas näher beschrieben. Dabei werden an der Tagesoberfläche Erschütterungen ausgelöst und die Echos mit Geophonen auf verschiedenen Frequenzen ausgewertet. Die Echos spiegeln u.a. unterschiedliche Gesteinsdichten wider, die Laufzeiten des Echos verschiedene Tiefen.

Aus dem Frequenzspektrum der Echos (meist 10 bis 100 Hz) und deren Laufzeiten kann ein räumliches Bild der Formation gewonnen werden. In Abbildung 4-3 sind solche Formationen mit wechselnder Gesteinszusammensetzung simuliert (Bildteil A, mit Erläuterungen zu den Formationen auf der rechten Bildseite) und die sich ergebenden Antwortspektren dargestellt. Man erkennt, dass und wie sich die unterschiedlichen Gesteinsarten im Antwortspektrum abbilden.

Natürlich ergibt sich aus einer solchen Untersuchung noch kein detailliertes Bild einer Gesteinsformation, da die Auflösung beschränkt ist.

Abbildung 4-3: Modell für Echos bei einer seismischen Erkundung



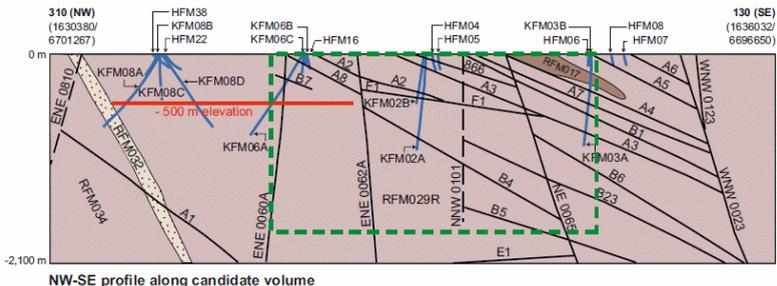
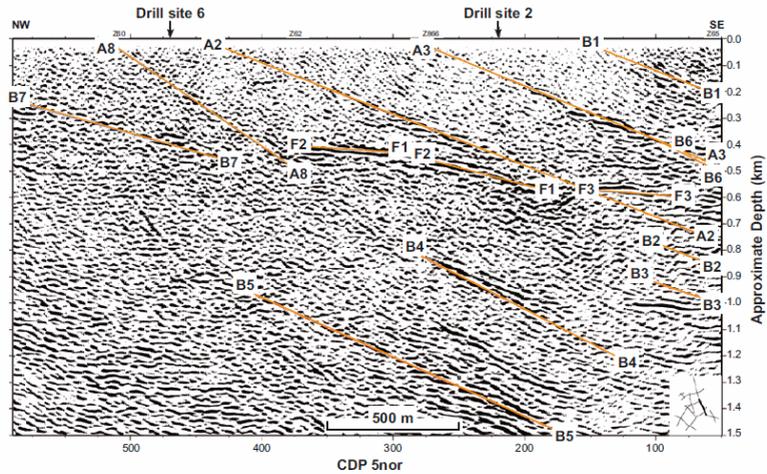
Quelle: aus (NAGRA 2005)

Eine wesentliche Ergänzung stellt die Einbeziehung der Erkenntnisse aus obertägig niedergebrachten Bohrungen dar. Mit den Bohrkernen solcher Bohrungen lassen sich die seismischen Profile eichen, Störungszonen erkennen und den Signalen zuordnen. In Abbildung 4-4 ist ein solches seismisches Profil (im oberen Teil des Bildes) mit zwei Bohrungen („Drill Site 6“ und „Drill Site 2“) zu einem Profil kombiniert. Man erkennt die Vielzahl an geologischen Störungen im Endlager-nahbereich (grün umrandeter Bereich) und die Zuordnung der

Störungen im seismischen Response-Spektrum zum Bohrprofil (Kennzeichnung mit Buchstabe/Ziffer).

Aus der obertägigen Erkundung mittels Seismik in Kombination mit Einzelbohrungen lässt sich folglich bereits eine Vielzahl an Informationen über den Untergrund gewinnen, die zu einer Vorentscheidung über die Eignung des Standortes herangezogen werden können. Mit dieser Stufe der Erkenntniserweiterung lässt sich zwar eine Ausschlussaussage, aber noch keine endgültige Eignungsaussage treffen.

Abbildung 4-4: Ergänzung seismischer Profile mit Bohrerkundungen



Quelle: aus (SKB 2011)

4.3.2 Untertägige Erkundung

Eine größere Detailtiefe der Erkenntnis wird mit der untertägigen Erkundung erreicht. Sie erschließt u.a. folgende Kenntnisse:

- der detaillierte Aufbau der Formation mit einer räumlichen Auflösung von ca. 10 m,
- Grad und Verteilung von Inhomogenitäten, Gas- oder Lösungseinschlüssen, Störungen und Schichtungen der Formation,
- Durchlässigkeiten, Sorptionseigenschaften, Konvergenz- und Setzungseigenschaften.

Darstellungen der eingesetzten, auch der untertägigen, Erkundungsmethoden und ihrer Auflösung in Relation zu den allgemeinen und wirtsgesteins-spezifischen Zielsetzungen finden sich in (Brasser 2008) und (Bollingerfehr et al. 2011).

Die untertägige Erkundung endet mit einer Eignungsfeststellung.

4.4 Errichtung

Ist die Eignungsfeststellung für den Standort getroffen, werden die Antragsunterlagen erstellt und zur Zustimmung der zuständigen Behörde eingereicht. Erteilt diese die Zustimmung, kann das Endlager errichtet werden.

Bei der Errichtung sind folgende Tätigkeiten auszuführen:

- Ausbau der Schachtanlage von Erkundungsbetrieb zu Förderbetrieb (i. d. R. Ausweitung),
- Erstellung der Strecken vom Schacht zu den Einlagebereichen, im einschlusswirksamen Gebirgsbereich und im Bereich späterer Verschlüsse unter besonderer Sorgfalt (Gebirgsschonung, Minimierung der Störungszonen, etc.),

- Auffahrung der Einlagerungsbereiche (soweit es der sequentielle Einlagerungsablauf erfordert), und schließlich
- Auffahrung der ersten Einlagerungshohlräume bzw. Abteufen der Einlagerungsbohrungen.

Das Endlager ist damit betriebsbereit.

4.5 Betrieb

Anders als bei der Erstellung von oberirdischen Bauten erfolgt die Auffahrung einzelner Einlagerungskammern, Einlagerungsbohrlöcher und ihrer Zugänge erst sukzessive im Laufe des Betriebs, wie es in Abbildung 2-3 idealtypisch skizziert wird. Die Gründe hierfür sind weitgehend praktischer Natur. Erstellte Hohlräume und Strecken unterliegen Alterungsvorgängen und müssten bei konvergierendem Wirtsgestein, so sie denn zu einem frühen Zeitpunkt erstellt wurden, bereits nach einigen Jahren nachgeschnitten werden. Die Offenhaltung großer Hohlräume über lange Zeiträume, mit Bewetterung u.v.a.m., ist ebenfalls nicht notwendig, wenn der Erstellungsvorgang in Abstimmung mit dem Einlagerungsfortschritt gestaltet wird. Im Hinblick auf den Strahlenschutz entspricht eine zeitnahe Verfüllung von Einlagerungsbereichen dem Minimierungsgebot, da die Strahlung, da der Versatz zur Abschirmung der Strahlung beiträgt, siehe z. B. (Ziegenhagen/Schmidt 2008, S. 32). Außerdem ist aus versetzten Bereichen während des normalen Betriebs keine Kontaminationsfreisetzung zu unterstellen, so dass entsprechende Überwachungsmaßnahmen nicht erforderlich sind. Das Nebeneinander von bergtechnischer Strecken- und Hohlraumerstellung, Behältereinlagerungsbetrieb und Verfüllungstätigkeiten ist bei entsprechender Ablaufplanung möglich.

Im alltäglichen Betrieb des Endlagers sind daher folgende Abläufe charakteristisch:

1. **Vorbereitung Einlagerungsbereich:** Dies umfasst die Erstellung von Zugangsstrecken und Einlagerungskammern oder –bohrlöchern.
2. **Gebindeempfang:** Die Abfallgebände werden im Endlager angenommen und einer Annahmeprüfung unterzogen (z. B. Behälteridentifizierung, Gamm- und Neutronen-Dosisleistung, Oberflächenkontamination, Dichtheitsprüfung). Sie werden dann bis zum Abtransport nach unter Tage in einem Pufferbereich abgestellt.
3. **Transport nach unter Tage:** Ist der Einlagerungsbereich für einen Behälter abschließend vorbereitet, erfolgt der Transport des Behälters nach unter Tage. Nach Verladen auf ein Transportfahrzeug wird das Gebinde über den Schachtaufzug bzw. über die Zufahrtsrampe in den Lagerbereich befördert.
4. **Einlagerung:** Das Gebinde wird im Einlagerungsbereich entladen und entweder in einer Einlagerungsstrecke platziert oder eingestapelt, in ein horizontales oder vertikales Bohrloch eingebracht oder in Kammern abgelegt. In der Regel wird damit auch das Puffermaterial eingebracht.
5. **Verfüllung:** Fertig bestückte Einlagerungshohlräume oder Kammern einschließlich deren Zugangsstrecken werden verfüllt (bei der Option mit verlängerter Rückholbarkeit kann die diesbezügliche Strategie abweichen). In Steinsalz kommen hierbei je nach den räumlichen Bedingungen

gen Blasversatz¹⁷, Schleuderversatz¹⁸ oder Schüttversatz¹⁹ infrage (Ziegenhagen / Schmidt 2008). In anderen Wirtsgesteinen kommen vor allem Ton oder Bentonit zum Einsatz. Bestehen keine Ansprüche an den Wasserabschluss oder soll die Obergrenze des Gasdruckes (z. B. bei Gasentwicklung durch Korrosionsvorgänge oder mikrobiologische Aktivitäten) kontrolliert und gesteuert werden, kommen auch Splitt, Kies oder Sand für Verfüllungen infrage.

Entsprechende Planungen für den detaillierten Einlagerungsablauf und die erforderlich Transport- und Handhabungstools liegen in den meisten Ländern für das jeweilige geplante Endlagerprojekt vor (siehe (Ziegenhagen / Schmidt 2008)), werden jedoch regelmäßig dem geänderten Kenntnisstand und den detaillierten Verhältnissen der geologischen Formation angepasst.

4.6 Verschluss, Betriebsabschluss und Nachbetrieb

Der Endlagerbetrieb schließt mit dem Verschluss der Strecken und schließlich auch der Schächte ab. Für die Option „Endlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit“ ist ein Verschluss ohne weitere Verzögerung direkt nach dem Ende des Einlagerungsbetriebs vorgesehen. Mit dem vollständigen Ver-

¹⁷ Blasversatz: Salzgrus wird mit Druckluft aufgewirbelt, über Rohrleitungen an die Einsatzstelle transportiert und mit der ausströmenden Druckluft bis zu einigen 10 m Entfernung geblasen.

¹⁸ Schleuderversatz: Salzgrus wird mit Schaufeln aufgenommen und in Wurfweite abgelagert, gegebenenfalls gefolgt von einer Verdichtung.

¹⁹ Schüttversatz: Salzgrus wird mit Schaufeln von Radladern aufgenommen und am Versatzort abgeladen, gegebenenfalls gefolgt von einer Verdichtung.

schluss der Anlage und ggf. dem Rückbau der Anlagen über Tage beginnt der Nachbetrieb des Endlagers.

Verschlüsse haben in allen Wirtsgesteinen die Funktion, den Wasserzufluss zu den Lagerbereichen zu blockieren oder zumindest unter demjenigen Niveau zu halten, der über das Wirtsgestein ohnehin zufließt (bei Wirtsgesteinen ohne vollständige Barriere gegen Grundwasserzuflüsse). Der Maßstab für die Anforderungen an Verschlüsse leitet sich daher im Prinzip aus der Qualität des Wirtsgesteins selbst ab: der Verschluss sollte mindestens so hochwertig sein, dass sich durch ihn die Einschussqualität des Endlagersystems nicht verschlechtert.

Im Gesamtsystem Endlager kommt den Verschlüssen ein ähnliches Gewicht wie der Wirtsgesteins- oder der Standortauswahl zu. Über einen längeren Zeitraum stellen die Verschlüsse unweigerlich diejenige Schwachstelle im Gesamtsystem dar, bei deren Versagen die gesamte Langzeitsicherheit der Anlage infrage zu stellen wäre. Allerdings übernehmen die Verschlüsse für wesentlich kürzere Zeiträume die zentrale Einschussaufgabe, so dass eine Auslegung nur für einige Jahrzehnte oder wenige 100 Jahre erforderlich ist. Anschließend wird die Einschussfunktion vom kompaktierenden (Salzgrus im Wirtsgestein Steinsalz) bzw. quellenden (Bentonit im Wirtsgestein Tonstein) Versatz übernommen. Entsprechende Materialerprobungen sind daher weniger anspruchsvoll als dies bei einer Auslegung für 1 Mio. Jahre erforderlich wäre.

Um den Maßstab, dass der Verschluss die Einschussqualität nicht verschlechtern darf, bei sehr dichten Wirtsgesteinen wie Steinsalz und Tonstein zu erreichen, müssen verschiedenste Mechanismen und Aspekte beachtet werden:

- Die Platzierung von Verschlüssen muss ein Umfließen des Bauwerks insbesondere durch die Störungszone, die durch das Auffahren der Strecke oder durch das Setzen der Schachtröhre entstanden ist („excavation disturbed or damaged zone“ = EDZ), durch anstehende Lösungen ausschließen. Wählt man für einen Verschluss einen Wirtsgesteinsbereich aus, der sich bei Einwirkung von Lösungen (entweder salzgesättigt oder nur teilweise mineralisiert) selbst auflöst, kann die Qualität des errichteten Bauwerks diesen Mangel nicht ausgleichen.
- Verschlussbauwerke müssen hohen Drücken standhalten (z. B. weil bei konvergierenden Wirtsgesteinen schon nach wenigen Jahren der Gebirgsdruck auf das Bauwerk einwirkt). Sie dürfen auch unter entsprechender Verformung nicht reißen.
- Das Sperrbauwerk darf durch Materialalterung, Entwässerung (Verdunstung, Diffusion, Hygroskopie, etc.), bei Lösungsangriff und durch Schrumpfung erst dann seine Wirksamkeit verlieren, wenn es für die Rückhalteaufgabe nicht mehr benötigt wird (z. B. weil durch die Kombination aus Versatzmaterial und Konvergenz des Wirtsgesteins die Strecke verschlossen ist). Es muss daher, abhängig von der Entwicklung des Gesamtsystems, eine Mindeststandzeit aufweisen.
- Schrumpfung, die bereits während des Baus vorliegt (z. B. verursacht durch die Erwärmung von Zement/Beton durch die Zement-Wasser-Reaktion und die Abkühlung nach Abklingen der Reaktion, verbunden mit Schrumpfungsrissbildung), darf nicht dazu führen, dass am Übergang

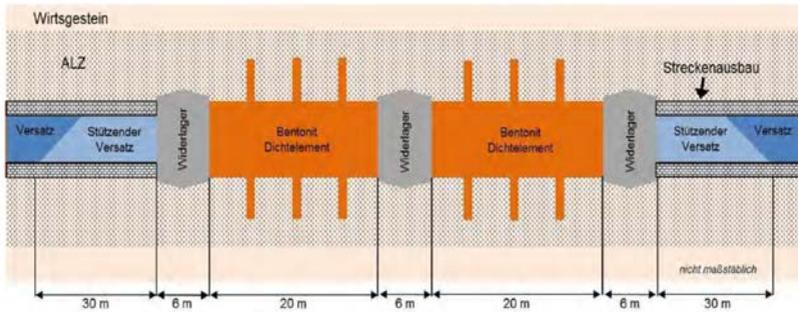
zwischen Bauwerk und Wirtsgestein thermische Spannungsrisse die Durchlässigkeit erhöhen.

- Ebenfalls im Übergangsbereich zwischen Bauwerk und anstehendem Wirtsgestein sollte die Störungszone (EDZ) sich schon während der Errichtung oder kurz danach möglichst vollständig verschließen. Das setzt voraus, dass das Bauwerk selbst das umgebende Wirtsgestein möglichst unter Druck setzt (z. B. durch langsames Quellen).
- Die Materialien, aus denen das Bauwerk besteht, müssen unter den zu erwartenden Bedingungen sorgfältig geprüft werden. Die so definierte Materialqualität ist bezüglich der Zusammensetzung und Materialeigenschaften bei der Errichtung des Bauwerks einzuhalten und nachzuweisen.

Materialauswahl, Auslegung, Errichtung und Qualitätssicherung von Verschlussbauwerken ist daher sorgfältig und unter umfassender Kenntnis der Materialeigenschaften vorzunehmen. In Deutschland wurden die entsprechenden praktischen Erfahrungen mit Verschlussbauwerken in Steinsalz bei der Verschlussplanung für das Endlager Morsleben sowie theoretische Grundlagen in verschiedenen Forschungs- und Pilotprojekten zum Strecken- und Schachtverschluss entwickelt (z. B. (GRS 2016)).

In Tonstein sind solche Erfahrungen in Deutschland direkt nicht vorhanden, sie sind aber durch die Zusammenarbeit mit anderen Ländern (Schweiz, Frankreich) durchaus verfügbar. Darüber hinaus ist festzustellen, dass Verschlüsse im Bereich von Tonstein deutlich weniger potenzielle Materialunverträglichkeiten aufweisen als Salz, da Bentonit mit seiner Quellfähigkeit einen erheblichen Vorteil aufweist. In Abbildung 4-5 ist ein solcher Streckenverschluss im Tonstein dargestellt.

Abbildung 4-5: Beispielauslegung für einen Streckenverschluss in Tonstein



Quelle: (Lommerzheim et al. 2014)

In (Küppers 2008) ist dargelegt, ob und welche weiteren Überwachungsmaßnahmen während des Betriebs und nach Eintritt in die Nachbetriebsphase in Frage kommen. Die Überwachungsmaßnahmen haben für die Option „Endlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit“ in der Nachbetriebsphase beweisichernden Charakter, dienen also nicht dem Nachweis der Wirksamkeit (verifizierender Charakter), da dieser Nachweis bereits im Genehmigungsverfahren geführt wurde und eine nachträgliche Verifikation aus zwei wesentlichen Gründen nicht praktikabel ist:

- Jeder Zugang zu dem Lager selbst würde die sorgfältig hergestellten Einschlussbedingungen immer wieder kompromittieren. Daher kommen direkte Maßnahmen zur Überwachung nicht in Frage, da sie mit dem Schutzziel des zuverlässigen Langzeiteinschlusses unvereinbar sind, Da der sichere Einschluss selber die zentrale Schutzmaßnahme gegen Entwendung von Material darstellt,

würde jede Überwachungsmaßnahme, die den Einschluss stört, der eigenen Zielsetzung entgegenstehen.

- Die meisten Vorgänge in einem Endlager, wie die Behälterkorrosion, die Migration von Radionukliden, etc., können in Zeiträumen, für die eine Überwachung realisierbar ist, gar nicht beobachtet werden, da sie extrem langsam ablaufen. Es ist schon in Laborexperimenten kaum möglich, solche langsamen Abläufe zu beobachten, so dass in der Regel durch Variation von Randbedingungen (wie Temperaturen, Bestrahlungsintensitäten, etc.) Effekte beschleunigt werden (Zeitraffer-Funktion).

In das Endlager eingebrachte automatisch wirkende Sensoren, die ihre Messergebnisse über ein Sendesignal melden, sind denkbar. Sinnvolle Sensorik ist nur für einen eingeschränkten Parametersatz verfügbar (z. B. für Spannungs- oder Bewegungsmessungen). Allerdings sind die Möglichkeiten sehr eingeschränkt, diese zu testen. Eine Garantie für ihre korrekte Tätigkeit oder Reparaturen an solchen Systemen sind nicht möglich. Auch ist die zeitliche Dauer solcher Überwachungsmaßnahmen durch die eingeschränkten Möglichkeiten zur Energieversorgung derzeit auf einige Jahre begrenzt, so dass langsamer ablaufende Vorgänge nicht erfasst werden können.

