Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW

ISIBEL

Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW

ISIBEL

Dokumentenkennzeichen TEC-09-2008-AB

Rev.	Datum	eigene Nr.	Grund / Beschreibung
01	29.04.08		

	geprüft: ...../...../..... Dr. Krone Dr. Weber Dr. Mönig

95 Seiten / Abschlussbericht TEC-09-2008-AB

April 2008

FKZ 02 E 10065 + 02 E 10055

Vorwort

Im Rahmen des Vorhabens ISIBEL wurde ein Nachweiskonzept für die sicherheitliche Bewertung von Endlagern für hochradioaktive Abfälle in der Wirtsformation Salz entwickelt und untersucht, inwieweit das Instrumentarium für die Bewertung der Betriebs- und Nachbetriebsphase eines solchen Endlagers vorhanden, bzw. ausreichend ist. Zusätzlich wurde ein FEP-Katalog erarbeitet, in dem alle relevanten FEP zusammengestellt wurden. Die im Zeitraum vom 01.10.2005 bis 31.12.2007 durchgeführten Arbeiten sind in den folgenden Berichten zusammengefasst.

Zusammenfassender Abschlussbericht

Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. Gemeinsamer Bericht von DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS. DBE TECHNOLOGY GmbH Peine, April 2008

Einzelberichte der Organisationen

1. Langzeitsicherheitsanalyse für ein HAW-Endlager im Salz – Geologisches Referenzmodell für einen HAW-Endlagerstandort im Salz – Technischer Bericht. Beitrag für das Projekt ISIBEL. BGR, Hannover, Tagebuchnummer 11614/05, Juli 2007

2. Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008

3. Bewertung der Betriebssicherheit. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008

4. FEP-Generierung und Szenarienentwicklung – Stand November 2006. BGR, Hannover, Tagebuchnummer 10402/08, Februar 2008

5. Nachweis der Integrität der geologischen Barriere. BGR, Hannover, Tagebuchnummer 10403/08, September 2007

6. Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008

7. Untersuchungen zur Ermittlung und Bewertung von Freisetzungsszenarien. GRS Braunschweig, Bericht GRS-233, April 2008

8. Nachweiskonzepte für die Einhaltung der nicht radiologischen Schutzziele in der Nachbetriebsphase. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008

9. FEP-Katalog für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz. Version 01. Gemeinsamer Bericht von DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS. Peine, Hannover, Braunschweig, April 2008

D. Buhmann
J. Mönig
J. Wolf

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH

S. Heusermann
S. Keller
J. R. Weber

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

W. Bollingerfehr
W. Filbert
M. Kreienmeyer
J. Krone
M. Tholen

DBE TECHNOLOGY GmbH

Die dieser Studie zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des BMWi von der BGR sowie vertreten durch den Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung, (PTKA-WTE) unter den Förderkennzeichen 02E10055 und 02E10065 von der GRS bzw. DBE TECHNOLOGY GmbH durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

		Seite
Vorwort		2
Inhaltsverzeichnis		5
Zusammenfassung		7
1	Einleitung	10
1.1	Motivation	10
1.2	Methodischer Ansatz	12
1.3	Bearbeitungsgrundlagen	14
1.4	Grundzüge des radiologischen Langzeitsicherheitsnachweises	15
1.4.1	Methodischer Ansatz	15
1.4.2	Sicherheitskonzept	17
1.5	Bearbeitungskonzept	18
2	Geologisches Modell des Referenzstandortes	28
3	Konzeptionelle Endlagerplanung	33
3.1	Endzulagerndes Inventar	33
3.2	Auslegung eines Grubengebäudes	36
3.2.1	Grundlagen und Vorgehensweise	36
3.2.2	Randbedingungen	37
3.2.3	Grubengebäude für Strecken- und Bohrlochlagerung	37
3.2.4	Grubengebäude für reine Bohrlochlagerung	39
3.3	Transport- und Einlagerungstechnik	39
3.4	Technische und geotechnische Barrieren	41
3.5	Zusammenfassung des ermittelten FuE-Bedarfs	43
4	Bewertung der Betriebssicherheit	45
4.1	Zusammenfassung der Vorgehensweise	45
4.2	Radiologische Betriebsicherheit	45
4.2.1	Deterministische Sicherheitsanalyse	46
4.2.2	Probabilistische Sicherheitsanalysen	48
4.3	Konventionelle Betriebssicherheit im Endlagerbergwerk	48