Beweissicherungen haben einen anderen Charakter als Verifikationen. Sie sind exemplarisch und daher nicht abdeckend. Mit den ohne Eingriffe in das Isolationssystem möglichen Überwachungsmaßnahmen soll die Abwesenheit von Anzeichen für nicht erwartungsgemäßes Verhalten bestätigt werden. Mögliche Überwachungsmaßnahmen sind z. B. Beobachtungen an der Erdoberfläche zu Setzungsumfang und Set-

zungsablauf oder die Überwachung auf geoseismische Ereignisse.

5 Langzeitsicherheitsanalyse (LZSA) und Langzeitsicherheitsnachweis (LZSN)

Endlager können unter den heute geltenden rechtlichen Bedingungen nur dann errichtet, betrieben und verschlossen werden, wenn ihre Sicherheit entsprechend den Genehmigungsanforderungen nachgewiesen ist. Das Besondere an diesem Nachweis ist der zeitliche Aspekt: während andere kerntechnische Anlagen für eine geplante Betriebsdauer von wenigen Jahrzehnten ausgelegt, geplant, auf Sicherheit geprüft und zugelassen werden, ist nur die Betriebsdauer des Endlagers mit diesem Zeithorizont vergleichbar. Der Nachbetrieb ist hingegen unbefristet, gleichzeitig ist die Sicherheit gerade während des Nachbetriebs die zentrale Zielsetzung der Endlagerung. Dieser Umstand stellt ein Spannungsfeld dar, das dem Konzept der geologischen Endlagerung immanent ist und in den Methoden zur Analyse und zum Nachweis der Sicherheit sorgfältig reflektiert werden muss.

Die Langzeitsicherheitsanalyse, ein Bestandteil des LZSN, vgl. z. B. (Mönig et al. 2012), befasst sich u.a. mit den radiologischen Folgen der Endlagerung. Für jede Folgenbetrachtung für ein Endlager spielt es in Deutschland gemäß den Sicherheitsanforderungen für Endlager (BMU 2010) eine zentrale Rolle, ob es a) einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich gibt und, falls ja b) ob der einschlusswirksame Gebirgsbereich mit seinen relevanten Eigenschaften über den gesamten fraglichen Zeitraum erhalten bleibt oder nicht.

5.1 Aufgabe der LZSA bzw. des LZSN

Ein Hauptziel des Langzeitsicherheitsnachweises ist es letztlich zu zeigen, dass

- die abgelagerten radioaktiven Stoffe vollständig und dauerhaft eingeschlossen bleiben, oder
- allenfalls in solchen geringen Mengen in die Umwelt gelangen können, dass daraus auch für künftige Generationen keine Schäden resultieren.

Die erstgenannte Variante bezeichnet man als „Vollständigen Einschluss“, die zweite Variante als „Sicheren Einschluss“ (Fischer-Appelt et al. 2013).

Wie in Kapitel 3.2.3 gezeigt, wirken diverse Barrieren nur auf eine Teilmenge der im abgebrannten Brennstoff enthaltenen Stoffe. Während für diese Stoffe der vollständige Einschluss gegeben ist, können mobilere Anteile u.U. teilweise den Einschluss verlassen. Der Terminus „Sicherer Einschluss“ ist in diesem Fall für die Gesamtmenge des endgelagerten Abfalls anzuwenden, auch wenn es sich für den allergrößten Teil des Abfalls eigentlich um einen vollständigen Einschluss handelt.

Gegenstand von Langzeitsicherheitsanalyse und –nachweis ist die Sicherheit in der Nachbetriebsphase von Endlagern. In den Dokumenten internationaler Organisationen (IAEA 2012, OECD/NEA 2013) werden die Bezeichnungen “Safety Assessment” (gelegentlich auch, passend zum deutschen Begriff, „Safety Analysis“) und “Safety Case” verwendet. Dabei bezeichnet „Safety Assessment“ die systematische Einschätzung und Bewertung der potenziellen Gefährdungen durch das Endlager, auf deren Basis eine Sicherheitsaussage abgeleitet wird. Ausgehend von einer umfassenden Beschreibung des Sicherheitskonzepts sowie des Anfangszustands und der er-

warteten Entwicklung des Systems (meist zum Zeitpunkt des Endlagerverschlusses) werden systematisch so genannte Szenarien, das heißt Beschreibungen potenzieller Entwicklungen (Entwicklungsmöglichkeiten) des Systems abgeleitet und diese im Hinblick auf ihre Eintrittswahrscheinlichkeit und auf mögliche Konsequenzen für Mensch und Umwelt, insbesondere in Zusammenhang mit möglichen Freisetzungen radio- und chemotoxischer Stoffe, analysiert und bewertet. Wesentliche Hilfsmittel sind hierbei numerische Modellrechnungen, mit denen u. a. so genannte Indikatoren (z. B. potenzielle effektive jährliche Dosis, jährliches Risiko) als Grundlage für die Bewertung berechnet werden. Je nach Regelwerk werden solche Indikatoren auch zum Vergleich mit Grenz- oder Richtwerten herangezogen. Zu jedem „Safety Assessment“ gehören eine Zusammenstellung von verbleibenden Ungewissheiten (z. B. zu Szenarien, Modellen und verwendeten Parametern) und Aussagen zu deren Sicherheitsrelevanz.

Mit dem „Safety Assessment“ werden die Isolationseigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs betrachtet und analysiert, mit dem Nachweis wird gezeigt, dass mit dem ausgewählten Standort, der Wirtsformation und dem ausgewählten Gebirgsbereich in Verbindung mit dem technischen Endlagerkonzept die Schutzziele eingehalten sind.

Die systematische Einschätzung und Bewertung („Safety Assessment“) bildet einen zentralen Bestandteil des umfassenderen Berichtswerks „Safety Case“, der außerdem Dokumente zu Ergebnissen der Standorterkundung, zur ingenieurtechnischen Endlagerplanung und –auslegung und Qualitätssicherung sowie zu naturwissenschaftlich-technischen Grundlagen umfasst: „The safety case is the collection of scientific, technical, administrative and managerial arguments and evidence in support of the safety of a disposal facility,

covering the suitability of the site and the design, construction and operation of the facility, the assessment of radiation risks and assurance of the adequacy and quality of all of the safety related work associated with the disposal facility.“ (IAEA 2012)

Der “Safety Case” wird vom Vorhabenträger (Antragsteller, „implementer“) als wesentliche Grundlage für Entscheidungen im Rahmen der schrittweisen, über Jahrzehnte andauernden Entwicklung von Endlagerprojekten erstellt. Solche Entscheidungen können zum Beispiel die Grundlagen des Sicherheitskonzepts, die Standortauswahl, den Beginn von Erkundungsarbeiten, die Errichtung eines Endlagers, den Beginn der Einlagerung oder den Verschluss betreffen. Diese Entscheidungen werden je nach Stand und rechtlicher Ausgestaltung des Prozesses intern vom Vorhabenträger selbst oder aber von Behörden im Rahmen von Genehmigungs- oder Gesetzgebungsverfahren getroffen. Mit dem Fortschritt des Endlagerprojekts entwickelt sich auch der Safety Case weiter. Er begründet die Aussage des Vorhabenträgers, dass das Projekt in der vorgeschlagenen Weise fortgesetzt werden sollte, da die Perspektive zur Errichtung eines sicheren Endlagers in der vorgeschlagenen Weise besteht. Es ist darzulegen, dass diese Perspektive auch angesichts der bestehenden Ungewissheiten (s. oben) besteht und welche Strategie zum Umgang mit sicherheitsrelevanten Ungewissheiten zum Beispiel im Hinblick auf Standorterkundung, Forschung, Entwicklung und Demonstration verfolgt wird. In einer Genehmigungssituation müssen alle sicherheitsrelevanten Ungewissheiten in befriedigender Weise aufgelöst sein.

Aufgrund unterschiedlicher Regelwerke und Traditionen erfolgt die Ausgestaltung von „Safety Assessment“ und „Safety Case“ in den verschiedenen Ländern in unterschiedlicher Weise. Nicht in jedem Fall ist eine klare Trennlinie zwischen beiden zu

erkennen; auch die Terminologie ist unterschiedlich: „*The concept of developing a safety case for disposal facilities, as outlined in this publication, is used in many States. The terminology used is different, though, in some States, for example, in the United States of America the term ‘total system performance analysis’ is used (together with the regulations relevant to the specific disposal method), covering all aspects of the safety case as described in this Safety Guide. In France, the term ‘dossier’ is used to describe the safety case. In Germany and Switzerland, the term ‘Sicherheitsnachweis’ is used. In Spain, the term ‘estudio de seguridad’ is used to describe the safety case.*“ (IAEA 2012).

Ergänzend ist hinzuzufügen, dass der deutsche Begriff “Sicherheitsnachweis” insofern in die Irre führt, als der “Safety Case” wie oben dargelegt nicht nur in Nachweis- und Genehmigungssituationen erstellt wird. Es kann sich auch um eine rein akademische Übung handeln, deren Ziel es ist, das verfügbare Handwerkszeug für die Untersuchung von Teilaspekten der Sicherheit zu erproben. Eine häufig anzutreffende Motivation für eine solche Analyse ergibt sich aus der Natur der sukzessiven Erkundung, die sich über längere Zeiträume erstreckt. Bei Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager geht es daher oft darum, den erreichten Kenntnisstand zu bewerten, ohne den Anspruch eine abschließenden Aussage zu treffen. Liegt der Kenntnisstand beim aktuellen Stand der Erkundung noch nicht vor, wird stattdessen mit vernünftigen, u.U. auch mit konservativen Annahmen gearbeitet. Bei solchen Analysen werden daher die Ergebnisse noch einen gewissen Spielraum enthalten oder Hinweise auf noch zu erledigende Aufgaben geben. Es kann sich aber auch das Ergebnis zeigen, dass eine weitere detaillierte Erkundung eines Teilbereiches nicht

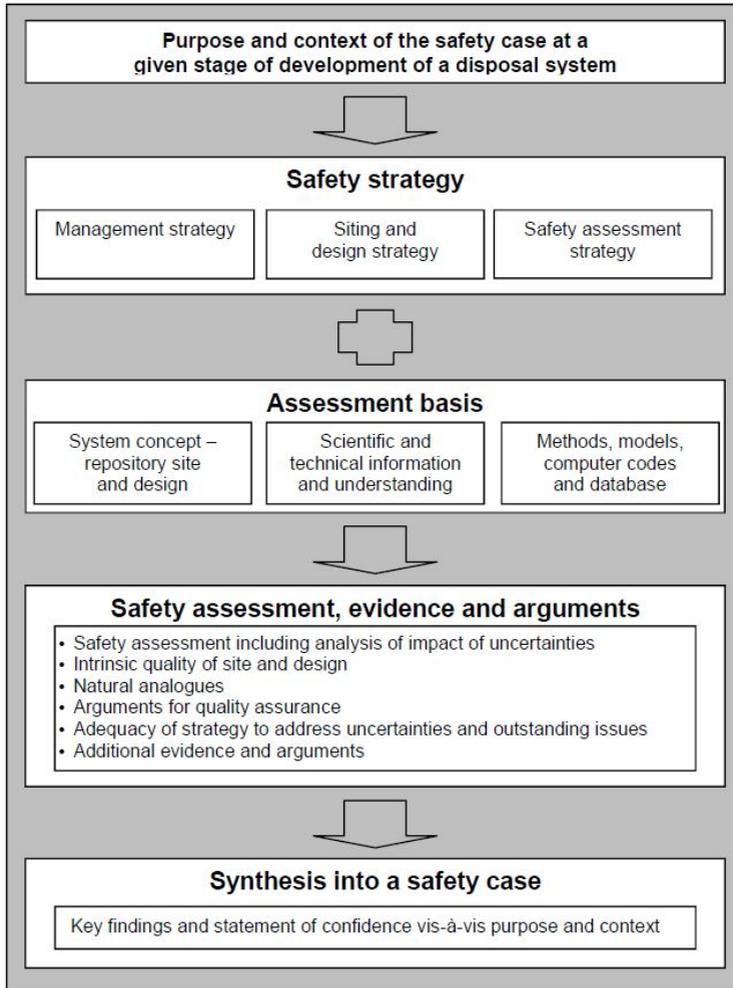
mehr erforderlich ist, da der Aspekt nicht zur Sicherheitsaus-sage beitragen wird.

In (OECD/NEA 2013) sind die Elemente eines Safety Case entsprechend der Darstellung in Abbildung 5-1 zusammengefasst.

Zum Vorgehen sind im nachfolgenden Kapitel weitere Angaben gemacht. Ein Schwerpunkt wird dabei auf den quantitativen Teil der Analysen gelegt, der in der NEA Systematik im Wesentlichen im Baustein „Safety Assessment“ subsumiert ist.

Wie in vorausgegangenen Kapiteln an verschiedenen Stellen gezeigt (z. B. in Abbildung 3-2 auf S. 64, in Abbildung 3-4 auf S. 67, in Abbildung 3-10 auf S. 97), quantifizieren Langzeitsicherheitsanalysen u. a. den Austrag an Radionukliden aus dem Einschlussystem als Dosisbetrag, der mittels bekannter Risikofaktoren auch linear in ein Risiko umgerechnet werden könnte. Diese Quantifizierung der Dosis ist letztlich als ein Indikator für die Einschlusswirksamkeit des Systems anzusehen. Auf die mit diesen Dosisangaben verbundenen Unsicherheiten bzw. ihre Konservativität wird im Folgenden noch näher eingegangen.

Abbildung 5-1: Überblick über das Zusammenspiel der verschiedenen Elemente eines Safety Case



Quelle: (OECD/NEA 2013)

5.2 Prognose über lange Zeiträume

5.2.1 Rolle der Prognosesicherheit

Um die Einschlussaufgaben zu erfüllen, muss der Einschlussbereich des Endlagers (Müller-Lyda et al. 2008) in seiner Integrität, bestehend aus seiner physischen Ausdehnung und seinen wichtigsten Einschlusseigenschaften, über den gesamten Nachweiszeitraum erhalten bleiben. Jenseits des Nachweiszeitraums sollten z. B. keine Hinweise auf eine Freilegung der Abfälle vorliegen.

Damit der Einschluss nicht unbeabsichtigt aufgehoben wird, muss ferner die Wahrscheinlichkeit für menschliche Einwirkungen niedrig sein. So kann z. B. durch Platzierung in größerer Tiefe der ungeplante Zugang zum Abfall erschwert sein. Im Endlagernahbereich sollten sich keine potenziell für eine spätere Gewinnung interessanten Rohstoffe befinden.

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss den Transport radioaktiver Stoffe unterbinden oder verringern und verzögern. Das bedeutet, dass er keine Durchlässigkeit für den weit überwiegenden Teil der endgelagerten radioaktiven Stoffe aufweisen darf. Sich ausbreitende geringe mobile Stoffanteile müssen einer erheblichen Verzögerung unterliegen, weil sich sonst der Nachweis über die Schadlosigkeit der Endlagerung nicht führen lässt.

Letztlich muss über den Betrachtungszeitraum hinweg nachgewiesen sein, dass der Umfang ausgetragener Stoffe nur zu sehr niedrigen radioaktiven Dosisbeiträgen in der belebten Umwelt führen kann. Damit soll erreicht werden, dass kein künftiges Individuum mit einer nennenswert höheren Strahlen-

exposition und Schadenswahrscheinlichkeit beaufschlagt wird, als sie heute akzeptiert sind.

Geologische Bereiche, über die sich mit ausreichend zuverlässigen wissenschaftlichen Methoden der Nachweis der Integrität über den Nachweiszeitraum führen lässt, sind potenziell für die Endlagerung geeignet. Hingegen sind geologische Bereiche, die keine ausreichend zuverlässige Prognose erlauben, weil ihre künftige Entwicklung mit anerkannten wissenschaftlichen Methoden nicht belastbar vorhersagbar ist und belegt werden kann, für die Endlagerung per se ungeeignet (siehe Kapitel „Ausschlusskriterien“ in (AkEnd 2002)).

Als potenzielle Effekte, die die Prognostizierbarkeit einschränken können, nennt (AkEnd 2002):

- Erosion der geologischen Formationen mit Freilegung des Endlagers
- Reduzierung der geologischen Barriere
- Veränderung der Grundwasserverhältnisse
- Schaffung von Wegsamkeiten durch Störungen und Klüfte
- Gas-/Lösungszutritte ins Endlager
- Magmenzutritt ins Endlager
- Überdeckung durch Oberflächengewässer

Alle diese Effekte haben das Potential, die Isolation der Abfälle und insgesamt die Vorhersagbarkeit des Einschlosssystems infrage zu stellen.

Die Langzeitsicherheitsanalyse dient der Untersuchung des zukünftigen Verhaltens eines verschlossenen Endlagers innerhalb des Nachweisezeitraums (vgl. Fein et al. 2008, S. 5). Eine zentrale Aufgabe ist dabei die Analyse der Langzeitent-

wicklung der geologischen Barriere. In diese Analyse gehen eine Vielzahl unterschiedlicher Aspekte, am Standort gewonnene Daten und Untersuchungsergebnisse ein. So ist z. B. die Ermittlung der dynamischen Standorteigenschaften, also z. B. der Hebungs- und Senkungsbewegungen oder bei Salzstöcken die Bestimmung der Aufstiegs- und Ablaugungsraten, eine umfangreiche Untersuchung, bei der geologische Untersuchungsergebnisse mit einem grundlegenden wissenschaftlichen Verständnis für die am Standort ablaufenden relevanten Mechanismen zu kombinieren sind. Ergebnisse solcher Analysen sind dann eindeutig und entsprechend verlässlich, wenn gewonnene Daten und das Verständnis der Mechanismen in Einklang zu bringen sind und keine Widersprüche mehr auftreten.

Auf dieser verlässlichen Basis ist es dann möglich, Prognosen über die künftige Entwicklung anzustellen. Mit den verfügbaren geologischen Methoden ist es z. B. möglich, die Entstehung von Störungen aus lange zurückliegenden seismischen Ereignissen zu datieren, sehr niedrige Diffusionsraten aus Konzentrationsprofilen bei realen Tonschichten abzusichern oder aus der geologischen Vergangenheit eines größeren Gebiets auf dessen künftige Entwicklung zu schließen.

5.2.2 Umgang mit Prognoseunsicherheiten

Bei solchen Prognosen ergeben sich praktisch immer Gültigkeitsgrenzen. So ist eine Vorhersage je nach den bestimmenden geologischen Mechanismen nur für einen Maximalzeitraum zuverlässig, weil für diesen Zeitraum die Mechanismen eindeutig identifiziert und verstanden sind. Jenseits dieses Zeitraums können andere, weniger gut verstandene Mechanismen eine größere Rolle spielen, so dass die Unsicherheit in der Prognose zunimmt. Man kann die Analyse unter Zugrun-

delegung vernünftiger Annahmen auch noch jenseits dieser Zeit fortführen, erhält dann aber nur Aussagen geringerer Güte und Zuverlässigkeit. Bei anderen Größen kann eine Prognose auf Basis des vorliegenden gesicherten Verständnisses der ablaufenden geologischen Prozesse gar nicht zuverlässig getroffen werden. In den meisten Fällen können dann aber begründete Aussagen über Maximal- oder Minimalgrößen gemacht werden und so eine Bandbreite angegeben werden. Hat die aus Grenzbetrachtungen so ermittelte Bandbreite keinen bestimmenden Einfluss auf die Gesamtaussage, ist der Kenntnisstand akzeptabel und eine weitere Einengung für die Analyse nicht erforderlich. Sind auch keine Grenzbetrachtungen möglich, geht man meist vom ungünstigsten Fall aus. Hat diese Unterstellung keine relevanten Konsequenzen, ist die Vereinfachung gerechtfertigt.

Insgesamt stellt der Umgang mit Unsicherheiten und Ungewissheiten eine komplexe Herausforderung dar, hinsichtlich derer auch zu berücksichtigen ist, welchen Detaillierungsgrad die Standortuntersuchungen sowie die Endlagerplanung in dem jeweiligen Analyseschritt erreicht haben, siehe z. B. (DAEF 2017). Baltus und Röhlig (2009) fassen die grundsätzlichen Aspekte folgendermaßen zusammen:

„In jedem Fall sind die offenen Fragen, Unsicherheiten und Ungewissheiten systematisch zu katalogisieren und hinsichtlich ihrer Sicherheitsrelevanz zu bewerten. Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen sind klassische Hilfsmittel zur Bewertung quantitativ fassbarer Unsicherheiten. Offene Fragen, die sicherheitsrelevant sind, sind im weiteren Verlauf des Endlagerprogramms so weit aufzulösen, dass eine Genehmigungsreife erzielt werden kann. Hierzu bestehen im Wesentlichen zwei grundsätzliche Möglichkeiten:

- *Reduzierung der Unsicherheiten durch Forschung und Erkundung,*
- *Vermeidung oder Abschwächung der Auswirkungen der Unsicherheiten im Rahmen der Endlagerentwicklung durch eine robuste Auslegung.“ (Baltes/Röhlig 2009)*

5.3 Prinzipielle Vorgehensweise

Nachfolgend werden für die Sicherheitsanalyse und –bewertung wesentliche Aspekte der Vorgehensweise und des Ablaufs behandelt.

5.3.1 FEP-Katalog und Szenarientwicklung

Langzeitsicherheitsnachweise müssen alle sicherheitsrelevanten Endlagereigenschaften abbilden, allen sicherheitsrelevanten Einwirkungen auf das Endlager Rechnung tragen und alle Änderungsprozesse, denen das Endlager zukünftig ausgesetzt sein kann, berücksichtigen. Hierzu werden Szenarien abgeleitet, mit denen potenzielle zukünftige Entwicklungen des Endlagersystems beschrieben und ihre Konsequenzen analysiert werden können („Szenarientwicklung“).

Um eine solche Analyse von Beginn an systematisch durchführen und im Fortgang der Analyse immer wieder prüfen zu können, wurde Ende der 1980er Jahre das Konzept des FEP-Katalogs entwickelt (Andersson 1989) und seither in verschiedenen Endlagersystem-Kontexten angewendet und fortgeschrieben, siehe z.B. (OECD/NEA 2006), (Wolf et. al. 2012), (Stark et. al. 2014).

Ein FEP-Katalog enthält die für eine Langzeitsicherheitsanalyse relevanten

- Merkmale oder Zustände (Features), die das Endlager-system zu einem bestimmten Zeitpunkt charakterisieren (z.B. die Abfallmatrix oder das Wirtsgestein und ihre jeweiligen Eigenschaften),
- Ereignisse (Events), die über einen sehr kurzen Zeitraum eintreten und auf das Endlagersystem einwirken können (z.B. Erdbeben) und
- Prozesse (Processes), die über einen längeren Zeitraum ablaufen (z.B. Hohlraumkonvergenz, radioaktiver Zerfall oder Klimaänderungen).

Die OECD/NEA hat 2006 eine Liste von international gebräuchlichen FEPs als Datenbank veröffentlicht (OECD/NEA 2006) und zuletzt 2014 in einem Update durch zusätzliche Informationen, Referenzen und Vorschläge zur Weiterentwicklung ergänzt (OECD/NEA 2014). Diese FEP-Liste kann als Ausgangspunkt und struktureller Rahmen für projektspezifische FEP-Kataloge genutzt werden.

In der aktuellen Empfehlung der OECD/NEA (OECD/NEA 2014) werden FEPs in fünf Klassen eingeteilt, die systematisch weiter unterteilt werden:

- Externe Faktoren, die ihren Ursprung zeitlich und räumlich außerhalb des Endlagersystems haben, z.B. vorlaufende strategische Entscheidungen zu Endlagerauslegung und Abfallarten, regionalgeologische Prozesse, regionale Ausprägung von Klimaveränderungen und menschliche Handlungen in der Nachverschlussphase
- Abfallgebinde-bezogene Faktoren, in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Abfall und seiner Verpackung, z.B. Abfallform, Eigenschaften des Behälters, Prozesse mit Einfluss auf das Abfallgebinde (Wärme, Gasbildung, etc.), Freisetzungs- und Transportmechanismen (Mobilisierung

aus der Abfallmatrix, Korrosion, Diffusion aus dem Abfallgebäude, etc.)

- Endlager-bezogene Faktoren, die in unmittelbarem räumlichen und zeitlichen Zusammenhang mit den Einrichtungen des Endlagers außerhalb der Abfallgebäude stehen, z.B. mit den Endlager-Hohlräumen und ihren Auflockerungszonen, den geotechnischen Barrieren und den dort jeweils ablaufenden Prozessen
- Geosphären-bezogene Faktoren, z.B. Eigenschaften des Wirtsgesteins und darin enthaltene , Diskontinuitäten, hydrogeologischer Ausgangszustand, Primär-Spannungszustand, thermische, hydraulische oder tektonische Prozesse, Transportprozesse
- Biosphären-bezogene Faktoren, z.B. Umwelteinflüsse an der Erdoberfläche und im oberflächennahen Bereich, Annahmen zur Bevölkerung und ihrem Verhalten (e.g. Ernährungsgewohnheiten), Radionuklid-Migration in der Biosphäre, Expositionsfaktoren (e.g. Kontaminationsgrad, Expositionspfade)

Auf Grundlage eines derartigen generischen FEP-Katalogs können standortspezifische FEP-Kataloge aufgestellt werden. Aktuelle Beispiele sind in (OECD/NEA 2014) referenziert. In Deutschland wurde die Methode des FEP-Katalogs zuletzt im Projekt ANSICHT für zwei generische Modellstandorte eines Endlagers im Tonstein angewendet (Stark et al. 2014, Stark et al. 2016). Im Rahmen dieser Arbeiten wurde, aufbauend auf Arbeiten zum Wirtsgestein Steinsalz in den Projekten ISIBEL (Buhmann et. al. 2008) und VSG (Wolf et al. 2012) auch der methodische Ansatz fortgeschrieben.

Aktuelle FEP-Kataloge bauen auf einer Datenbank auf, in der für alle enthaltenen FEP Datensätze mit relevanten Informationen hinterlegt sind. Hierzu gehören

- Definition und Beschreibung des FEP,
- Identifizierung als „Zustand“ oder „Prozess“
- Beschreibung des Ausgangszustands oder des Prozesses als solchen
- räumliche Zuordnung bzw. Zuordnung zu Systemkomponenten
- zeitliche Zuordnung
- Angaben zu Eintrittswahrscheinlichkeit („wahrscheinlich“, „weniger wahrscheinlich“ oder „nicht zu betrachten“)
- Angaben zu möglichen Ausprägungen (Intensitäten) eines FEP (beispielsweise verschiedene Erdbebenstärken) und deren Wahrscheinlichkeitsklassen („wahrscheinlich“, „weniger wahrscheinlich“ oder „unwahrscheinlich“)
- Auf das jeweilige FEP einwirkende und vom jeweiligen FEP beeinflusste andere FEP (Wechselwirkungen und Abhängigkeiten)
- Beispiele, Literaturhinweise

Ein FEP-Katalog enthält also Bausteine, mit denen, ausgehend vom Ausgangszustand des Endlagersystems, Szenarien zukünftiger Entwicklungen nach Verschluss des Endlagers (z.B. Erhalt oder Verlust der Integrität von Barrieren, Mobilisierung von Radionukliden) und die Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens beschrieben werden können. Er ist damit eine wichtige Grundlage der Szenarientwicklung.

Ausgangspunkt eines Szenarios ist ein gegebener Zustand des Endlagersystems (Wirtsgestein, Endlagerauslegung, Ab-

fallgebilde, Verschlüsse und Barrieren), der durch entsprechende „Features“ beschrieben wird. Auf diesen Zustand einwirkende Ereignisse oder Prozesse (z.B. Erbeben, Vereisung, Wärmeeintrag aus den Abfällen) verändern das System oder Teile hiervon. Beispielsweise kann ein Erdbeben Bewegungen entlang einer älteren Störungszone auslösen und zu Wegsamkeiten für Fluide führen. Die auf diesen Wegsamkeiten migrierenden Fluide können die Integrität von Barrieren beeinträchtigen. Derartige Veränderungen führen zu neuen Zuständen des Endlagersystems, die hinsichtlich der Endlagersicherheit zu bewerten sind.

Neben der systematischen Ableitung von Szenarien aus den Bestandteilen des FEP-Katalogs (sog. „bottom-up“-Ansatz) ist heute eine Prüfung auf Relevanz für die Barrieren oder Sicherheitsfunktionen eines Endlagers Gegenstand der Szenarientwicklung. Hierbei wird geprüft, welche Prozesse zu Beeinträchtigungen von Funktionen einer oder mehrerer Barrieren des Endlagersystems führen können, und durch welche FEP diese Prozesse abdeckend repräsentiert werden („top-down-Ansatz“). Hiermit lässt sich die Anzahl der prüfungsrelevanten Szenarien deutlich einschränken. Moderne Methoden der Szenarientwicklung verbinden beide Ansätze (OECD/NEA 2015).

Die Kombination von FEP zu Szenarien, die Abschätzung von Wahrscheinlichkeiten und die Beurteilung der Relevanz der Szenarien für die Barrieren des Endlagersystems basieren zu großen Teilen auf der Kenntnis des Endlagersystems und der betrachteten Prozesse sowie auf der Einschätzung der hiermit befassten Experten. Der systematische Aufbau eines FEP-Katalogs und die darin enthaltenen Informationen und Begründungen dienen außerdem der Verfahrenstransparenz und der Nachvollziehbarkeit bei der Auswahl der Szenarien.

Aus der Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens und ihrer Relevanz für die Integrität der Barrieren ergibt sich so in der Szenarienentwicklung eine Auswahl an Szenarien, die als relevant und abdeckend angesehen werden und in der Szenarienanalyse auf ihre Auswirkungen hin zu untersuchen sind. Prüfgegenstand ist dabei letztlich die Möglichkeit einer Radionuklidfreisetzung und des Radionuklid-Transports in die Biosphäre sowie die Ermittlung der daraus entstehenden Expositionen.

Im Langzeitsicherheitsnachweis muss für alle wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Szenarien die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen gezeigt werden. Aus FEP, die als „nicht zu betrachten“ oder in einer extremen Ausprägung als „unwahrscheinlich“ eingestuft wurden (s.o.), ergeben sich per se zunächst keine weiteren Szenarien. Dennoch kann es sinnvoll sein, im Rahmen von sogenannten „what-if“-Szenarien auch unwahrscheinliche Entwicklungen zu betrachten, um die Robustheit des Endlagersystems oder die Konsequenzen auslegungsüberschreitender Ereignisse zu untersuchen.

5.3.2 Transport- und Expositionsmodelle

5.3.2.1 Konzeptuelle Transportmodelle

Gegenstand der Transportmodellierung ist die Migration freigesetzter Radionuklide durch verschiedenen Kompartimente der Geosphäre (Wirtgestein, Deckgebirge, Störungszonen usw.). Bei der Endlagersicherheit spielen viele Teilbereiche der geologischen Formation dabei keine oder nur eine unwesentliche Rolle. Transportmodelle sollten sich daher auf die zentralen Einflussgrößen beschränken. So kann es z. B. für die Sicherheit des Endlagers irrelevant sein, ob sich außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs noch hochdurchlässige geologische Schichten befinden oder auch solche, die

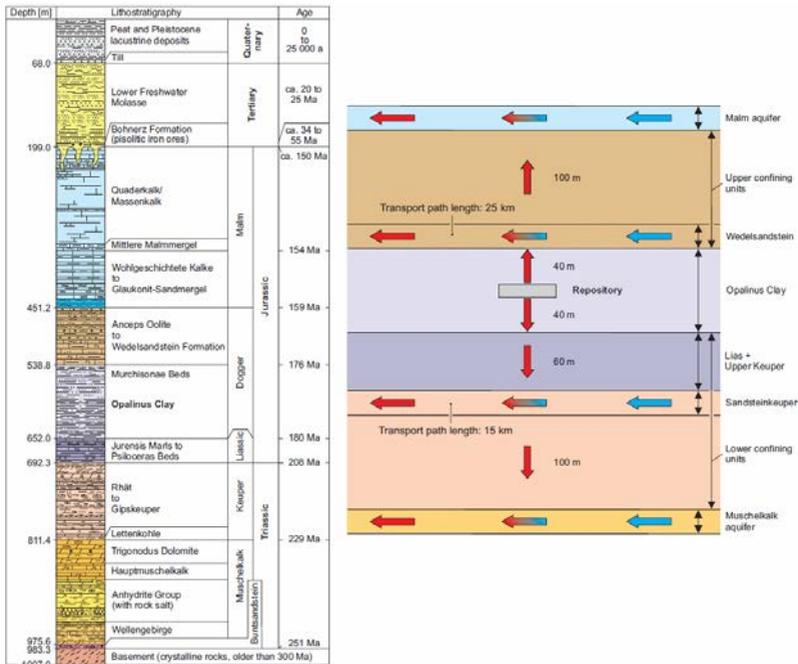
am Fließgeschehen in den betrachteten Szenarien gar nicht teilnehmen. Entsprechende geologische Teilbereiche können also bei der Modellierung vernachlässigt oder vereinfacht werden, wenn gezeigt werden kann, dass sich hierdurch keine Rückwirkungen auf das Endlagerverhalten ergeben.

In der Konsequenz gelangt man zu vergleichsweise einfachen sogenannten konzeptuellen Transportmodellen, die alle wesentlichen Faktoren der Langzeitsicherheit abbilden. In Abbildung 5-2 ist beispielhaft auf der linken Seite die geologische Schichtenfolge an einem Opalinustonstandort abgebildet, auf der rechten Seite das konzeptuelle Modell für den Test, ob und welchen zusätzlichen Einschlusseffekt unter und über der Opalinustonschicht vorhandene gering durchlässige Schichten haben.

Wie man erkennt, enthält das konzeptuelle Modell nur die wesentlichen Schichten und beteiligten Fließwege und vereinfacht auch die Dimensionen. Man verzichtet darauf, die reale Situation exakt abzubilden, behält aber das Wesentliche zur Beantwortung der Fragestellung bei.

Derartige Modelle dienen der Analyse von Szenarien. Soweit diese Szenarien Variationen in der Modellgeometrie betreffen, sind jeweils gesonderte Modelle erforderlich, Variationen der Modellparameter (z.B. der hydraulischen Durchlässigkeiten oder der Sorptionseigenschaften) lassen sich innerhalb einer gegebenen Modellgeometrie untersuchen. Aufbauend auf den hier dargestellten konzeptuellen Modellen ist für die Analyse eine rechen-technischen Umsetzung erforderlich (siehe Kapitel 5.3.1).

Abbildung 5-2: Geologische Schichtenfolge und ihre Konzeptualisierung



Quelle: (NAGRA 2002)

5.3.2.2 Modelle zur Expositionsrechnung

Die Auswirkungen aus einem Endlager ohne vollständigen Einschluss sind radiologischer Natur und drücken sich daher in einer Strahlenexposition oder einer Dosis aus. Da der Schadstofftransport mit dem Grundwasser erfolgt, ist als wesentlicher Expositionspfad der Konsum kontaminierten Trinkwassers aus Grund- und Oberflächengewässern zu betrachten. Für einige besondere Nuklide können auch noch andere

könnten also ohne weiteres entfallen. In der Praxis verwendet man daher sehr stark vereinfachte Modelle, in denen die Dosis pro Nuklid als Gesamtfaktor angegeben ist (z. B. in Sv/Bq), der alle Wirkungen auf allen Pfaden bereits zusammenfasst.

Die Auswahl und Gestaltung von Biosphärenmodellen unterliegt regulatorischen Vorgaben und Konventionen. Wegen der im Vergleich zum Analysezeitraum kurzfristigen Änderungen, denen die Biosphäre unterworfen ist, basieren z. B. die Empfehlungen der ICRP auf dem Ansatz, dass Dosisberechnungen für lange Zeiträume (jenseits mehrerer hundert Jahre) nicht als unmittelbares Maß für den Schutz der menschlichen Gesundheit herangezogen werden sollten, sondern eher als Indikator für Einschussgüte eines Endlagers zu verstehen sind. (*„dose estimates should not be regarded as measures of health detriment beyond times of around several hundreds of years into the future. Rather, they represent indicators of the protection afforded by the disposal system.“* (ICRP 2013)). Entsprechend werden in BMU 2010 Vorgaben für die ermittelten Dosisbelastungen in der Nachverschlussphase als „Indikatoren“ bezeichnet. (*„International besteht Einvernehmen, dass berechnete oder abgeschätzte Risiken oder Dosen in dieser Phase nur als Indikatoren für das mit der Endlagerung zu erzielende Schutzniveau interpretiert werden dürfen.“* (BMU 2010)).

5.3.3 Rechentechnische Umsetzung

Die rechentechnische Umsetzung der definierten Modelle erfolgt in der Regel nicht als ganzheitliche Lösung sondern in Modulen. Die einzelnen Module bilden jeweils einen Teilbereich ab, z. B. die Brennstoffauflösung oder die Ausbreitung im einschusswirksamen Bereich und werden auf der Systemebene ggf. vereinfacht und über Schnittstellen miteinander

gekoppelt. Diese Arbeitsweise hat den Vorteil, dass Planung, Programmierung, Testen und Qualitätssicherung immer anhand des Einzelmoduls erfolgen können und keine unbeherrschbar großen Programmpakete gehandhabt werden müssen.

Auch das Problem des ungleichen Rechenzeitaufwands für die Einzelmodule ist mit der Modularisierung besser beherrschbar, da damit das geschwindigkeitsbestimmende „Nadelöhr“ von anderen, weniger Ressourcen beanspruchenden Aufgaben getrennt ausgeführt und optimiert werden kann.

Sehr stark vereinfachen lassen sich solche Rechenaufgaben, wenn die Zahl der Dimensionen ohne Genauigkeitsverlust verringert werden kann. Gelingt es und ist es von den relevanten Mechanismen her möglich, auf dreidimensionale Modelle zu verzichten, können wesentlich schnellere Rechenläufe erzielt werden. Nur in denjenigen Fällen, in denen tatsächlich komplexe räumliche Zusammenhänge vorliegen, kann darauf nicht verzichtet werden.

Eine Vielzahl verschiedener Codes mit unterschiedlichem Zugschnitt sind z. B. für die Aufgabenstellungen

- Temperaturverteilung und thermomechanische Einwirkungen
- Geomechanik und Integrität des ewG
- Hydrogeochemie
- Quellterme
- Strömungs – und Radionuklidtransportmodellierung (Strömungsmodelle, ein-/zwei-/drei-dimensional, Sorption, Diffusion, etc.)

- Biosphäre, Radioökologie und Exposition

verfügbar. In (Fein et al. 2008) ist ein Überblick über verschiedene verfügbare Modelle und die Radionuklidmodellierung gegeben.

Das Repertoire an verfügbaren Codes ist mit der Zunahme an praktisch durchgeführten Langzeitsicherheitsanalysen im ersten Jahrzehnt dieses Jahrtausends deutlich größer geworden. Die Anforderungen, die heute an die Berechenbarkeit auch komplexer Zusammenhänge gestellt werden, sind entsprechend angewachsen. Der erreichte Stand genügt nach unserer Einschätzung auch höchsten Ansprüchen.

5.3.4 Ergebnisse

Ergebnisse von Langzeitsicherheitsanalysen werden in der Regel in mehrbändigen Reports dokumentiert. In Tabelle 5-1 sind beispielhaft die Kapitelthemen der Langzeitsicherheitsanalyse für Yucca Mountain/USA, die Inhalte und ihr Umfang zusammengestellt.

Wie zu erkennen ist, liegt der Schwerpunkt der Analyse auf der Umsetzung der zu berücksichtigenden Vorgänge in eine modellhafte Form. Hiermit sind alle Vorgänge gemeint, die einen Einfluss auf die Endlagerperformance insgesamt haben oder für Teilelemente in den Abläufen eine Rolle spielen.

Die Ergebnisse selbst nehmen nur einen vergleichsweise geringeren Raum ein. Dabei spielen die Modellbeschreibung, die menschlichen Einwirkungen und der Grundwasserschutz wiederum nur eine sehr kleine Rolle, das Schwergewicht liegt auf der Einhaltung von Individualdosisstandards.