4.4	Offene Fragen und FuE-Bedarf	49
5	Langzeitsicherheit	52
5.1	Nachweis des sicheren Einschlusses	52
5.1.1	Integritätsnachweis geologischer Barrieren	52
5.1.2	Nachweiskonzept zur Integrität der technischen und geotechnischen Barrieren	55
5.2	FEP-Generierung und Szenarienentwicklung	61
5.3	Ermittlung und Bewertung nicht auszuschließender Freisetzungsszenarien	64
5.4	Nachweiskonzepte für die Einhaltung der nichtradiologischen Schutzziele in der Nachbetriebsphase	70
5.4.1	Schutz der Tagesoberfläche	71
5.4.2	Langzeitsicherheitsnachweis zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen	74
6	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	82
6.1	Bewertung des erreichten Arbeits- und Entwicklungsstandes	82
6.2	Empfehlungen für weiterführende FuE-Arbeiten	86
7	Abbildungsverzeichnis	90
8	Tabellenverzeichnis	91
9	Literaturverzeichnis	92

Zusammenfassung

In den vergangenen vier Jahrzehnten erfolgten in den deutschen Forschungseinrichtungen wie auch in den mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle befassten Institutionen umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu konzeptionellen und sicherheitstechnischen Fragen der Endlagerung ausgedienter Brennelemente und anderer hochradioaktiver Abfälle.

Eine weitgehend in sich geschlossene Betrachtung eines Endlagers hochradioaktiver Abfälle in Salzformationen im Sinne einer „Total System Performance Assessment“ bestehend aus der Charakterisierung sowie der Beschreibung der geologischen Formation, Entwicklung des technischen Endlagerkonzeptes und Bewertung seiner technischen Realisierbarkeit, Betriebs- und Langzeitsicherheit, erfolgte in der Vergangenheit in den FuE-Vorhaben, Systemstudie „Andere Entsorgungstechniken“ - SAE (1984), Systemanalyse Mischkonzept - SAM (1989) und Systemanalyse Endlagerkonzepte - SEK (1996).

In jüngster Zeit ist eine Reihe wichtiger Forschungsergebnisse und damit ein substanzieller Kenntniszugewinn erzielt worden, der die Entwicklung eines Referenzkonzeptes für ein Endlager im Salz sowie seine sicherheitstechnische Bewertung maßgeblich beeinflusst.

Unter Berücksichtigung internationaler Entwicklungen werden gegenwärtig ferner die Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle weiterentwickelt. Hervorzuheben sind dabei insbesondere die neu eingeführte Unterscheidung zwischen wahrscheinlichen, gering wahrscheinlichen und äußerst gering wahrscheinlichen Szenarien und die Fokussierung auf den Nachweis der Isolation.

Vor dem Hintergrund dieser Entwicklungen war das Hauptziel des vorliegenden FuE-Vorhabens, auf der Grundlage des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik eine systematische Bestandsaufnahme zur HAW-Endlagerung in Salzformationen vorzunehmen, um insbesondere zu untersuchen, inwieweit die Nachweise zur technischen Realisierbarkeit sowie zur Endlagersicherheit auf der Grundlage des erreichten Kenntnis- und Entwicklungsstandes geführt werden können und worin die Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bestehen.

Erstmals wurde dabei ein Sicherheitsnachweiskonzept erarbeitet und angewendet, das den Vorzügen der HAW-Endlagerung im Steinsalz und damit dem Konzept des sicheren Einschlusses voll Rechnung trägt. Im Mittelpunkt des Langzeitsicherheitsnachweises steht folgerichtig der systematische Nachweis des langfristig sicheren Einschlusses der endgelagerten Abfälle durch den Nachweis der Integrität der geotechnischen Barrieren und der geologischen Hauptbarriere. Die Bewertung von Freisetzungen erfolgt komplementär für diejenigen Entwicklungen des Endlagers, für die eine Beeinträchtigung der Integrität des Barrierensystems und damit eine Ausbildung eines durchgängigen Transportpfades nicht ausgeschlossen werden kann. Ob diese Entwicklungen wahrscheinlich, gering wahrscheinlich, äußerst gering wahrscheinlich oder auszuschließen sind, ist Ergebnis der Szenarienanalyse.