Tabelle 5-1: Langzeitsicherheitsnachweis für das früher beantragte Endlager Yucca Mountain

Thema (Kapitel, Kurztitel)	Inhalte (Stichworte)	Anzahl Textseiten¹
2.1 Systembeschreibung und Multibarrierenkonzept	Barrieren, Fähigkeiten, Technische Basis	111
2.2 Szenarienanalyse und Ereigniswahrscheinlichkeit	FEPs und Szenarienklassen, Wahrscheinlichkeitsanalysen für seismische und vulkanische Ereignisse sowie Versagen technischer Barrieren	102
2.3 Modellabstraktion	Klima und Infiltration, Strömung in der ungesättigten Zone, Driftzulauf, mechanische Degradation, Driftbedingungen, Korrosion, Abfallauflösung, Radionuklidtransport in der ungesättigten und gesättigten Zone, Biosphärentransport, Vulkanische Aktivitäten	1.154
2.4 Erfüllung der Standards	Modell und Ergebnisse, Einhaltung von Individualdosisstandards, Menschliche Einwirkungen, Grundwasserschutz	337

¹ Ohne Referenzen, Tabellen und Anhänge

Quelle: Eigene Zusammenstellung nach (US-DOE 2008)

Das Schwergewicht im Kapitel „Einhaltung von Individualdosisstandards“ bildet hingegen Kapitel 2.4.2.3 „Credibility of the

TSPA²⁰ Results“. Dort werden alle Annahmen, Teilanalysen, Probenahmen, Modellparameter, etc., einer Überprüfung auf Konsistenz, fortbestehende Unsicherheiten und resultierender Konsequenzen unterzogen. Art und Umfang der hier diskutierten Sachverhalte macht – hier aus Sicht des Antragstellers – deutlich, dass bei solchen Analysen eine große Anzahl an Unsicherheiten fortbesteht, dass aber der Antragsteller der Ansicht ist, dass diese verbleibenden Unsicherheiten unterhalb relevanter Niveaus bleiben. Diese Einschätzung würde im Rahmen einer behördlichen Überprüfung möglicherweise kontrovers diskutiert werden.

5.4 Beispiele für LZSA

Im Folgenden werden einige vorliegende Langzeitsicherheitsanalysen anhand einiger charakteristische Einzelaspekte kurz beschrieben. Dies sind ausgewählte Analysenergebnisse der Endlagerprojekte bzw. der modellhaften Sicherheitsanalysen entsprechend der Übersicht in Tabelle 5-2.

²⁰ TSPA: Total System Performance Analysis, Langzeitsicherheitsanalyse

Tabelle 5-2: Überblick über die betrachteten Langzeitsicherheitsanalysen (international)

Standort	Projekt	Wirtsgestein	Anlass	Abchluss
Mol (Belgien)	Safir - 2	Boom Clay (relativ gering konsolidierter Ton)	Prüfung und Weiterentwicklung der Methoden für die LZSA	2001
Bure (Frankreich)	Dossier Argile	Callov-Oxford Ton	Grundsätzliche Eignungsaussage für den Standort, Vorbereitung der Standortauswahl	2005
Benken (Schweiz)	Entsorgungsnachweis	Opalinuston	Nachweis der grundsätzlichen Machbarkeit der Endlagerung	2002
Forsmark (Schweden)	(Standortauswahl)	Granit	Sicherheitsnachweis für Errichtungsgenehmigung	2011
Yucca Mountain (USA)	Genehmigungsverfahren	Tuff (vulkanischen Ursprungs)	Langzeitsicherheitsnachweis für Errichtungsgenehmigung	2010
Gorleben (Deutschland)	Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG)	Steinsalz	Prüfung und Weiterentwicklung der Methoden für die LZSA	2012

5.4.1 Safir-2 Mol (Belgien)

5.4.1.1 Rahmenbedingungen der Langzeitsicherheitsanalyse in Belgien

Die Langzeitsicherheitsanalyse für den Standort Mol/Belgien bezieht sich nicht auf ein reales Endlagerprojekt, da in Belgien bislang noch keine Standortauswahl für ein Endlager für hoch-radioaktive Abfälle durchgeführt wurde. Es handelt sich daher eher um eine akademische Überprüfung des Instrumentariums, das für solche Zwecke zur Verfügung steht und um eine Identifizierung jener Punkte, die bei solchen Analysen eine Rolle spielen. Dies geschah insbesondere mit Blick auf den weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Eine Besonderheit dieser Analyse ist, dass Belgien aktuell zwar mehr als 50% seiner Stromerzeugung aus Kernenergie deckt, dies aber nur mit zwei älteren Anlagen der 400-MW-Klasse und mit fünf Reaktoren der 1000-MW-Klasse erfolgt. Zudem hat Belgien die Nutzung der Kernenergie begrenzt, so dass insgesamt deutlich geringere Abfallmengen zur Endlagerung anstehen als in anderen hier betrachteten Ländern. Ferner hat Belgien über lange Zeit Brennstoff aufarbeiten lassen, so dass der Anteil abgebrannter Brennelemente zur Endlagerung nur einen geringen Umfang hat.

Die verfügbaren geologischen Formationen, die für eine Endlagerung in Belgien in Frage kommen könnten, sind ebenfalls sehr eingeschränkt. Die Analyse befasst sich daher mit dem in Belgien vorkommenden „boom clay“, einer vergleichsweise gering konsolidierten Tonart. Die verfügbare geringe Schichtdicke dieser Formation und auch die geringe Tiefe dieser Schicht am Standort Mol würden die Anforderungen des (A-kEnd 2002) nicht erfüllen. Der hier untersuchte Standort Mol

käme daher für eine Standortauswahl eher nicht in Frage, was aber der Durchführung einer Langzeitsicherheitsanalyse zu akademischen Zwecken mit den entsprechenden Standortdaten nicht grundsätzlich entgegensteht.

Ausgeführt wurde die Analyse im Auftrag der staatlichen Organisation ONDRAF/NIRAS²¹, die in Belgien für Errichtung und Betrieb von Endlagern zuständig ist, durch das Studiecentrum voor Kernenergie/Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire.

5.4.1.2 Gegenstand der Analyse

Die Analyse SAFIR-2 (NIROND 2001) untersucht für das geschätzte belgische Gesamtinventar an verglasten Abfällen, Hülsen und Strukturteilen aus der Wiederaufarbeitung und für abgebrannte Brennelemente unter verschiedenen Randbedingungen, welche Dosisbelastungen aus dem endgelagerten Inventar resultieren würden. Als geologische Barriere wird der am Standort Mol vorhandene und durch eine Vielzahl an Erkundungsbohrungen sowie Untersuchungen im Untertagelabor HADES (<http://science.sckcen.be/en/Facilities/HADES>) bekannte boom clay angesetzt, die Endlagerbedingungen entsprechen dem damaligen Planungsstand und die sonstigen Randbedingungen entsprechen den lokalen Gegebenheiten am Standort.

5.4.1.3 Ergebnisse der Analyse

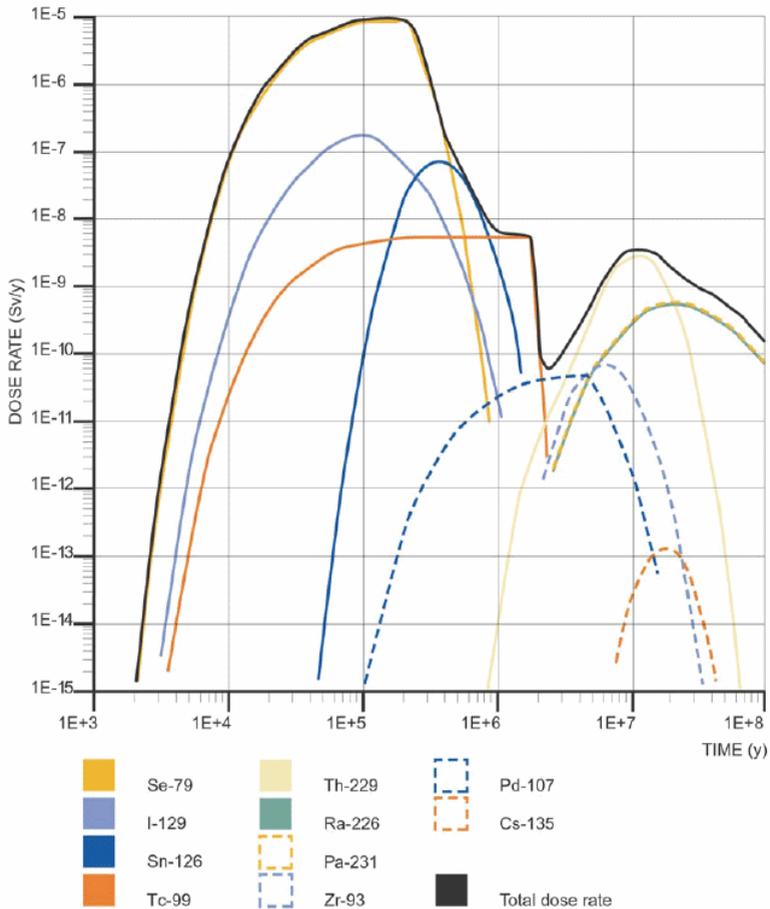
In Abbildung 5-4 sind die Ergebnisse der Analyse für verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung im Standardfall dargestellt. Eingezeichnet sind nur die Spalt- und Aktivierungsprodukte,

²¹ ONDRAF: Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles, NIRAS : Nationale instelling voor radioactief afval en splijtstoffen

die Aktiniden tragen wegen ihrer geringen Mobilität (sehr stark verzögerter Übergang in die Biosphäre), zum Ergebnis nur vernachlässigbar bei.

Dosisbestimmend sind demnach Selen-79, Iod-129, Zinn-126 und (mit deutlich geringerem Anteil) Technetium-99.

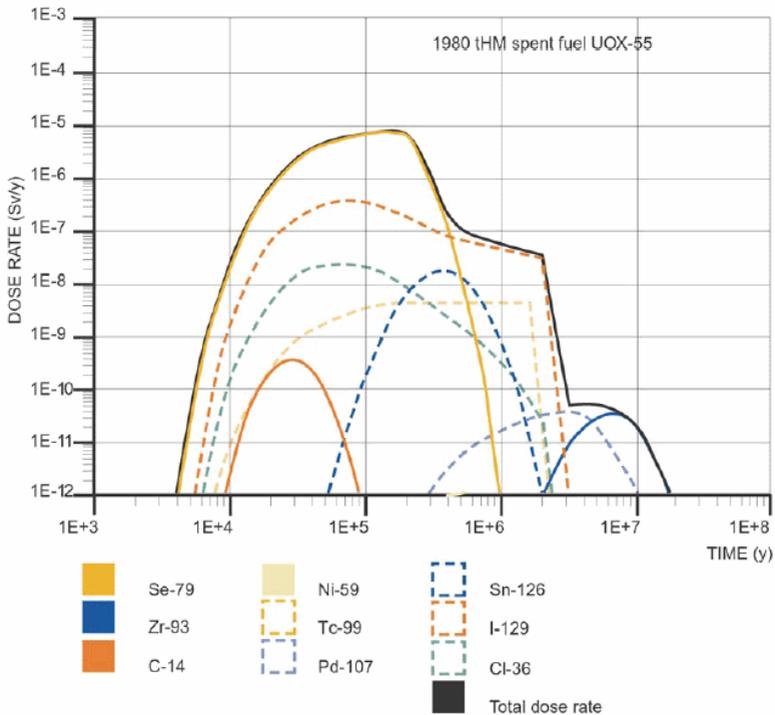
Abbildung 5-4: Dosisbelastung aus endgelagerten verglasten Abfällen aus der Wiederaufarbeitung am fiktiven Standort Mol/Belgien (nur Spalt- und Aktivierungsprodukte)



Quelle: aus: (NIROND 2001)

Ähnlich ist der Verlauf für eingelagerte abgebrannte Brennelemente (Abbildung 5-5).

Abbildung 5-5: Dosisbelastung aus endgelagerten abgebrannten Brennelementen am fiktiven Standort Mol/Belgien (nur Spalt- und Aktivierungsprodukte)



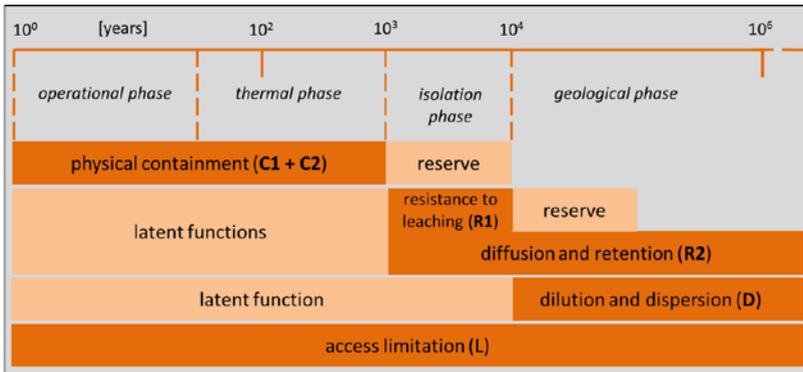
Quelle: Aus (NIROND 2001)

Wie zu erkennen ist, ergeben sich etwa gleich große Dosisbeiträge aus beiden Abfallarten. Auch die wichtigsten Nuklide, die zur Dosis beitragen, sind im Wesentlichen dieselben (außer Kohlenstoff-14, das beim Wiederaufarbeitungsprozess in andere Abfallströme gelangt oder emittiert wird und daher in den verglasten Abfällen nicht mehr enthalten ist).

Bei der Analyse spielt das Isolationspotenzial des Endlagergesteins boom clay die zentrale Rolle und trägt die Hauptlast im Vergleich aller Barrieren. Im SAFIR-2 Bericht (NIROND 2001) sind die jeweils beitragenden Faktoren entsprechend Abbildung 5-6 grafisch zusammengefasst. Dabei werden folgende Sicherheitsfunktionen unterschieden:

- C = physical containment – Einschluss der Abfälle
 - C1 = Watertightness – Verhinderung des Wasserkontakts mit den Abfällen
 - C2 = Limiting the water influx – Begrenzung des Wasserzutritts
- R = Delaying and spreading the releases – Verzögerung und Verteilung freigesetzter Nuklide
 - R1 = Resistance to leaching – Widerstand (der Abfallmatrix) gegen Auslaugung
 - R2 = Diffusion and retention – Diffusion und Rückhaltung
- D = Dilution and dispersion – Verdünnung und Verteilung zur Reduzierung der Radionuklidkonzentration bei potenziellem Übergang in die Biosphäre
- L = Limitation of access – Limitierung des Zugangs (der Wahrscheinlichkeit und potenzieller Konsequenzen menschlichen Eindringens)

Abbildung 5-6: Die Langzeitsicherheits-Funktionen in den vier Phasen der geologischen Endlagerung hochradioaktiver Abfälle



Quelle: (NIROND 2001)

5.4.2 Bure (Frankreich)

In Frankreich spielt für die Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle seit einigen Jahren nur noch Tonstein eine Rolle, alle anderen Wirtsgesteine werden nur noch als Reserveoption weiter verfolgt²². Die für Endlagerplanung, -errichtung und -betrieb verantwortliche staatliche Organisation ANDRA²³ betreibt am Standort Bure an der Grenze der Departements Meuse und Haute-Marne ein Untertagelabor und plant im 160 Mio. Jahre alten Callovo-Oxfordian-Tonstein ein Endlager für

²² Frankreich benötigt als zweites Land nach den USA bei fortgeführter Nutzung der Kernenergie ein zweites Endlager, da die Maximalaufnahme der Formation durch das vorhandene Inventar ausgelastet wird. Daher stellen sich hier die Fragen nach einem weiteren Endlagerstandort und möglicherweise auch weiteren Wirtsgesteinen.

²³ ANDRA: Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactif

verglaste Abfälle aus dem Äquivalent von ca. 45.000 t abgebrannter Brennelemente zu errichten (Cigéo²⁴). In 2015 soll der Sicherheitsnachweis vorgelegt, in 2017 der Antrag zur Errichtung gestellt werden.

5.4.2.1 Langzeitsicherheitsanalyse Dossier Argile

In (ANDRA 2005) sind der Langzeitsicherheitsanalyse verschiedene Brennstoffkreislauf-Szenarien zugrunde gelegt. U.a. sollte untersucht werden, welche Änderungen sich aus der gemischten Einlagerung von verglasten Abfällen und abgebrannten Brennelementen ergeben würden, da der überwiegend staatliche Betreiber EDF²⁵ nur einen Teil seines abgebrannten Brennstoffs aufarbeiten lässt und erhebliche Brennstoffanteile für eine spätere Entscheidung lediglich lagert.

Die Analyse legt den Kenntnisstand über die Standortbedingungen von 2005 zugrunde, der sich anhand der Erkundungen an diesem Standort bis zu diesem Zeitpunkt ergeben hatte.

5.4.2.2 Ergebnisse der Langzeitsicherheitsanalyse

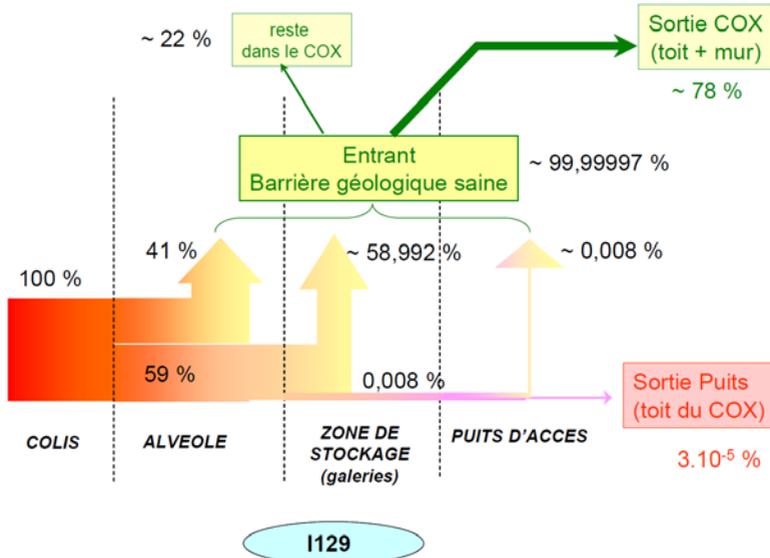
Wie bereits im Fall Mol/Belgien bilden sich auch bei dieser Analyse die typischen Eigenschaften der Tonsteinformation ab: sehr hohe bis vollständige Rückhaltung von Aktiniden und sorbierfähigen Kationen, lediglich die anionisch vorliegenden hochmobilen Spaltprodukte erreichen in Teilen die Biosphäre.

Für das hochmobile Iod-129 ist in der jeweilige Verbleib nach Freisetzung aus der Endlagerverpackung gezeigt.

²⁴ Cigéo : Centre industriel de stockage géologique

²⁵ EDF: Electricité de France

Abbildung 5-7: Verbleib von aus der Abfallverpackung freigesetztem Iod-129 in der französischen Langzeitsicherheitsanalyse für Tonstein



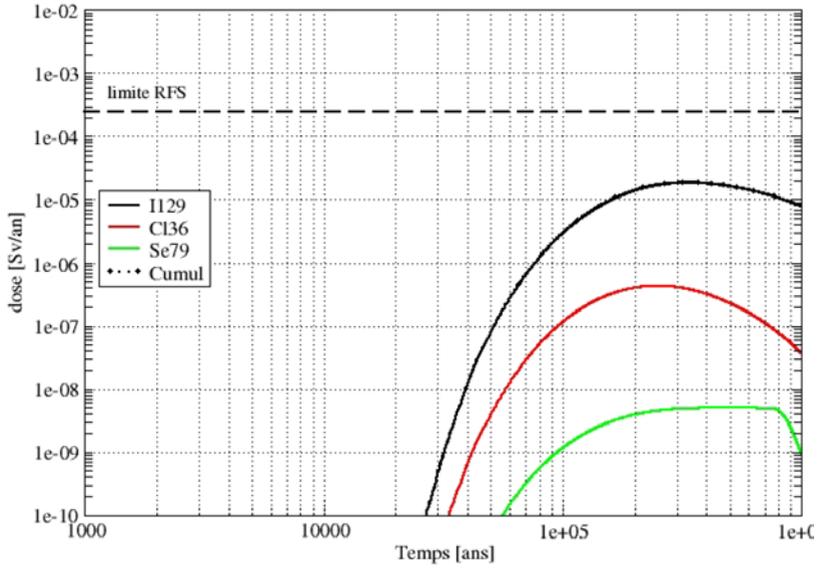
Quelle:(ANDRA 2005), S. 270

Wie zu erkennen ist, wird die geologische Barriere („Barrière géologique saine“) vom weit überwiegenden Teil des freigesetzten Inventars aus den Behältern („Colis“) erreicht. Etwa ein Fünftel des in die Barriere diffundierten Inventars verbleibt in dieser („reste dans le COX“, COX = Calovo-Oxfordian), ca. 78% verlassen die Barriere wieder, allerdings durch Diffusion erheblich verzögert.

In Abbildung 5-8 ist der Dosisverlauf im Referenzfall für abgebrannte Brennelemente, in Abbildung 5-9 für verglaste hochradioaktive Abfälle dargestellt. Beide Kurven unterscheiden sich in ihrem Verlauf kaum, auch die wesentlich zur Dosis beitragenden Radionuklide sind identisch (Iod-129, Chlor-36 und Selen-79). Die Maximaldosis liegt bei abgebrannten Brennelementen um etwa den Faktor 10 höher, bleibt aber unter der französischen Regulierungsbegrenzung (0,3 mSv/a).

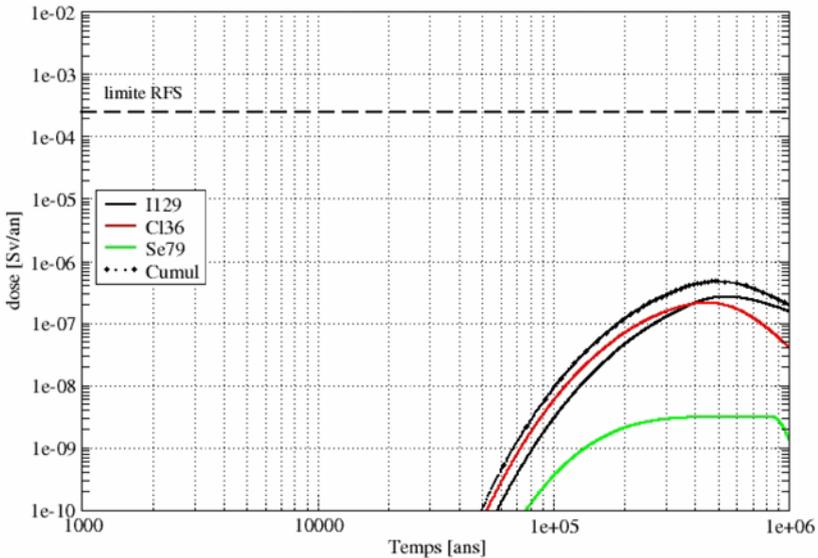
Für weitere Details der Modellierung, umfangreiche Sensitivitätsanalysen, Parameterstudien und chemotoxische Aspekte steht die Originaldokumentation der ANDRA zur Verfügung.

Abbildung 5-8: Dosisverlauf im Referenzfall für abgebrannte Brennelemente



Quelle: (ANDRA 2005), S. 665

Abbildung 5-9: Dosisverlauf im Referenzfall für verglaste hochradioaktive Abfälle



Quelle: (ANDRA 2005), S. 667

5.4.3 Benken (Schweiz)

In der Schweiz sind die Betreiber der Kernkraftwerke für alle Stationen der Entsorgung der radioaktiven Abfälle verantwortlich. Sie haben dafür die Organisation NAGRA²⁶ gebildet, die u.a. auch für die Beantragung, die Errichtung und den Betrieb von Endlagern zuständig ist.

Die Regulierung in der Schweiz hat einen Beleg dafür verlangt, dass die Endlagerung der radioaktiven Abfälle, insbe-

²⁶ NAGRA: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle

sondere der abgebrannten Brennelemente und hochradioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung im Ausland, in der Schweiz möglich ist. Nach anfänglichen Untersuchungen von Hartgesteinen für diesen Zweck wurde seit den neunziger Jahren der Tonstein im Norden der Schweiz bevorzugt untersucht.

5.4.3.1 Langzeitsicherheitsanalyse Entsorgungsnachweis Benken

Zur Führung des Entsorgungsnachweises wurden am Standort Benken im Zürcher Weinland Untersuchungen durchgeführt und für diesen Standort eine Langzeitsicherheitsanalyse angefertigt. Als Randbedingung wurde das voraussichtliche Inventar an Abfällen in der Schweiz abgeschätzt (insgesamt 4.412 tSM, davon 1.195 tSM wiederaufgearbeitet und als verglasten Abfall), als Wirtsgestein wurde der Tonstein Opalinuston untersucht.

Die geologische Untersuchung des Standorts erfolgte mittels seismischer Analysen sowie mittels Tiefbohrungen. Die Langzeitsicherheitsanalyse wurde anhand des konzeptionellen Modells (siehe Abbildung 5-2 auf S. 149) durchgeführt. Dieses ist auch der Ausgangspunkt der Modellrechnungen, die im Rahmen des Verfahrens zum Sachplan geologische Tiefenlager durchgeführt wurden. Im Rahmen des Sachplanverfahrens erfolgt die Standortauswahl in der Schweiz.

5.4.3.2 Ergebnisse der Langzeitsicherheitsanalyse

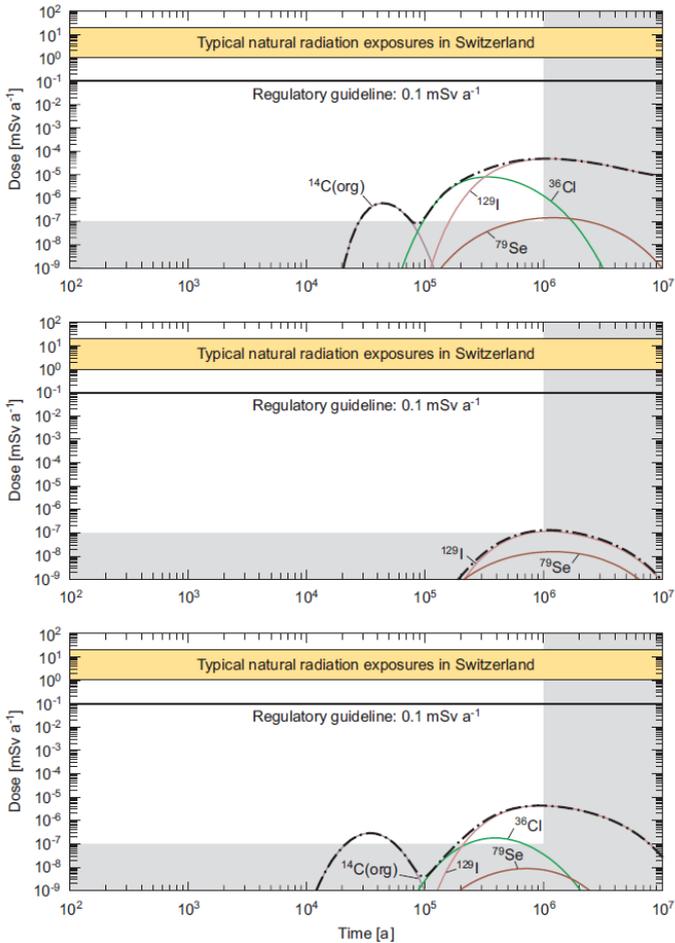
Auch in diesem Fall liegt die Hauptlast des Einschlusses beim Wirtsgestein Opalinuston. Das Ausmaß des Einschlusses in den verschiedenen Kompartimenten wurde bereits in Abbildung 3-9 auf S. 95 aufgezeigt. In Abbildung 5-10 sind die Dosisbeiträge im Referenzfall dieser Analyse wiedergegeben,

und zwar aufgeteilt nach den Beiträgen verschiedener Abfallarten.

Wie aus den drei Kurven erkennbar ist, tragen die verglasten hochradioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung um drei Größenordnungen geringer bei. Dafür sind die mittelradioaktiven Abfälle, die zum größten Teil auch aus der Wiederaufarbeitung stammen, mit wesentlich größeren Anteilen beteiligt. Der größere Beitrag abgebrannter Brennelemente zur Dosis ergibt sich auch aus deren höherem Anteil am Gesamtinventar (siehe oben).

Ebenso wie in der französischen Analyse (ANDRA 2005) tragen auch hier die Radionuklide Iod-129, Chlor-36 und Selen-79 hauptsächlich zur Dosis bei. Die Aktiniden spielen keine Rolle.

Abbildung 5-10: Rechnerische Dosisverlauf für den Referenzfall am Standort Benken für abgebrannte Brennelemente (oben), verglaste hochradioaktive Abfälle (Mitte) und mittelradioaktive Abfälle (unten)



Quelle: (NAGRA 2002), S. 261

5.4.4 Beantragtes Endlager Forsmark (Schweden)

Schweden verfügt weder über nennenswerte Tonsteinvorkommen noch über andere, für die Endlagerung günstige Wirtsgesteinsformationen. Für die Endlagerung in Schweden kommen daher ausschließlich Hartgesteine infrage.

SKB²⁷, eine von den Betreibern von Kernkraftwerken gegründete und privat verfasste Gesellschaft, ist verantwortlich für die Beantragung, die Errichtung und den Betrieb aller Arten von Endlagern in Schweden. Nach längeren, gescheiterten Bemühungen um die Standortsuche in Nordschweden in den neunziger Jahren hat SKB in den südschwedischen Gemeinden Oskarshamn, Östhammar und Tierp in 2001/2002 mit Standortaktivitäten begonnen, in Oskarshamn und Östhammar zwei Standorte detailliert untersucht und schließlich den Standort Forsmark in der Kommune Östhammar ausgewählt. Für den Standort wurde in 2011 ein Antrag auf Errichtung eines Endlagers für abgebrannte Brennelemente gestellt, der zur Zeit von den zuständigen Genehmigungsbehörden sowie vom Umweltgerichtshof geprüft wird.

5.4.4.1 Langzeitsicherheitsanalyse für das beantragte Endlager Forsmark

Bedingt durch die Durchlässigkeit (Klüftigkeit) des Wirtsgesteins kommen im schwedischen Fall hochwertige Kupferbehälter als technische Barriere zum Ansatz, kombiniert mit der Ausnutzung der günstigen hydraulischen und chemischen Eigenschaften von quellendem Bentonit („Puffer“) zur Verfüllung von Einlagerungsbohrlöchern und deren Zuwegungen sowie unterstützt durch Strecken- und Schachtverschlüssen im Einlagerungsbereich (mittels betonähnlicher Materialien).

²⁷ SKB: Svensk Kärnbränslehantering AB

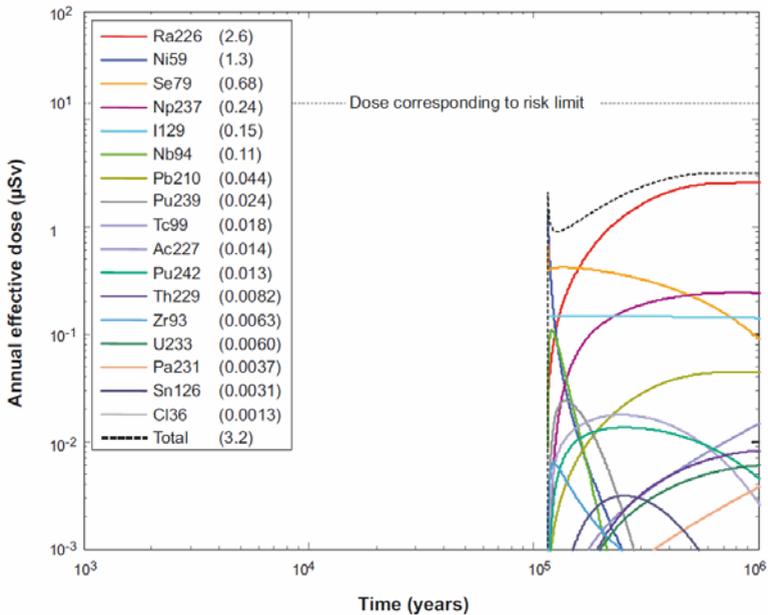
Die Analyse fokussiert sich wegen der Bedeutung des Behälters für die Langzeitsicherheit auf den Nachweis, dass die ca. 6.000 Spezialbehälter den Auslegungszeitraum vollständig und unbeschädigt abdecken. Entsprechend spielen die Kupferkorrosion, die geochemische Entwicklung im Nahbereich der Behälter und mechanische Einwirkungen auf die Behälter zentrale Rollen bei der Analyse.

5.4.4.2 Ergebnisse der Langzeitsicherheitsanalyse für das beantragte Endlager Forsmark

Die Analyse ist in (SKB 2011) enthalten und dokumentiert. Entsprechend der Auslegung schließt der Behälter im Referenzfall die Abfälle vollständig ein. Das bedeutet, dass von dem Endlager wegen vollständigem Einschluss bis zum Ende des Auslegungszeitraums (100.000 Jahre) keinerlei Belastungen ausgehen. Die quantitative Analyse erstreckte sich über den Zeitraum von einer Million Jahren.

In der Analyse werden ferner Fälle diskutiert und analysiert, bei denen einzelne Behälter rascher korrodieren oder Gruppen von Behältern wegen neu entstehender Störungen im Hartgestein mechanisch beschädigt werden. In Abbildung 5-11 ist das Korrosionsszenario abgebildet; das Szenario mit dem Abscheren eines Behälters sieht prinzipiell ähnlich aus und ist mit ähnlichen Dosiswerten verbunden.

Abbildung 5-11: Auswirkungen im „Central corrosion case“ im Fernfeld beim Endlager Forsmark



Quelle: (SKB 2011) S. 656

Das Spektrum an beteiligten Radionukliden ist in diesem Fall wesentlich breiter als in den Fällen mit Tonstein. Hier kommen Zerfallsprodukte von Brennstoffnukliden (Radium-226 aus Uran-238/-234) dosisbestimmend vor, da Radium den Puffer durchqueren kann. Neben den bereits bei Tonstein wichtigen Nukliden Selen-79 und Iod-129 kommt als dosisbeitragendes Nuklid noch das Aktinid Neptunium-237 wesentlich vor.

5.4.5 Yucca Mountain NV (USA)

Für den Standort Yucca Mountain liegt eine vollständige Langzeitsicherheitsanalyse vor, allerdings ohne eine abschließende behördliche Prüfung, da der Standort politisch als nicht realisierbar deklariert wurde.

In Kapitel 3.2.1.1 wurde für diesen Standort bereits beschrieben, dass es sich beim dort gewählten Endlagergestein nicht um ein undurchlässiges Wirtsgestein handelt, folglich geologische Barrieren praktisch nicht vorhanden und wirksam sind, und dass der Abfall selbst, die Abfallpackungen und die Kombination mit technisch erstellten und begrenzt wirksamen Tropfabschirmungen die einzigen Barrieren bei diesem Projekt sind. Die dauerhafte, nahezu gleichförmige Emission von radioaktiven Stoffen (siehe Abbildung 3-4 auf S. 67), kontrolliert nur durch Lösungsangebot und verzögerter Brennstoffauflösung, steht in einem starken Kontrast zur Einschlussanforderung. Die Anforderungen an den Langzeitsicherheitsnachweis sehen, in der Folge mangelnden Einschlussvermögens, außerdem Dosisbegrenzungen vor, die um mehrere Größenordnungen über international üblichen Maßstäben liegen (3,5 mSv/a im Vergleich z. B. zu 10 μ Sv/a in D und ähnlichen oder maximal bis zu einer Größenordnung höheren Werten in anderen Ländern).

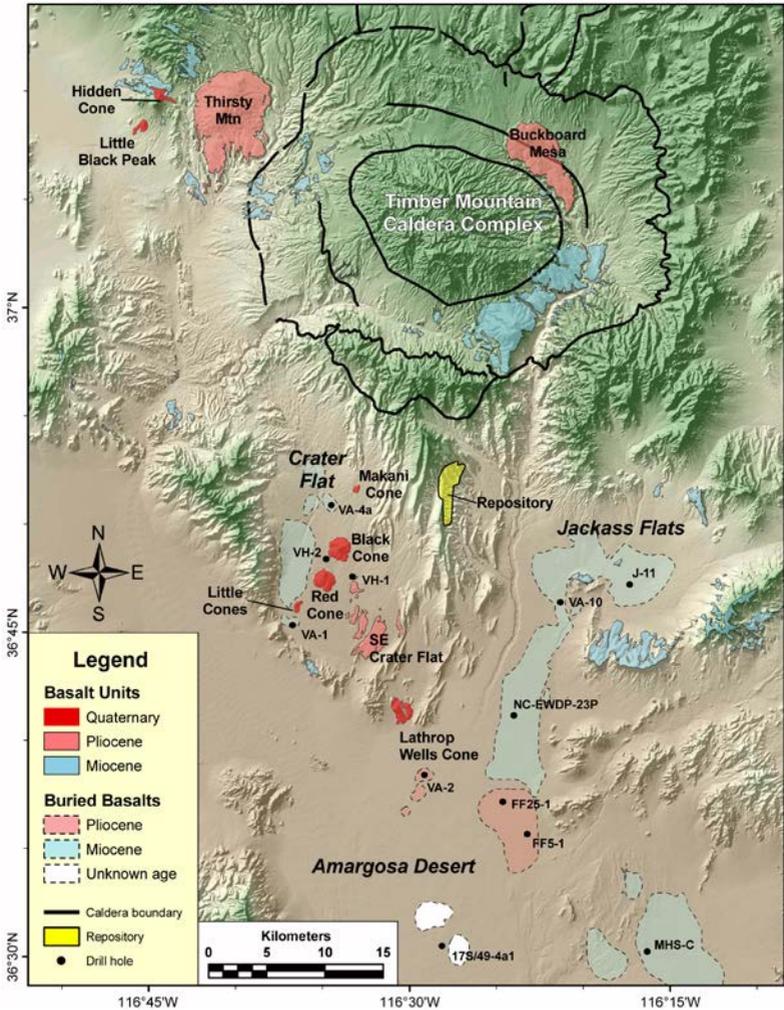
Die Ergebnisse zeigen, dass die geologische Formation am Standort Yucca Mountain nicht die Rückhalteeigenschaften aufweist, wie es für die Geologien anderer Endlagerprojekte weltweit üblich ist. Vielmehr kommt dort der geologischen Formation nur eine rudimentäre Rolle als reiner „Abstandshalter“ zu (Frishman 2014). Außerdem handelt es sich entsprechend der konzipierten Lage des Einlagerungsbereichs weit oberhalb des Grundwasserspiegels der Wüstenregion in Ne-

vada (siehe Kapitel 4.2.3) nicht um eine Endlagerung in tiefen geologischen Formationen, da sich diese im üblichen Sinne dadurch auszeichnen, dass der Einlagerungsbereich mehrere hundert Meter unterhalb der mit der Biosphäre im Austausch stehenden Grundwasserleiter liegt. Das Endlagerprojekt Yucca Mountain ist insofern als untypischer Einzelfall einer Endlagerplanung für hochradioaktive Abfälle zu sehen.

5.4.5.1 Natürliche Einwirkungen auf das Endlager Yucca Mountain

Eine Reihe von natürlichen Einwirkungen wird vernünftigerweise schon im Rahmen der Standortauswahl über Eignungskriterien ausgeschlossen, um zu vermeiden, dass bestimmte Ereignisse in der Langzeitsicherheitsanalyse betrachtet werden müssen. Hierzu gehört in Deutschland z. B. aktiver Vulkanismus (AkEnd 2002). In Fällen, in denen dies nicht als Eignungskriterium für Standorte etabliert ist, gehören vulkanische Eruptionen zum Auslegungsspektrum für Endlager. Dies war beim aufgegebenen Endlagerstandort Yucca Mountain der Fall. Ursache hierfür ist seine Lage in einer geologisch sehr unruhigen Region im Westen der USA. In Abbildung 5-12 sind die im Umkreis von 35 km zum Standort vorhandenen vulkanischen Gesteine abgebildet und Erdzeitaltern zugeordnet.