Die Anwendung dieses Nachweiskonzeptes fußt einerseits auf einem Referenzstandortmodell, das die jüngsten Erkenntnisse aus der im Oktober 2000 unterbrochenen Erkundung des Salzstockes Gorleben berücksichtigt, und andererseits auf der Weiterentwicklung des technischen Endlagerkonzeptes für ein HAW-Endlager im Steinsalz.

Von herausragender Bedeutung sind dabei die Erkenntnisse zur geologischen Integrität der Salzbarriere und zur geblockten Struktur des Hauptanhydrit. Daraus folgt für den Referenzstandort, dass bei ungestörter Endlagerentwicklung ein Freisetzungspfad über den Hauptanhydrit ausgeschlossen werden. Gleichzeitig wurde die in der Vergangenheit häufig als abdeckendes Referenzszenario betrachtete Radionuklidfreisetzung über den Hauptanhydrit gegenstandslos. Folgerichtig wird der Nachweis des sicheren Einschlusses zum Kern des Sicherheitsnachweises.

Die zweite wesentliche Komponente des Nachweises des sicheren Einschlusses ist der Nachweis der Integrität der technischen Barrieren, insbesondere der Schacht- und Streckenverschlüsse. Ihre diversitäre Anordnung bietet bei geeigneter Auslegung die grundsätzliche Möglichkeit, dass selbst im Fall des Versagens einer dieser beiden technischen Barrieren keine relevanten Freisetzungen zu erwarten sind. Das für diese Verschlussbauwerke entwickelte Nachweiskonzept und die hierzu vorgeschlagenen technischen Lösungen ermöglichen es grundsätzlich, dass sie anforderungsgerecht in Übereinstimmung mit den für sie in der Langzeitsicherheitsanalyse getroffenen Annahmen geplant und errichtet werden können.

Die Identifizierung und die anschließende quantitative Analyse und Bewertung von Szenarien, die jeweils eine der zukünftig möglichen Entwicklungen des Endlagersystems darstellen, ist ein wesentlicher Bestandteil eines Langzeitsicherheitsnachweises für ein Endlager. Hierzu wurde zum ersten Mal für ein HAW-Endlager im Wirtsgestein Salz ein systematisch erarbeiteter FEP-Katalog erstellt. Außerdem wurden verschiedene Vorgehensweisen im Hinblick auf ihre Eignung zur Entwicklung von Szenarien untersucht.

Hinsichtlich der Bewertung von Freisetzungsszenarien stehen weit entwickelte Verfahren, Modelle und Programme zur numerischen Modellierung zur Verfügung. Sie wurden in einer Vielzahl von Beispielen erfolgreich getestet und gestatten eine Modellierung der maßgeblichen Prozesse im Nahfeld, Fernfeld und in der Biosphäre im Rahmen der Konsequenzenanalyse. Sie bilden zusammen mit dem Nachweis des sicheren Einschlusses die Grundlage für das im vorliegenden FuE-Vorhaben verfolgte Konzept zum Langzeitsicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager in Salzformationen.

Darüber hinaus wurden die Nachweise zur Betriebssicherheit und zur Einhaltung der nicht radiologischen Schutzziele in der Nachbetriebsphase betrachtet.

Auf der Grundlage der durchgängigen Analyse der Umsetzbarkeit des hier erarbeiteten Nachweiskonzeptes zur Gewährleistung der Endlagersicherheit war es möglich, noch bestehende Defizite, Lücken und Unsicherheiten zu ermitteln, die Gegenstand weiterführender Untersuchungen sein sollten.

Hervorzuheben sind dabei Untersuchungen zum Kompaktionsverhalten von Salzgrus bei kleinen Porositäten, um die Permeabilitätsabnahme zuverlässig prognostizieren zu können, der ingenieurtechnische Nachweis der Langzeitstabilität von Verschlussbauwerken einschließlich der natürlichen oder künstlichen Abdichtung der Auflockerungszone sowie die Erarbeitung einer geeigneten Methodik, die es gestattet, ein Set von Szenarien zu entwickeln, das die zukünftige Entwicklung des Endlagers abdeckend beschreibt.

Im Unterschied zu HAW-Endlagern im Ton und Granit wurde für HAW-Endlager im Salz international noch kein Safety Case vorgestellt. Im vorliegenden FuE-Vorhaben ISIBEL wurde jedoch ein fortgeschrittenes Sicherheitsnachweiskonzept für ein HAW-Endlager erarbeitet, das eine wesentliche Grundlage eines Safety Case darstellen könnte. Darüber hinaus nimmt der Safety Case in der aktuellen Diskussion um die Weiterentwicklung der Sicherheitsanforderungen eine zentrale Stellung ein. Es ist daher nahe liegend, ausgehend von internationalen Erfahrungen und Empfehlungen, als nächsten Schritt das Konzept für einen Safety Case für ein HAW-Endlager im Salz zu entwickeln.

1 Einleitung

1.1 Motivation

In den vergangenen vier Jahrzehnten erfolgten in den deutschen Forschungseinrichtungen wie auch in den mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle befassten Institutionen umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu konzeptionellen und sicherheitstechnischen Fragen der Endlagerung ausgedienter Brennelemente und anderer hochradioaktiver Abfälle (HAW).

Im Labor und unter Aufschlussbedingungen (in situ) wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt, die sich vorwiegend auf das Wirtsgestein Salz konzentrierten. Grundlegende und wesentliche in situ-Versuche wurden ab Mitte der 60er Jahre im Forschungsbergwerk Asse durchgeführt.

Im Zusammenhang mit der Eignungsbewertung des Salzstockes in Gorleben wurde im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz 1997/98 ein Konzept für das Endlager Gorleben mit dem Titel „Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben“ [Filbert 1998] erstellt. Es beinhaltet neben der Beschreibung des Standortes eine auf dem damals unterstellten Abfallmengengerüst aufbauende vorkonzeptionelle Planung des Endlagers. Darin werden alle technischen und sicherheitstechnischen Aspekte sowie Fragen der Genehmigungssituation und der Endlagerkosten betrachtet.

Darüber hinaus wurden unter Berücksichtigung fortgeschrittener Internationaler Erfahrungen die Methodik und die Werkzeuge zur Führung des Sicherheitsnachweises erarbeitet und weiterentwickelt. Die dabei erzielten Ergebnisse haben maßgeblich zur Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik hinsichtlich der HAW-Endlagerung in Salzformationen beigetragen

Eine weitgehend in sich geschlossene Betrachtung für ein Endlager hochradioaktiver Abfälle in Salzformationen im Sinne einer „Total System Performance Assessment“ bestehend aus

- Charakterisierung und Beschreibung der geologischen Formation,
- Entwicklung des technischen Endlagerkonzeptes und Bewertung seiner technischen Realisierbarkeit und
- Betriebs- und langzeitsicherheitliche Bewertung

erfolgte in der Vergangenheit in den FuE-Vorhaben

- Systemstudie „Andere Entsorgungstechniken“ - SAE (1984) [KWA 1984],
- Systemanalyse Mischkonzept - SAM (1989) [KWA 1989] und
- Systemanalyse Endlagerkonzepte - SEK (1996) [DBE 1996].

In jüngster Zeit ist eine Reihe von Arbeiten zu verzeichnen, die zu wichtigen Forschungsergebnissen und damit zu einem substanziellen Kenntniszugewinn führten, der die Entwicklung

eines Referenzkonzeptes für ein Endlager im Salz sowie seine sicherheitstechnische Bewertung nachhaltig beeinflusst.

Hervorzuheben sind in diesem Zusammenhang insbesondere:

- Detaillierte Kenntnisse zum Aufbau der inneren Struktur von Salzstöcken in Norddeutschland im Ergebnis der untertägigen Erkundung des Salzstockes Gorleben,
- Demonstrationsversuche für den Transport und die Handhabung schwerer Lasten (Endlagerbehälter),
- Entwicklung ingenieurtechnischer Nachweisverfahren zur Integrität der Salzbarriere unter Verwendung von Dilatanzkriterien und des Fluid- bzw. Minimalspannungskriteriums,
- Optimierte thermomechanische Endlagerauslegung unter Verwendung abgesicherter Stoffgesetze und Codes zur 3 D-Modellierung,
- Abschluss des Großversuches TSS / Bambus und Beschreibung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus,
- Demonstration des Schachtverschlusskonzeptes am Bohrschacht Salzdetfurth II,
- Entwicklung ingenieurtechnischer Sicherheitsnachweiskonzepte für Streckenverschlüsse und zur Beherrschbarkeit der Gasbildung im Zuge der Planungen zur Stilllegung des ERAM,
- Arbeiten zur Optimierung der „Direkten Endlagerung“ ausgedienter Brennelemente durch Kokillenlagerung in Bohrlöchern,
- Vertiefte Kenntnisse zur Mobilisierung und Rückhaltung von Radionukliden sowie zu deren Transport im Nahbereich und in der Geosphäre,
- Weiterentwicklung der Programme zur Modellierung und Bewertung von Radionuklidausbreitungsprozessen und deren Koppelung mit thermodynamischen Datenbanken sowie
- Weiterentwicklung des (rechentechnischen) Instrumentariums für die Beschreibung von Endlagerteilsystemen und für die integrierte Systembetrachtung.

Gleichzeitig hat sich in den letzten Jahren der internationale Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich der Führung des Sicherheitsnachweises qualitativ weiterentwickelt: Während vor einigen Jahrzehnten noch der „Nachweis“ der Einhaltung numerischer Vorgaben (Grenzwerte) durch Modellrechnungen als wichtigste (in einigen Ländern einzige) Komponente eines Sicherheitsnachweises angesehen wurde, bilden Modellrechnungen heute einen Teil einer Argumentationslinie, die mit weiteren Argumenten zu stützen und zum Sicherheitsnachweis (Safety Case) zu verknüpfen ist. Dabei zeigt sich die Stärke eines solchen ganzheitlichen Nachweises in der Verknüpfung von Endlagerkonzept, wissenschaftlich-technischen Grundlagen und Forschungsergebnissen mit den Langzeitsicherheitsanalysen.

Unter Berücksichtigung internationaler Entwicklungen werden die Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle gegenwärtig weiterentwickelt [GRS 2003]. Hervorzuheben sind dabei insbesondere die neu eingeführte Unterscheidung zwischen wahrscheinlichen, gering wahrscheinlichen und äußerst gering wahrscheinlichen Szenarien. Diese Unterscheidung ist insbesondere für die Endlagerung im Salz von großer Bedeutung, da hier bei wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers der sichere Einschluss angestrebt wird und Freisetzungen nur bei gering bzw. äußerst gering wahrscheinlichen Szenarien einer gestörten Endlagerentwicklung zu besorgen sein sollten.

Vor dem Hintergrund dieser Entwicklungen ist es nahe liegend, basierend auf dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik, eine kritische Bestandsaufnahme bezüglich der Instrumentarien zur sicherheitlichen Bewertung und zur Methodik der Führung des Sicherheitsnachweises vorzunehmen, um die Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten für die HAW-Endlagerung in Salzgestein systematisch abzuleiten.

1.2 Methodischer Ansatz

Bei der Umsetzung dieser Zielstellung war zunächst davon auszugehen, dass die von der Bundesrepublik Deutschland geförderte Endlagerforschung die vorrangige Aufgabe hat, die wissenschaftlich-technischen Grundlagen für eine sichere Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Deutschland zu schaffen. Als Maßstab für die Zielerreichung sind die Führbarkeit des Sicherheitsnachweises und die technische Realisierbarkeit des Endlagers anzusehen. Aufbauend auf dem geologischen Standortmodell und dem technischen Endlagerkonzept, die zusammen als Referenzkonzept die notwendige Datenbasis verkörpern, ist der Nachweis der technischen Realisierbarkeit der im Sicherheitsnachweis getroffenen Annahmen bezüglich des Endlagers, seiner Komponenten und insbesondere der technischen Barrieren zu führen. Ein erfolgreicher Sicherheitsnachweis setzt daher die Einheit des Nachweises der Einhaltung der Schutzziele und der technischen Realisierbarkeit voraus (Abbildung 1-1). Neben quantitativen Nachweisen der Unterschreitung entsprechender Grenzwerte ergänzen dabei qualitative Argumente den Nachweis der Einhaltung der Schutzziele.