Abbildung 5-12: Lage des Endlagerstandorts Yucca Mountain im Vulkanfeld Südliches Nevada



Quelle: (US-DOE 2008), S. 2.2-320

Vulkane aus dem jüngsten Erdzeitalter, dem Quartär (heute bis vor 2,588 Mio. Jahren), sind in rot gekennzeichnet. Der südlich gelegene Lathrop Wells Cone beispielsweise ist ca. 80.000 Jahre alt (Valentine 2007). Im vorliegenden Fall wurden die Auswirkungen eines solchen Ereignisses, Vulkaneruption im Endlagerbereich, dargestellt, diskutiert sowie im Hinblick auf die Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens und die Folgen aus einem solchen Ereignis im Langzeitsicherheitsnachweis der Genehmigungsbehörde bewertet. Dieser wurde der US-NRC vorgelegt.

Bezüglich des Szenarienablaufs eines Eruptionereignisses, bei dem ein Magmakanal den Endlagerbereich durchläuft, werden in der Langzeitsicherheitsanalyse für Yucca Mountain diskutiert:

- die Aufwärtsbewegung eines Eruptivganges als magmagefüllte Spalte,
- das Potential, dass die Aufwärtsbewegung im Endlager durch die Hohlräume oder durch die Wärme aus den Abfällen abgelenkt und verbreitert wird,
- der Magmafluss in den Lagerbereich nach Erreichen des Lagerbereichs,
- der Wärmefluss und das Abkühlen des Magmas,
- die Schäden an den technischen Barrieren durch den Kontakt mit dem Magma, und
- Änderungen beim Säure/Base-Gleichgewicht und in der Ionenstärke in Grundwasser nach der Reaktion mit Basalt.

Bezüglich der Wahrscheinlichkeit eines Vulkanausbruches stellt (US-DOE 2008) fest:

„The low recurrence rate of volcanism in the Yucca Mountain region is the primary reason that the annual probability of intersection with the repository footprint is extremely low, with a mean of 1.7×10^{-8} [...] intersections per year, or approximately one chance in 6,000 for the 10,000 years after closure of the repository.”

Allerdings beruhen die angegebenen Wahrscheinlichkeiten nicht auf einer statistischen Auswertung der bisherigen Ereignisse am Standort sondern auf der Mittelung einer weit gestreuten Expertenschätzung.

Die in Tabelle 5-3 bezeichneten FEPs sind bei dem Ereignisablauf betroffen.

Tabelle 5-3: FEPs eines Eruptionereignisses in der Langzeitsicherheitsanalyse für Yucca Mountain

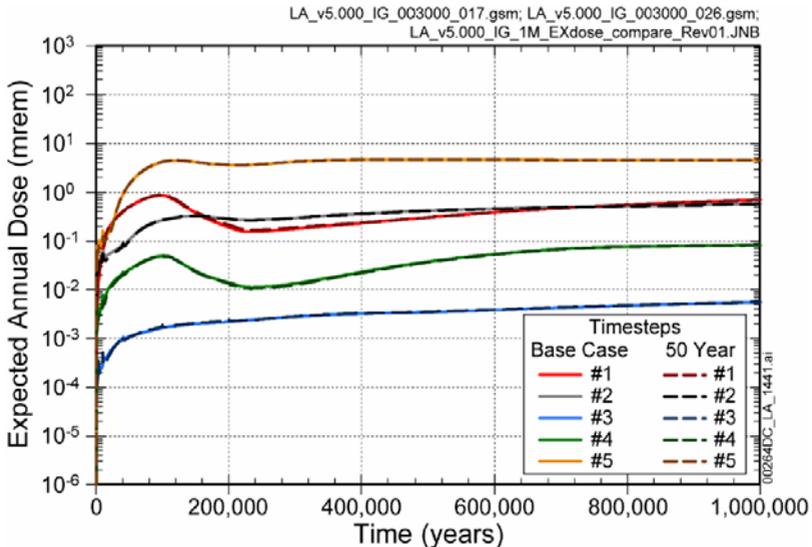
FEP-Number	FEP-Name
1.2.04.03.0A	Igneous intrusion into repository
1.2.04.04.0A	Igneous intrusion interacts with Engineered Barrier System components
1.2.04.04.0B	Chemical effects of magma and magmatic volatiles
1.2.04.06.0A	Eruptive conduit to surface intersects repository
1.2.04.07.0A	Ash fall
1.2.04.07.0C	Ash redistribution via soil and sediment transport

Quelle: (US-DOE 2008), Table 2.3.11-1, S. 2.3.11-93 ff

5.4.5.2 Ergebnisse der Analyse für Magmazuläufe

In Abbildung 5-13 sind die Ergebnisse für fünf verschiedene Basisfälle dargestellt.

Abbildung 5-13: Dosisverläufe (in mrem/a) für den Fall des Eindringens von Magma in den Endlagerbereich am Standort Yucca Mountain



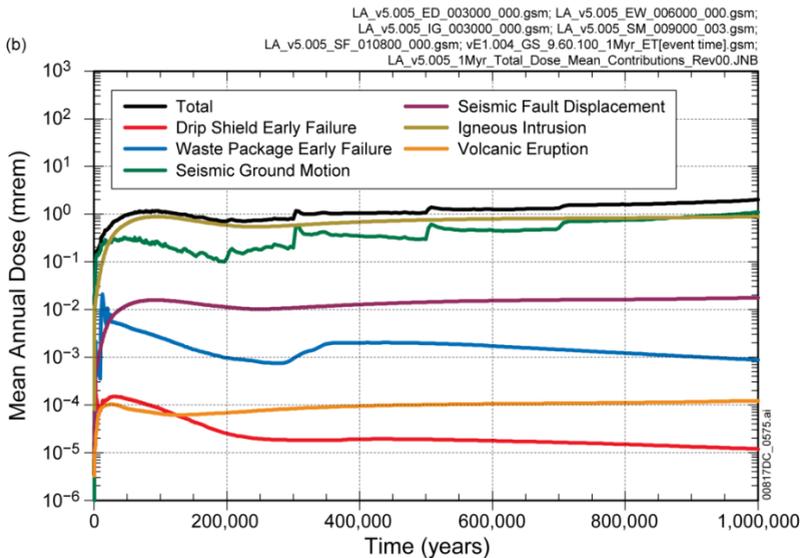
Quelle: /US-DOE 2008/, Figure 2.4-123, S. 2.4-537

Diese Ergebnisse ähneln sehr der Charakteristik im Basisfall (siehe Abbildung 3-4 auf S. 67), die ebenfalls von lang anhaltenden nahezu konstanten Freisetzungen aus dem Endlager gekennzeichnet ist. Die zulässige Dosisgrenze (bis

10.000 Jahre 15 mrem/a bzw. 0,15 mSv/a, jenseits 10.000 Jahren 350 mrem/a bzw. 3,5 mSv/a) ist zwar formal eingehalten, wird aber auch nicht wesentlich unterschritten.

Insgesamt ist der Magmazufuss dasjenige Ereignis, das von allen untersuchten Fällen die höchsten Dosisbeiträge aufweist, wie aus Abbildung 5-14 zu erkennen ist.

Abbildung 5-14: Dosisverlauf bei allen modellierten Ereignissen bei Yucca Mountain im Vergleich



Quelle: (Hansen et al. 2010), S. 11

Zu weiteren Einzelheiten der Langzeitsicherheitsanalyse für Yucca Mountain kann das Original von der Webseite der Prüfbehörde NRC herangezogen werden.

5.4.6 Gorleben (Deutschland)

Der Nachweis der Langzeitsicherheit in den bislang beispielhaft beschriebenen Wirtsgesteinen Tuff, Ton bzw. Tonstein sowie Hartgestein unterscheidet sich erheblich von dem Nachweis in Salzgestein. Um diese Unterschiede deutlich zu machen, wird im Folgenden die Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) genauer beschrieben.

In Deutschland wurde der Salzstock Gorleben-Rambow 1977 als potenzieller Endlagerstandort ausgewählt und seit 1979 mittels erster Bohrungen auf seine Eignung für die Endlagerung radioaktiver Abfälle hin erkundet. Bislang wurden vom verantwortlichen Betreiber des Erkundungsbergwerks keine eigenen Langzeitsicherheitsanalysen durchgeführt. Lediglich in einzelnen Forschungsvorhaben, wie z. B. (PSE 1985) oder (KfK 1989), wurden Teilaspekte der Sicherheit des Erkundungsstandortes für das Endlager behandelt, dabei wurde aber gemäß dem Zuschnitt der jeweiligen Untersuchungen nicht der Kenntnisstand in einer systematischen Form zusammengetragen. Erstmals 1988 wurde die Langzeitsicherheit im Rahmen eines EU-Projektes von der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH untersucht (Storck et al. 1988). Weitere Forschungsaktivitäten und (Teil-)Analysen mündeten schließlich in das Vorhaben ISIBEL (Buhmann et al. 2008), das auch eine wesentliche Grundlage für die nachfolgend beschriebene VSG war.

Erstmals mit der VSG wurde dann der Versuch einer umfassenden Sicherheitsanalyse unternommen, die Ergebnisse

wurden sukzessive zwischen 2011 und 2013 veröffentlicht. Spezifische Randbedingung war für dieses Vorhaben, dass vor Beginn des Projekts die ursprünglich geltenden und nicht sehr detaillierten RSK-Sicherheitskriterien für Endlager (RSK 1982) in 2010 durch neue Sicherheitsanforderungen aktualisiert wurden (BMU 2010). Diese basieren auf den Empfehlungen zum Sicherheitsnachweis und zur Sicherheitsphilosophie, die vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) entwickelt worden waren. Die Langzeitsicherheitsanalyse VSG diente daher auch der Erprobung dieser neuen Regelwerksanforderungen in der Praxis.

Das Projekt erfuhr während seiner Laufzeit eine Änderung seiner Zielsetzung. Zum Start war das Projektziel die Bewertung des Kenntnisstandes sowie eine vorläufige Eignungsaussage zum Standort Gorleben. Aufgrund der zwischenzeitlich angestoßenen Neuausrichtung der Standortauswahl wurde 2012 als Projektziel vereinbart, eine grundsätzliche Aussage über die Eignung der entwickelten Endlagerkonzepte zu treffen und die methodischen Instrumente auf ihre Zweckmäßigkeit für Standortvergleiche zu prüfen (Fischer-Appelt et al. 2013).

5.4.6.1 Langzeitsicherheitsanalyse Gorleben

Für den Referenzfall wurden gemäß (Beuth et al. 2012a, S. 54 f.) folgende spezifische Annahmen getroffen:

„– Die für die Standortentwicklung zugrunde zu legende Klimaentwicklung entspricht einem 100.000-Jahre-Zyklus mit einem regelmäßigen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten. Die Abfolge der Kaltzeiten vom Typ Weichsel, Elster und Saale entspricht dem vorgegebenen Klimabild. Bei dem ersten Auftreten des Kaltzeittyps Els-

ter ist die Entstehung einer glazialen Rinne zu unterstellen, die dem Verlauf der bereits auf dem Standort vorliegenden Gorlebener Rinne folgt.

- Die Schacht- und Streckenverschlüsse werden auslegungsgerecht errichtet.*
- Es liegen keine fehlinterpretierten Erkundungsergebnisse oder unerkannten geologischen Merkmale vor, die zu einer Verringerung des vorgesehenen Sicherheitsabstandes (Planung 50 m) von den Grubenbauen der Einlagerungsbereiche zu Gesteinsschichten mit möglichen größeren Lösungsvorkommen sowie zu potenziellen Fließwegen für Lösungen führen.*
- Die Erkundungssohle wird derart durch Rückbaumaßnahmen gesichert, verfüllt und mit Verschlüssen abdichtet, dass keine Wechselwirkungen mit der Einlagerungssohle zu besorgen sind.“*

Im Rahmen der dann folgenden Szenarienentwicklung wird in (Beuth et al. 2012a) je ein Referenzszenario für die drei Einlagerungsvarianten argumentativ auf der Basis der FEP-Liste der VSG hergeleitet. Aus dem postulierten Auftreten eines weniger wahrscheinlichen FEP, der weniger wahrscheinlichen Ausprägung eines wahrscheinlichen FEP oder aus Variation der getroffenen Annahmen und unter Einbezug weniger wahrscheinlicher Entwicklungen werden weitere 17 Alternativszenarien pro Einlagerungsvariante abgeleitet. Die sich ergebenden 51 Alternativszenarien werden allesamt als „weniger wahrscheinlich“ charakterisiert.

5.4.6.2 Ergebnisse der VSG

In (Kock et al. 2012) wird für das Referenzszenario und für die Alternativszenarien die Frage behandelt, ob durch die verschiedenen Einwirkungen (thermische Belastungen durch Abfälle und Eiszeiten, Gasentwicklung, etc.) Verletzungen der Salzbarriere eintreten können. Die Analyse kommt zum Ergebnis, dass die Salzbarriere hinreichend integer bleibt und dass der Nachweis der Robustheit durch Verwendung ungünstiger Annahmen ausreichend Abstand zu Versagensgrenzen aufzeigt.

In (Müller-Hoeppe et al. 2012a) wurde untersucht, ob, in welchem Umfang und wie lange Verschlussbauwerke durchlässig sind und hierüber beim Referenzszenario oder bei Alternativszenarien ein Zutritt von Wasser zu den Abfällen erfolgen kann. Die Möglichkeit hierfür wird aufgrund der Auslegungsmerkmale und der Bemessung solcher Bauwerke ausgeschlossen.

In (Müller-Hoeppe et al. 2012b) wurde speziell die Zuverlässigkeit der vorgesehenen Schachtverschlüsse analysiert. Auch durch diese technische Komponente wird die Integrität der geologischen Barriere nicht kompromittiert.

(Larue et al. 2013) führen für die betrachteten Szenarien radiologische Konsequenzanalysen durch. Ziel dieser Analysen ist der Nachweis der Geringfügigkeit des aus dem ewG ausgehenden Inventars²⁸, eine Dosisberechnung auf der Basis

²⁸ Der Nachweis der Geringfügigkeit ist als Alternative zur Dosiskalkulation in /BMU 2010/ eröffnet. Er ist zulässig, wenn gezeigt werden kann, dass es lediglich einem begrenzten Inventar gelingt, den Einschlussbereich in Richtung Biosphäre zu verlassen. Für diese Menge wird eine radiologisch motivierte Begrenzung vorgegeben. Wird der Nachweis so geführt, können die Betrachtung der Ausbreitung bis zur Biosphäre und das Biosphärenmodell gänzlich entfallen.

einer Modellierung des Transfers zur und innerhalb der Biosphäre erfolgt daher nicht. Wie für die Endlagerung in einem undurchlässigen Wirtsgestein nicht anders zu erwarten, gehen als entscheidende Parameter für die Höhe des Austrags aus der Analyse die Durchlässigkeitscharakteristika der technischen Barrieren hervor. Für lösungsgebundene Freisetzungen kann nach (Larue et al. 2013), dass das Geringfügigkeitskriterium eingehalten wird. Für die Freisetzung von gasförmigen Radionukliden kann die Einhaltung des Geringfügigkeitskriteriums in der frühen Nachverschlussphase mit dem vereinfachten Ansatz nur gezeigt werden, wenn für die endlagerten Strukturteile aus der Wiederaufarbeitung unterstellt wird, dass diese in gasdichte Behälter verpackt werden (Larue et al. 2013, S. 179). Hinsichtlich der Nachweisführung für gasförmige Radionuklide wird auch methodischer Forschungsbedarf aufgezeigt.

(Fischer-Appelt et al. 2013) fassen die Ergebnisse des Vorhabens in einem Synthesebericht zusammen. Als Grundanforderungen werden dort der Einschluss, die Integrität, die Wartungsfreiheit und der Kritikalitätsausschluss herausgearbeitet und dafür Konsequenzen identifiziert.

In (Fischer-Appelt et al. 2013) wird zusammenfassend folgender F&E-Bedarf identifiziert und näher beschrieben:

- Kohlenwasserstoffvorkommen im Hauptsalz,
- Behälter- und Rückholungskonzepte,
- Einlagerungsbetrieb,
- Verschlussbauwerke,
- Hydraulische und mechanische Eigenschaften von Salzgrusversatz,

- Modellierung sicherheitsrelevanter Prozesse.

In (Thomauske et al. 2013) ist der F&E-Bedarf noch detaillierter herausgearbeitet. Die Zusammenstellung benennt 15 Empfehlungen und schließt mit der Bewertung:

„Der nicht unerhebliche Bedarf weiterer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten macht deutlich, dass bis zur genehmigungsreifen Realisierung eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle noch intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten anstehen.“

5.5 Fazit

Bezüglich der Vorgehensweise bei der Anfertigung von Langzeitsicherheitsanalysen und bei der Führung des entsprechenden Nachweises liegen international zahlreiche und umfangreiche Erfahrungen vor, einige Beispiele werden hier etwas näher beschrieben, wobei die Ausführungen notwendigerweise an der Oberfläche bleiben und z. B. nur Referenzfälle darstellen. Andere, vom Referenzfall abweichende Fälle liegen bei allen Analysen in großem Umfang ebenfalls vor und geben Einblick in die Sensitivität der Analysen, und damit die Robustheit der Ergebnisse.

Zum Langzeitsicherheitsnachweis ist aus Sicht der Autoren dieses Berichts insgesamt Folgendes festzustellen:

1. Nur wenn der Nachweis über den dauerhaft wirksamen Einschluss geführt werden kann, darf ein geologisches Endlager an dem entsprechenden Standort realisiert und mit der Errichtung begonnen werden. Diese Anforderung ist unabhängig von einer eventuellen Rückholbarkeit einzuhalten und nachzuweisen. Im Rahmen einer sukzessi-

ven Auffahrung der Einlagerungsbereiche kann es ggf. erforderlich sein, Nachweise, die auf Erkenntnissen über Details der geologischen Gegebenheiten vor Ort basieren, erst nach der Errichtung bzw. der Aufnahme des Betriebs zu vertiefen oder zu vervollständigen.

2. Um die notwendigen vertieften Standortkenntnisse zu erarbeiten, wurden z. B. in Belgien, Frankreich und Finnland sogenannte Untertagelabors zur Erkundung eingerichtet. Untertagelabors können neben der Standorterkundung auch der wissenschaftlichen Untersuchung sicherheitsrelevanter Prozesse und der Erprobung und Demonstration von Einlagerungs- und Verschlusstechniken dienen. Neben so genannten standortspezifischen Untertagelabors werden in einer Reihe von Ländern (z. B. Frankreich – Tournemire, Schweden – Äspö, Schweiz – Grimsel und Mont Terri) auch so genannte generische Untertagelabors an Standorten betrieben, die nicht für die Endlagerung radioaktiver Abfälle vorgesehen sind.
3. Bei Endlagertypen, die weder über einen zuverlässigen geologischen Einschlussmechanismus noch über langzeitwirksame technische Vorkehrungen verfügen, wird das Konzept des Konzentrierens und Einschließens verletzt, ggf. ist mit einer dauerhaften Freisetzung von langlebigen Radionukliden in mehr als geringfügigem Umfang zu rechnen. Der Sicherheitsbegriff geht bei der Endlagerung über die reine Compliance mit Strahlenexpositionsgrenzwerten hinaus und erfordert den dauerhaften Einschluss des überwiegenden Teils des endgelagerten Inventars.
4. Der Safety Case bildet eine Basis für Entscheidungen, die an bestimmten Haltepunkten in einem schrittweisen Ent-

wicklungsprozess (z. B. Übergang von über- zu unterirdischer Standorterkundung, Feststellung der Standorteignung, Beginn der Errichtung oder des Einlagerungsbetriebes, Verschluss und Rückbau) zu treffen sind. Hierfür ist es notwendig, dass der Safety Case auf der Basis der fortschreitenden Standorterkundung und Endlagerentwicklung gemäß des Standes von Wissenschaft und Technik schrittweise weiterentwickelt und aktualisiert wird und das Erreichte wie auch das noch zu Erreichende (z. B. offene wissenschaftliche Fragen und Pläne, wie diese zu lösen sind) darstellt. Dadurch wird beispielsweise für bestehende Ungewissheiten deutlich, ob diese vor allem einem frühen Planungsstadium zuzuschreiben und durch vertiefende Untersuchungen in den folgenden Schritten zu beheben sind, oder ob sie eher grundsätzlicher Art, z. B. modellbedingt sind.

6 Safeguards und Risiko der nuklearen Proliferation

In alle Endlager gelangen auch spaltbare Stoffe. Spaltbare Stoffe unterliegen in Nicht-Kernwaffenstaaten wie Deutschland gemäß den eingegangenen internationalen Verpflichtungen der Proliferationsüberwachung.

Sind die spaltbaren Stoffe in eine umfangreiche Abfallmatrix eingebunden, aus der sie nur durch technisch aufwändige Verfahren wieder abgetrennt werden können (z. B. als Spurenteil in einer schwach- oder mittelradioaktiven Abfallart in zementierter Form oder als geringer Plutoniumgehalt in einer Glaskokille mit Spaltprodukten), dann kann von einer Überwachung dieser Abfälle abgesehen werden (Geringfügigkeits-

schwelle). Bei allen anderen radioaktiven Abfällen mit Gehalten an spaltbaren Stoffen oberhalb solcher Schwellenkonzentrationen unterliegen diese der Proliferationsüberwachung, kurz auch als Safeguards bezeichnet.

Für das Verständnis von Safeguardsüberwachung ist es wesentlich, dass diese

1. nicht auf die Verhinderung von Abzweigungen spaltbarer Stoffe ausgerichtet ist, sondern auf deren frühzeitige Entdeckung (Eingriffe oder Sanktionen hierzu sind der UN bzw. dem Sicherheitsrat der UN vorbehalten) und
2. sich nicht auf radioaktive Stoffe allgemein bezieht sondern nur solche Stoffe erfasst, die sich zur militärischen Verwendung als Spaltstoffe eignen (im Wesentlichen Uran, Plutonium, Thorium).

In diesem Kapitel werden ausgewählte Aspekte der Proliferationsüberwachung bei Endlagern diskutiert.

6.1 Ziele der Proliferationsüberwachung

In zwei Advisory Group Meetings (1988 und 1997) und zwei Consultants Meetings (1991 und 1995) bei der IAEA wurde ein internationaler Konsens hinsichtlich der Überwachung von Endlagerung durch Safeguards gefunden, der die folgenden Kernaussagen enthält (Küppers 2008):

- Die direkte Endlagerung von ausgedienten Kernbrennstoffen erlaubt keine Beendigung der Safeguardsmaßnahmen.
- Eine Beendigung der Safeguardsmaßnahmen ist nicht möglich, sondern die internationale Überwachung ist so

lange fortzuführen, wie es die Institution zur Überwachung gibt.

- Die Überwachungsmaßnahmen sind den geologischen und technischen Gegebenheiten eines Endlagers anzupassen. Dabei haben die Sicherheitsaspekte Vorrang vor den Safeguardsaspekten.
- Die Überwachungsmethoden sollen durch weitere F&E-Arbeiten dem Stand von Wissenschaft und Technik angepasst werden.

Diese Ziele werden nachfolgend detaillierter betrachtet.

6.2 Proliferationsüberwachung von Endlagern

Eine Besonderheit der Endlagerung abgebrannter Brennelemente, im Unterschied zu hochradioaktiven verglasten Abfällen, wird oft darin gesehen, dass die reine Endlagerung von Glaskokillen nur geringe Plutoniumreste im Endlager deponieren würde, die unter das Geringfügigkeitskriterium (siehe oben) fielen. Dies wurde angeführt, um zu begründen, weshalb das Proliferationsproblem bei der Endlagerung sich nur dann ergäbe, wenn der Weg über die Direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente gewählt werde (wie er seit 2005 als Regelentsorgung in Deutschland gilt).

Dies ist nur auf den ersten Blick plausibel, denn das Problem der Proliferationsüberwachung stellt sich bei der Endlagerung generell. Das Problem ist weltweit zu lösen, da nur wenige Länder tatsächlich Wiederaufarbeitung betreiben und selbst dann meist nur Teile der anfallenden Brennstoffe tatsächlich aufgearbeitet werden.

Außerdem beschränkt sich die Wiederaufarbeitung bisher auf einen Brennelement-Zyklus, da für Brennelemente mit Plutonium aus der Wiederaufarbeitung (MOX-Brennelemente) oder mit wiederaufgearbeitetem Uran (WAU-Brennelemente) der Abtrennungsaufwand steigt: Der spaltbare Anteil an Pu und U, der wieder zurückgewonnen werden könnte, ist sehr niedrig. Zudem nimmt der Anteil unerwünschter Bestandteile zu, u.a. die Isotope Uran-232 (starker Gammastrahler, der die Handhabung erschwert) und Uran-236 (ungünstiger Einfluss auf die Reaktivität aufgrund neutronenabsorbierender Eigenschaften), so dass sich technologisch und wirtschaftlich nachteilige Effekte ergeben (siehe z. B. Kirchner et al. 2015). Die aus wiederaufgearbeitetem Material hergestellten MOX- oder WAU-Brennelemente mit den darin enthaltenden Spaltmaterialien werden also auch dem Endlager zugeführt, so dass selbst bei „vollständiger“ Wiederaufarbeitung aller aus „frischen“ Uran hergestellten Brennelemente eine Proliferationsüberwachung des Endlagers erfolgen müsste.

Hinzu kommen noch jene Brennelementmengen, die aus technischen Gründen gar nicht oder nur mit einem erheblichen Mehraufwand wiederaufgearbeitet werden können (wie z. B. verbogene Stäbe oder Brennelemente oder ungewöhnliche Brennstoffarten wie z. B. HTR-Kugeln, für die keine kommerzielle Wiederaufarbeitung existiert) sowie erhöht spaltstoffhaltige Abfälle (wie z. B. Abfälle aus der BE-Herstellung oder abgereichertes Uran), mit denen ebenfalls Abfallarten in das Endlager gelangen, die eine Proliferationsüberwachung erforderlich machen.

Die Proliferationsüberwachung in Endlagern muss daher auf jeden Fall erfolgen, da die Endlagerung abgebrannter Brennelemente weltweit als Regelentsorgung etabliert ist und in jedem Fall große Mengen spaltbarer Materialien in die Endlager

gelangen werden. Die Entwicklung entsprechender Safeguardsregimes in Endlagern ist daher in jedem Fall international erforderlich.

6.3 Die Proliferationsattraktivität von Endlagern

In nahezu allen historischen Fällen stammte die initiale Quelle spaltbarer Stoffe aus im Inland verfügbarem oder aus dem Ausland beschafftem Natururan. Die Attraktivität von Endlagern als Quelle spaltbaren Materials und die Entdeckungskarakteristika eines möglichen Zugriffs auf das endgelagerte spaltbare Material müssen daher an dieser ursprünglichen Beschaffungsform gemessen werden.

Zunächst ist ein typischer Unterschied, dass Endlager grundsätzlich in größerer Tiefe errichtet werden, während man den erheblichen Mehraufwand des Bergbaus in vergleichbaren Tiefen bei der Urangewinnung zu vermeiden sucht.

Die Erzgewinnung und –aufbereitung unterliegt beim Uran keinen aktiven Überwachungsmaßnahmen, es ist lediglich eine jährliche Meldung von produzierten Mengen an die IAEA zu übermitteln.

Die Erzgewinnung erfolgt beim Uranabbau unter mäßigen Strahlenschutzanforderungen (wie z. B. unter wirksamer Belüftung und Abschirmung der Direktstrahlung durch Abstand). Die Entdeckung einer Abzweigung ist dadurch erschwert, da überwiegend Radonfolgeprodukte emittiert werden, wie sie auch aus allen natürlichen Böden ausgasen.

Bei der Bergung endgelagerter Behälter wäre wegen der Beschädigungs- und Freisetzungsfahr beim Freilegen und Aufnehmen der Behälter ein erheblicher Mehraufwand im Vergleich zum Uranabbau zu treiben. Bei solchen Ereignissen

wäre die Freisetzung von gasförmigen Spaltprodukten (wie z. B. Cs-137, Kr-85) sorgfältig zu unterbinden, da diese zur Entdeckung der Abzweigung führen könnten.

Ähnlich wie bei der Urangewinnung ist auch in diesem Fall das unbearbeitete Produkt noch nicht einsatzbereit. Während die Abtrennung von Natururan aus gefördertem Erz ein vergleichsweise einfaches Verfahren darstellt, zu dessen Ausführung handelsübliche Technik und auch nur gängige Industriechemikalien wie Schwefelsäure, Soda oder Natronlauge erforderlich sind, ist die Abtrennung von Plutonium und Uran aus abgebranntem Brennstoff wesentlich anspruchsvoller und erfordert z. B. wirksame Abschirmung und sehr spezifische Extraktionsmittel. Da dabei auf jeden Fall jede Emission von Spaltprodukten unter einem sehr niedrigen Niveau gehalten werden müsste, um Entdeckung zu vermeiden, ergibt sich auch im Zusammenhang mit den hohen Dosisleistungen bei dem Vorhaben eine anspruchsvolle Aufgabe.

Für die Gewinnung spaltbarer Materialien aus einem Endlager spricht, dass dabei direkt Plutonium auf chemischem Wege isoliert werden kann und der Umweg über Anreicherung, Bestrahlung und anschließende Aufarbeitung wie beim Uran vermieden werden kann. Allerdings muss dabei je nach Alter des Brennstoffes unter intensiver Direktstrahlung gearbeitet werden.

Weitere Verarbeitungsschritte (wie die Reinigung, Konversion und Anreicherung oder die Überführung in geeignete metallische Formen) sind bei beiden Wegen ähnlich, daher sind diese Nachfolgestufen nicht mehr bewertungsrelevant.

Insgesamt ist daher ein Endlager im Vergleich zur Gewinnung von Natururan weniger attraktiv. Bei beiden Varianten sind die

Möglichkeiten zur Entdeckung der Abzweigungsaktivitäten ähnlich gegeben, beim Endlager als Quelle sogar noch etwas vielfältiger und aussichtsreicher.

6.4 Ansätze zur Entwicklung von Proliferationsüberwachung bei Endlagern

In Deutschland fallen folgende Materialien in Endlagern an, die überwachungspflichtig sind (Küppers 2008):

- Abgebrannte Brennelemente aus Leichtwasserreaktoren (Uran- und MOX-Brennelemente),
- abgebrannte Brennelemente aus Hochtemperaturreaktoren (THTR und AVR), die teils auch Thorium und hochangereichertes Uran enthalten,
- abgebrannte Brennelemente aus Forschungsreaktoren, die teils hochangereichertes Uran enthalten,
- unbestrahlte Brennstoffe, die aufgrund von Fertigungsfehlern oder nicht mehr möglicher Nutzung endgelagert werden,
- nicht mehr benötigtes Thorium,
- abgereichertes Uran,
- wiederaufgearbeitetes Uran.

Safeguardsüberwachung in einem Endlager ist dadurch gekennzeichnet, dass die spaltbaren Stoffe ausschließlich in verschlossenen Behältern vorhanden sind. Beim Verpackungsschritt in diese Behälter werden Art und Menge der verpackten Spaltstoffe eindeutig festgestellt und dem Behälter zugeordnet, so dass die Überwachung im Endlager sich auf Identitätsüberprüfungen beim Behältereingang und über den

Behälterverbleib in den jeweiligen Bilanzierungszonen beschränken kann.

In ein Endlager werden viele unterschiedliche Abfälle eingelagert. Vorteilhaft ist es aus Sicht der Proliferationsüberwachung gemäß (Küppers 2008), wenn die Einlagerung von Brennelementen in einem separaten Teil des Endlagers erfolgt, da dann der zu überwachende Teil eingegrenzt werden kann.

Sind Behälter eingelagert und in einem unzugänglichen Zustand (z. B. nach Verfüllung eines bestückten Einlagerungsbereichs), kann sich die Proliferationsüberwachung auf die Verifikation beschränken, dass dieser Einlagerungsbereichs nicht erneut mit bergtechnischen Mitteln aufgefahren wird.

Beim final verfüllten und verschlossenen Endlager kann sich die Verifikation darauf beschränken, ob Hinweise für eine erneute Zugänglichmachung des Endlagerbereichs vorliegen. Dies kann durch geodätische Vermessung, mit Methoden der Luft- oder Satellitenüberwachung oder mittels geophysikalischer Verfahren wie z. B. seismischer Überwachung erfolgen. Weitere Methoden sind in der Diskussion und Prüfung.

Bei Optionen, bei denen Behälter über längere Zeiträume in einem leicht zugänglichen Zustand gehalten werden sollen, sind solche Vereinfachungen des Überwachungsregimes nicht möglich. Hierbei sind die Behälteridentifikation und die physische Überwachung der Behälter weiter aufrecht zu erhalten, solange diese leicht zugänglich vorliegen.

7 Unterschiede der Endlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit gegenüber den Charakteristika mit erweiterter Rückholbereitschaft

Gemäß den Sicherheitsanforderungen für Endlager (BMU 2010) hat der Betreiber eines Endlagers Vorkehrungen zur Rückholung von Gebinden in seinen Planungen vorzusehen (BMU 2010).

„8.6 Abfallbehälter müssen unter Berücksichtigung der darin verpackten Abfallprodukte und des sie umgebenden Versatzes folgende Sicherheitsfunktionen erfüllen:

- Für die wahrscheinlichen Entwicklungen muss eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzen radioaktiver Aerosole zu beachten.*
- In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein.*

Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung oder Bergung getroffen werden, dürfen die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen.“

Damit werden einerseits Anforderungen an die Dauerhaftigkeit und Handhabbarkeit von Endlagerbehältern definiert, andererseits wird festgelegt, dass die Langzeitsicherheitsbarrieren höchste Priorität genießen und durch Vorkehrungen zur Rückholbarkeit nicht kompromittiert werden dürfen.

Gegenüber dieser Form der Rückholbarkeit werden in der Öffentlichkeit auch andere Formen diskutiert. Darunter sind z. B. solche Formen, bei denen Rückholung zur Grundausslegung gehört und z. B. die erleichterte Rückholung von Behältern aus Einlagerungshohlräumen oder die dauerhafte (Teil-)Offenhaltung des Endlagers für eine lange Zeitperiode nach Beendigung der Einlagerung erfordern (Endlagerkommission 2016). Es ist auch anzumerken, dass neben Deutschland auch eine Reihe weiterer in diesem Bericht dargestellter Endlagerprojekte (z. B. Frankreich, Schweiz) Rückholbarkeit in unterschiedlichen Formen vorsehen. Einen Überblick zu Aspekten der Rückholbarkeit findet man in (OECD/NEA 2011).

Aufgrund dieses breiten Interpretationsspektrums über Rückholbarkeit sind genaue Definitionen erforderlich. Dazu eignen sich u.a. die Fragen, welche Erkenntnisse in dem fraglichen Zeitraum gewonnen werden sollen und können, welche Methoden dazu genutzt werden sollen, welche Fragestellungen im Zeitraum der vorzusehenden Rückholbarkeit zu klären sind, die sich einer früheren und abschließenden Klärung schon im Vorlauf der Planungs- und Errichtungszeit des Endlagers entziehen und ausschließlich in-situ geklärt werden können.

In Tabelle 7-1 wird die Option ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit im Hinblick auf ausgewählte Stichworte oder Aspekte charakterisiert. Für diese wird ferner gegenübergestellt, welche dieser typischen Eigenschaften sich verändern, wenn eine generische Option mit erweiterter Rückholbarkeit einschließlich einer verlängerten Offenhaltung von Einlagerungsbereichen und Zugängen verfolgt werden soll. Die Konsequenzen, die sich aus der Verfolgung einer solchen Option gegenüber der Option ohne Rückholbarkeit ergeben, sind in Tabelle 7-1 in der vierten Spalte charakterisiert.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die hier untersuchenden Rückholbereitschaftsoptionen nicht den in Deutschland geltenden Sicherheitsanforderungen für Endlager genügen, da sie teilweise gegen diese Anforderungen klar verstoßen.

Auch erhebt die Gegenüberstellung nicht den Anspruch, alle Teilbereiche im Detail und vollständig zu analysieren. Vielmehr soll sie schlaglichtartig anhand zentraler Aspekte zeigen, welche Konsequenzen sich durch Vorkehrungen für eine erweiterte Rückholbarkeit ergeben können und worauf bei entsprechenden Diskursen ein Augenmerk zu richten wäre.

Tabelle 7-1: Gegenüberstellung von Auslegungsmerkmalen eines Endlagers ohne Rückholbarkeit und einer alternativen Option mit erweiterter Rückholbarkeit

Teilbereich, Aspekt	Charakteristik, Auslegungsmerkmal für Endlagerung ohne Rückholbarkeit	Alternative mit erweiterter Rückholbarkeit	Differenz, Konsequenzen
Endlagerbehälter	Handhabbarkeits- und Dichtheitsanforderungen bis zum gasdichten Verschluss der Einlagerungsteilstrecke	Handhabbarkeits- und Dichtheitsanforderungen bis zum Ende der definierten Rückholperiode	Erhebliche Auslegungsunterschiede, ungewöhnliche Anforderungen an die Überwachbarkeit, je nach Zeitraum und Konzept Notwendigkeit von aufwändigen Reparaturen
	Materialanforderungen vergleichbar zu Transport- und Lagerbehältern, da relevanter Zeitraum auf wenige Jahre begrenzt (Beladung der Behälter, Einlagerung bis Verschluss der Einlagerungsteilstrecke)	Material muss bis zum Ende der Rückholperiode gegen Korrosion immun sein	In aggressiven Wirtsgesteinen (Salz) erhebliche Anforderungsunterschiede an Materialien

Teilbereich, Aspekt	Charakteristik, Auslegungsmerkmal für Endlagerung ohne Rückholbarkeit	Alternative mit erweiterter Rückholbarkeit	Differenz, Konsequenzen
Einlagerungstechnik	Sicherheitsziel möglichst frühzeitige, vollständige Verfüllung des Einlagerungshohlraums und der Einlagerungsstrecken um möglichst raschen Einschluss der Abfälle zu erreichen (Konvergenz, Setzungen, Ausnutzung des Quelldrucks bei Tonverfüllung)	Offenhaltung des Spalts, des Einlagerungsraums, der Strecken und / oder der Schächte bis zum Ende der definierten Rückholperiode	Erhöhtes Risiko gegenüber ungeplanten Ereignissen in der Betriebsphase, verlängertes Risiko bis zum Ende der Rückholperiode plus Verfüll-, Verschluss- und Konvergenz-/Setzungszeit
Grubenbaue	Stabilität ist nur bis zum (Teil-)Verschluss zu gewährleisten	Ggf. Ausbau und Instandhaltung sowie Drainage und Bewetterung über längeren Zeitraum erforderlich	Ggf. erhöhte Risiken bzgl. der Stabilität und der späteren Barriereinintegrität
Naturbedingte Einwirkungen	Betriebsdauer vergleichbar zu anderen kerntechnischen Anlagen (ca. 40 Jahre), Auslegung gegen EVA nach üblichem kerntechnischem Regelwerk	Verlängerte Betriebsdauer je nach definierter Rückholperiode, Regelwerksanpassung an den längeren Zeitraum erforderlich	Inhaltliche und formelle Anpassung an geänderte Anforderungen erforderlich

Teilbereich, Aspekt	Charakteristik, Auslegungsmerkmal für Endlagerung ohne Rückholbarkeit	Alternative mit erweiterter Rückholbarkeit	Differenz, Konsequenzen
Menschliche Einwirkungen	Vergleichbar mit üblichen kerntechnischen Anlagen mit Behälterhandhabung unter robustem Einschluss	Verlängerte Betriebsdauer senkt Vorhersagbarkeit/Planbarkeit und kann mit erhöhter Einwirkungsschwere einhergehen	Erhöhtes Risiko wegen langer Betriebsdauer
Personalverfügbarkeit, Kompetenzerhalt	Sensitive Größe, da Betriebsdauer den Zeitraum überschreitet, über den auch andere kerntechnische Einrichtungen noch in Betrieb sind (Singularität, kein Rückgriff auf Ressourcen anderer Betreiber mehr möglich, hohe Abhängigkeit von kerntechnischer, strahlenschutztechnischer und bergtechnischer Kompetenzverfügbarkeit)	Erhebliche und dauerhafte Singularität der Anlage, kein Rückgriff auf ähnliche Anlagen oder Zulieferer möglich	Signifikant erhöhtes Risiko

Teilbereich, Aspekt	Charakteristik, Auslegungsmerkmal für Endlagerung ohne Rückholbarkeit	Alternative mit erweiterter Rückholbarkeit	Differenz, Konsequenzen
Anforderungen an den Sicherheitsnachweis und die Genehmigung	<p>Systematische Untersuchung aller sicherheitsrelevanten Aspekte von Betrieb bis Nachbetrieb, regelmäßige Aktualisierung auf dem jeweiligen neuesten Stand. Vollständige Abarbeitung und Bewertung aller Sicherheitsfragen einschließlich Ungewissheiten</p>	<p>Gefahr, dass die zwingende Notwendigkeit auch die Nachbetriebsphase frühzeitig umfassend zu bewerten nicht mehr gesehen wird, da Rückholbarkeit grundsätzlich die Perspektive zur Korrektur eröffnet</p>	<p>Gefahr, die Klärung offener Sicherheitsfragen in die Zukunft zu verschieben und mit der Einlagerung zu beginnen, ohne dass eine abschließende Bewertung der Langzeitsicherheit erfolgt ist.</p>
Akzeptanz, gesellschaftlicher Konsens	<p>Die Risikoabwägung, bestehend aus der Frage ob der Sicherheitsnachweis mit hinreichender Sicherheit geführt ist und ob es Alternativen gibt, die mit geringerem Risiko einhergehen, ist abschließend zu führen und ein gesellschaftlicher Konsens über deren Ausgang herbeizuführen</p>	<p>Die beiden Fragen können bis zur abschließenden Verschlussentscheidung offen bleiben, ohne dass die Notwendigkeit dafür besteht, darüber eine gesellschaftliche Diskussion zu führen und eine definitive Entscheidung herbeizuführen zu müssen</p>	<p>Die Risikodiskussion wird nicht abschließend geführt und wesentliche Entscheidungen auf zukünftige Generationen verschoben.</p>

Die Endlagerung in geologischen Formationen ohne Rückholbarkeit ist ein Konzept, das in hohem Maße auf die die passive

Sicherheit durch frühzeitige Funktionsfähigkeit der geologischen und geotechnischen Barrieren setzt. Die Tabelle zeigt, dass Änderungen dieses Konzepts, um eine (längerfristige) Rückholbarkeit der Abfälle zu gewährleisten, in der Konsequenz zu besonderen Anforderungen, hinsichtlich einiger Aspekte auch zu einem erhöhten Risiko für den dauerhaft sicheren Einschluss, führen können. Anhand dieser Gegenüberstellung wird auch deutlich, dass ein Endlagerkonzept nicht alle potenziell wünschenswerten Ziele gleich gut abdecken kann. Dies gilt insbesondere, wenn es sich um so widersprüchliche Anforderungen wie passive Sicherheit einerseits und flexible Interventionsmöglichkeiten andererseits handelt. Wichtig ist daher die gesellschaftliche Verständigung auf die primären Ziele sowie auf Kompromisslinien, wo widersprüchliche Anforderungen nicht aufgelöst werden können.²⁹ Technische Konzepte und Lösungen sind dann maßgeschneidert entlang der vereinbarten Ziele zu entwickeln.

²⁹ Die Endlagerkommission empfiehlt für Deutschland die Entsorgungsoption „Endlagerbergwerk mit Reversibilität“, siehe (Endlagerkommission 2016, S. 233 ff.)

Literaturverzeichnis

- AkEnd 2002 Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AkEnd, o.O., Dezember 2002
- Alt et al. 2016 Alt, S.; Kallenbach-Herbert, B.; Ustohalova, V.: Bewertung der Einführung einer wirtsgesteinsunabhängigen Grenztemperatur unter Vorsorgeaspekten – Rev. 02. Darmstadt. 31.10.2016
- Andersson 1989 Andersson, A. (ed.): The Joint SKI/SKB Scenario Development Project; SKB Technical Report 89-35, December 1989
- ANDRA 2005 Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) : Tome Safety evaluation of a geological repository. – Paris, Decembre 2005
- AtVfV 2006 Verordnung über das Verfahren bei der Genehmigung von Anlagen nach §7 des Atomgesetzes (Atomrechtliche Verfahrensverordnung – AtVfV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. Februar 1995 (BGBl. I S. 180), die zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 9. Dezember 2006 (BGBl. I S. 2819) geändert worden ist
- Baltes/Röhlig 2009 Baltes, B.; Röhlig, K.-J.: Das Konzept des Safety Case und die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland – atw 2009
- Barth/Schulze 2008 Barth, R.; Schulze, F.: Rechtliche Rahmenbedingungen bei der Endlagerung. – Anhang „Rechtsgrundlagen“ zum Hauptband „Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in Deutschland“, Braunschweig/Darmstadt, 30.09.2008
- BbergG 2015 Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), das zuletzt durch Artikel 303 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist

- Beuth et al. 2012a Beuth, T.; Bracke, G.; Buhmann, D.; Dresbach, C.; Keller, S.; Krone, J.; Lommerzheim, A.; Mönig, J.; Mrugalla, S.; Rübel, A.; Wolf, J.: Szenarienentwicklung:- Methodik und Anwendung. – Bericht zum Arbeitspaket 8 – Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS–284, 2012
- Beuth et al. 2012b Beuth, T.; Baltés, B.; Bollingerfehr, W.; Buhmann, D.; Charlier, F.; Filbert, W.; Fischer-Appelt, K.; Mönig, J.; Rübel, A.; Wolf, J.: Untersuchungen zum menschlichen Eindringen in ein Endlager – Bericht zum Arbeitspaket 11 – Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, 2012
- BfS 2005 Bundesamt für Strahlenschutz: Konzeptionelle und sicherheitstechnischen Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Wirtsgesteine im Vergleich. Synthesebericht. Salzgitter, 04.11.2005
- BGR 2007 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland. Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen. – Hannover/Berlin, April 2007
- BMU 2010 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, September 2010
- Bollingerfehr et al. 2011 Wilhelm Bollingerfehr, W.; Herklotz, M.; Herzog, C.; Jobmann, M. ; Lommerzheim, A.; Weiß, E.; Wolf, J.; Ziegenhagen, J.; Hammer, J.; Sönneke, J.; Mingerzahn, G.: Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für Endlager in tiefen geologischen Formationen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen (EUGENIA). Synthesebericht. DBE TECHNOLOGY GmbH Peine, 2011

- Brasser 2008 Brasser, T.; Herbert, H.J.; Mieke, R.: Das geologische Endlagersystem: Gebirgsverhalten und Erkundungsmethoden. – Anhang „Standorterkundung“ zum Hauptband „Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in Deutschland“, Braunschweig/Darmstadt, 30.09.2008
- Buhmann et al. 2008 Buhmann, D.; Mönig, J.; Wolf, J.; Heusermann, S.; Keller, S.; Weber, J.; Bollingerfehr, W.; Filbert, W. Kreienmeyer, M.; Krone, J.; Tholen, M.: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW - ISIBEL.- Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR); DBE TECHNOLOGY GmbH, April 2008
- CoRWM 2006: Managing our Radioactive Waste Safely, CoRWM's recommendations to Government, July 2006
- DAEF 2017 Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (DAEF): Standortauswahl für ein Endlager für insbesondere Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle: Empfehlungen der DAEF zu Rolle und Methodik der im Standortauswahlgesetz vorgesehenen Sicherheitsuntersuchungen. Im Erscheinen
- DBE Tec 2016 DBE TECHNOLOGY GmbH: Gutachten Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde hoch radioaktive Abfälle. Im Auftrag der „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfälle. Veröffentlicht als Kommissions-Material K-MAT 58, ohne Datum
- Endlagerkommission 2016 Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe: Abschlussbericht – Verantwortung für die Zukunft. Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Kommissionsdrucksache K-Drs. 268. Berlin. 05.07.2016
- ESK 2015 Entsorgungskommission: Leitlinie zum sicheren Betrieb eines Endlagers für insbesondere Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle; Empfehlung der Entsorgungskommission. o.O., 10.12.2015

- EU 2013 Richtlinie 2013/59/EURATOM des Rates vom 5. Dezember 2013, zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung und zur Aufhebung der Richtlinien 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom und 2003/122/Euratom. Amtsblatt der Europäischen Union vom 17.1.2014
- Fein et al. 2008 Fein, E.; Müller-Lyda, I.; Rübél, A.: Die Methodik zur Durchführung von Langzeitsicherheitsanalysen für geologische Endlager. – Anhang „Langzeitsicherheitsanalysen“ zum Hauptband „Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland“, Braunschweig/Darmstadt, 30.09.2008
- Fischer-Appelt et al. 2013 Fischer-Appelt, K.; Baltés, B.; Buhmann, D.; Larue, J.; Mönig, J.: Synthesebericht für die VSG – Bericht zum Arbeitspaket 13 – Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS–290, März 2013
- Frishman 2014 Frishman, S.: The Role of Geology at the Proposed Yucca Mountain Nuclear Waste Repository – Overview of the Storage of High-Level Nuclear Waste at Yucca Mountain. – UNLV – October 16, 2014
- Golder 2011 Golder Associates / IfG: Glazigene Beeinflussung von Wirtsgesteinstypen Ton und Salz und deren Einflüsse auf die Eignung zur Aufnahme eines HAW-Endlagers – Abschlussbericht -. Celle, 10.10.2011
- GRS 2016 Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit: Performance Assessment of Sealing Systems. Conceptual and integrated modelling of plugs and seals, o.O., August 2016
- Hansen et al. 2010 Hansen, C.W.; Knowles, M.K.; MacKinnon, R.J.; Sevougian, S.D.; Swift, P.N.: Summary of the Total System Performance Assessment for Yucca Mountain License Application. – Presentation to PSAM, Sandia National Laboratories, Albuquerque/Las Vegas 2010

- IAEA 2011 International Atomic Energy Agency (IAEA): Disposal of Radioactive Waste – Specific Safety Requirements. SSR-5, Vienna, 2011
- IAEA 2012 International Atomic Energy Agency (IAEA): The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste – Specific Safety Guide, SSG-23, Vienna, 2012
- ICRP 2013 Radiological Protection in Geological Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste. International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 122, Ann. ICRP 42 (1)
- KfK 1989 Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK): Systemanalyse Mischkonzept – Karlsruhe 1989
- Kirchner et al. 2015 Kirchner, G. (Zentrum für Naturwissenschaften und Friedensforschung, Uni Hamburg), Englert, M.; Pistner, C.; Kallenbach-Herbert, B.; Neles, J. (Öko-Institut): Gutachten „Transmutation“, für die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Hamburg/Darmstadt, 08.12.2015
- Kock et al. 2012 Kock, I.; Eickemeier, R.; Frieling, G.; Heusermann, S.; Knauth, M.; Minkley, W.; Navarro, M.; Nipp, H.-K.; Vogel, P.: Integritätsanalyse der geologischen Barriere – Bericht zum Arbeitspaket 9.1. GRS – 286, o.O. 2012
- Küppers 2008 Küppers, C.: Safeguards in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle. – Anhang „Safeguards“ zum Hauptband „Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland“, Braunschweig/Darmstadt, 30.09.2008

- Larue et al. 2010 Larue, J; Kock, I.; Seher, H.: Entwicklung eines synthetischen Tonsteinstandortes. Teil 1: Randbedingungen und Anforderungen an einen Tonsteinstandort. Abschlussbericht zum Vorhaben 3607R02538 „Untersuchung aktueller planerischer Grundsatzfragen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen _Formationen (VerSi Endlagerung im Tonstein), Dezember 2010
- Larue et al. 2013 Larue, J.; Baltés, B.; Fischer, H.; Frieling, G.; Kock, I.; Navarro, M.; Seher, H.: Radiologische Konsequenzenanalyse – Bericht zum Arbeitspaket 10 – Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. -. o.O. 2013
- Lommerzheim et al. 2014 Lommerzheim, A.; Bebiolka, A.; Jahn, S.; Jobmann, M.; Maßmann, J.; Meleshyn, A.; Mrugalla, S.; Reinhold, K.; Rübel, A.; Stark, L.: Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein (AnSichT). – In: PT-WTE: Endlagerforschung - 11. Projektstatusgespräch zu BMWi-geförderten FuE-Projekten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle, Karlsruhe, KIT Campus Nord, 25. - 26.11.2014
- Meleshyn et al. 2016 Meleshyn, A; Weyand, T.; Bracke, G.; Kull, H.; Wiczorek, K.: Wärmeentwicklung / Gesteinsverträglichkeit, Mai 2016
- Mönig et al. 2012 Mönig, J.; Buhmann, D.; Rübel, A.; Wolf, J.; Baltés, B.; Fischer-Appelt, K.: Sicherheits- und Nachweiskonzept – Bericht zum Arbeitspaket 4 – Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS–271, 2012
- Müller-Hoeppe et al. 2012a Müller-Hoeppe, N.; Buhmann, D.; Czaikowski, O.; Engelhardt, H.-J.; Herbert, H.-J.; Lerch, C.; Linkamp, M.; Wiczorek; K.; Xie, M.: Integrität geotechnischer Barrieren - Teil 1 Vorbemessung – Bericht zum Arbeitspaket 9.2. – GRS–287, 2012

- Müller-Hoeppe et al. 2012b Müller-Hoeppe, N.; Breustedt, M.; Wolf, J.; Czajkowski, O. Wieczorek, K.: Integrität geotechnischer Barrieren - Teil 2 - Vertiefte Nachweisführung – Bericht zum Arbeitspaket 9.2. – GRS-288, 2012
- Müller-Lyda / Rübel 2008 Müller-Lyda, I.; Rübel, A.: Langzeitstabilität von Behältermaterialien und Abfallmatrix. – Anhang „Behälterstandzeiten“ zum Hauptband „Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland“, Braunschweig/Darmstadt 30.09.2008, dort insbesondere Kapitel 3.1 (HAW-Glas) und Kapitel 3.2 (Brennstoffmatrix)
- Nagra 2002 Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Project Opalinus Clay - Safety Report - Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Technical Report 02-05, CH-Wettingen, Dezember 2002
- Nagra2005 Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Darstellung und Beurteilung der aus sicherheitstechnischer-geologischer Sicht möglichen Wirtsgesteine und Gebiete. – Technischer Bericht 05-02, CH-Wettingen 2005
- NAS 1957 National Academy of Sciences: The Disposal of Radioactive Waste on Land. Report of the Committee of Waste Disposal of the Division of Earth Sciences. - Publication 519, Washington 1957
- Neretnieks 1997 Neretnieks, I.: Diffusion in the rock matrix — An important factor in radionuclide retardation? – Royal Institute of Technology, Stockholm 1979
- NIROND 2001 Belgian agency for radioactive waste and enriched fissile materials (ONDRAF/NIRAS): SAFIR 2 Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2. - NIROND 2001–06 E December 2001

- OECD/NEA 2003 Features, Events and Processes Evaluation Catalogue for Argillaceous Media. - NEA No. 4435. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-Operation and Development, Paris 2003
- OECD/NEA 2006 OECD/NEA 2006. The NEA International FEP Database, Datenbank als Download unter <https://www.oecd-nea.org/rwm/igsc/assessment-tools.html>
- OECD/NEA 2009 OECD/NEA 2009. Considering Timescales in the Post-closure Safety of Geological Disposal of Radioactive Waste. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-Operation and Development, Paris, 2009
- OECD/NEA 2011 OECD/NEA 2009. Reversibility and Retrievalability (R&R) for the Deep Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-Operation and Development, Paris, 2011
- OECD/NEA 2012 OECD/NEA 2012. Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Outcomes of the NEA MeSA Initiative. - Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-Operation and Development, Paris 2013
- OECD/NEA 2013 OECD/NEA 2013. The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories. - NEA/RWM/R(2013)1. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-Operation and Development, Paris, 2013

- OECD/NEA 2014 OECD/NEA 2015. Updating the NEA International FEP List - An Integration Group for the Safety Case (IGSC) Technical Note
 Technical Note 1: Identification and Review of Recent Project specific FEP Lists.
 Technical Note 2: Proposed Revisions to the NEA International FEP List
 Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-Operation and Development, Paris 2014
- OECD/NEA 2015 OECD/NEA 2015. Scenario Development Workshop Synopsis. Integration Group for the Safety Case. - NEA/RWM/R(2015)3. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-Operation and Development, Paris, 2015
- Posiva 2015 Posiva Oi: Final Disposal Facility. – http://www.posiva.fi/en/final_disposal/final_disposal_facility#.VNT0EWP56uY
- Pröhl et al. 2004 Pröhl, G.; Oyslaegers, G.; Zeevaert, T.; Kanyar, B.; Pinedo, Pl.; Simon, I.; Bergström, U.; Hallberg, B.; Mobbs, S.; Chen, Q.; Kowe, R.: Biosphere Models for Safety Assessment of Radioactive Waste Disposal. - Institut für Strahlenschutz, GSF-Bericht 06/04, Neuherberg 2004
- PSE 1985 Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE): Zusammenfassender Abschlussbericht. – Karlsruhe 1985
- PTKA 2012 Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie/Projektträger Karlsruhe für Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE): Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (2011–2014)
- RSK 1982 Reaktorsicherheitskommission (RSK): Sicherheitskriterien für Endlager, 1982

- SKB 2007 Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Långsiktig säkerhet för slutförvar för använt kärnbränsle vid Forsmark och Laxemar – en första värdering Förenklad svensk sammanfattning av säkerhetsanalysen SR-Can. – R-07-24, Stockholm, April 2007
- SKB 2011 Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark - Main report of the SR-Site project. – Volumes I, II and III, Technical Report TR-11-01, SE-Stockholm, March 2011
- StandAG 2017 Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG), Vom 5. Mai 2017
- Stark et al. 2014 Stark, L.; Jahn, S.; Jobmann, M.; Lommerzheim, A.; Meleshyn,, A.; Mrugalla, S.; Reinhold, K.; Rübel, A.; Keller, S.; Geradi, J.: Projekt ANSICHT - FEP Katalog für das Endlagerstandortmodell NORD - Konzept und Aufbau; April 2014
- Stark et al. 2016 Stark, L.; Jahn, S.; Jobmann, M.; Lommerzheim, A.; Meleshyn,, A.; Mrugalla, S.; Reinhold, K.; Rübel, A.: Projekt ANSICHT - FEP Katalog für das Endlagerstandortmodell SÜD - Konzept und Aufbau; März 2016
- Storck et al. 1988 R. 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 – Luxemburg 1988
- Streffler et al. 2011 Streffler, C.; Gethmann, C. F.; Kamp, G.; Kröger, W.; Rehbinder, E.; Renn, O.; Röhlig, K.-J.; Radioactive Waste. Technical and Normative Aspects of its Disposal. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011
- StrlSchV 2016 Strahlenschutzverordnung

- Thomauske et al. 2013 Thomauske, B.; Charlier, F.: Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf Basis der Erkenntnisse aus der VSG sowie Empfehlungen – Bericht zum Arbeitspaket 14 – Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-304, März 2013
- US-DOE 2008 U.S. Department of Energy/Office of Civilian Radioactive Waste Management (OCRWM): Yucca Mountain Repository License Application - SAFETY ANALYSIS REPORT - Chapter 2: Repository Safety After Permanent Closure. – DOE/RW-0573, Rev. 0, Las Vegas/Nevada, June 2008
- UVPG 2013 Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 24. Februar 2010 (BGBl. I S. 94), das zuletzt durch Artikel 10 des Gesetzes vom 25. Juli 2013 (BGBl. I S. 2749) geändert worden ist, zuletzt geändert durch Art. 10 G v. 25.7.2013 I 2749
- Valentine 2007 Valentine: Eruptive and Geomorphic processes at the Lathrop Wells scoria cone volcano. – In: Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol.161, Issues 1-2, March 2007, p. 57-80
- Wolf et al. 2012 Wolf, J.; Behlau, J.; Beuth, T.; Bracke, G.; Bube, C.; Buhmann, D.; Dresbach, C.; Hammer, J.; Keller, S.; Kienzler, B.; Klinge, H.; Krone, J., Lommerzheim, A.; Metz, V.; Mönig, J.; Mrugalla, S.; Popp, T.; Rübel, A.; Weber, J.: Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben - FEP-Katalog für die VSG; Konzept und Aufbau; Bericht GRS-282; Juni 2012
- Ziegenhagen / Schmidt 2008 Ziegenhagen, J. (DBEtec); Schmidt, G. (Öko-Institut): Komponenten und Abläufe eines Einlagerungsbetriebes. – Anhang „Endlagerbetrieb“ zum Hauptband „Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland“, Braunschweig/Darmstadt, 30.09.2008