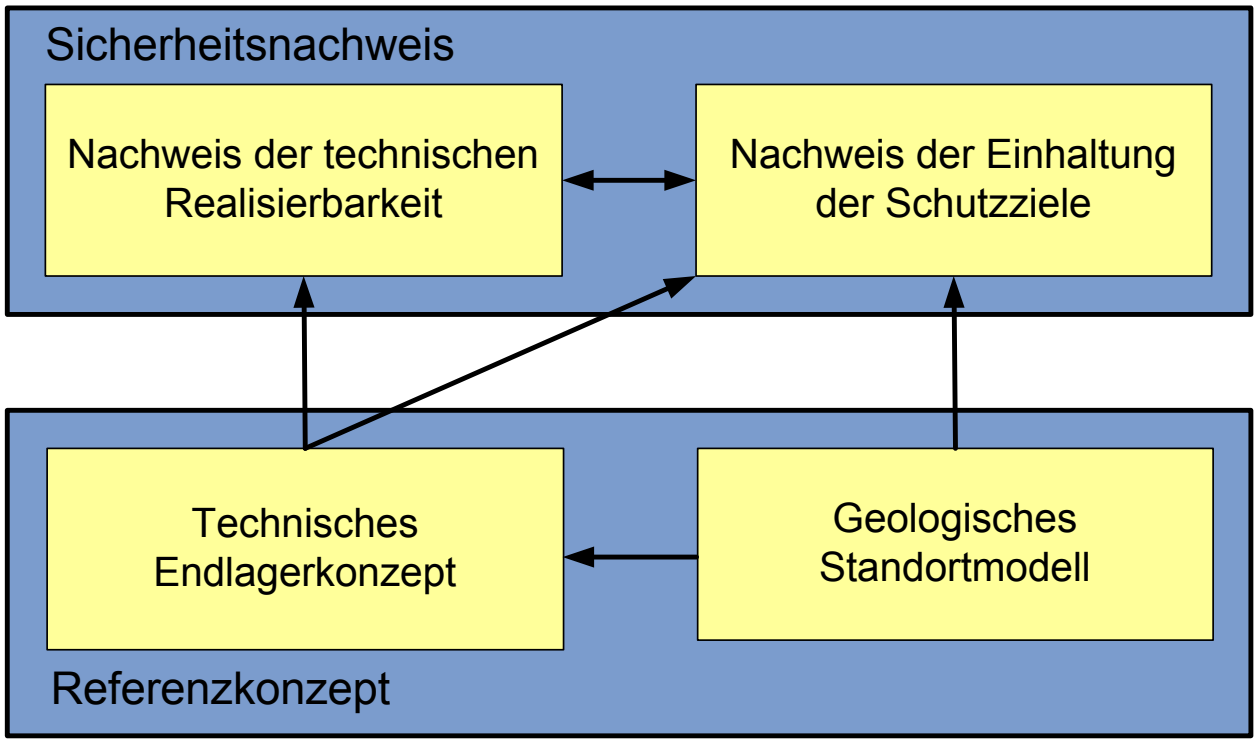

Abbildung 1-1: Methodik zur Führung des Sicherheitsnachweises

Sofern der Sicherheitsnachweis nicht vollständig führbar ist, bestehen entweder Defizite hinsichtlich des Nachweises der Einhaltung der Schutzziele, oder des Nachweises der technischen Realisierbarkeit, oder bei beidem (Abbildung 1-2).

Daher ist die Prüfung, ob ein Sicherheitsnachweis auf dem gegenwärtigen Stand von Wissenschaft und Technik erbracht werden kann, auch unmittelbar damit verbunden, noch bestehende Defizite und damit zukünftigen FuE-Bedarf systematisch und zielorientiert zu ermitteln.

Bezüglich der technischen Realisierbarkeit des Endlagers und seiner Komponenten in Übereinstimmung mit den beim Nachweis der Einhaltung der Schutzziele getroffenen Annahmen, kann derartiger FuE-Bedarf in der Weiterentwicklung von Endlagerkomponenten, in Machbarkeitsuntersuchungen sowie Demonstrationsvorhaben bestehen.

Defizite beim Nachweis der Einhaltung der Schutzziele hingegen können die Notwendigkeit der Änderung des Endlagerkonzeptes, aber auch die Notwendigkeit einer vertieften Standortcharakterisierung bzw. der Weiterentwicklung der Instrumentarien für Sicherheitsanalysen begründen.

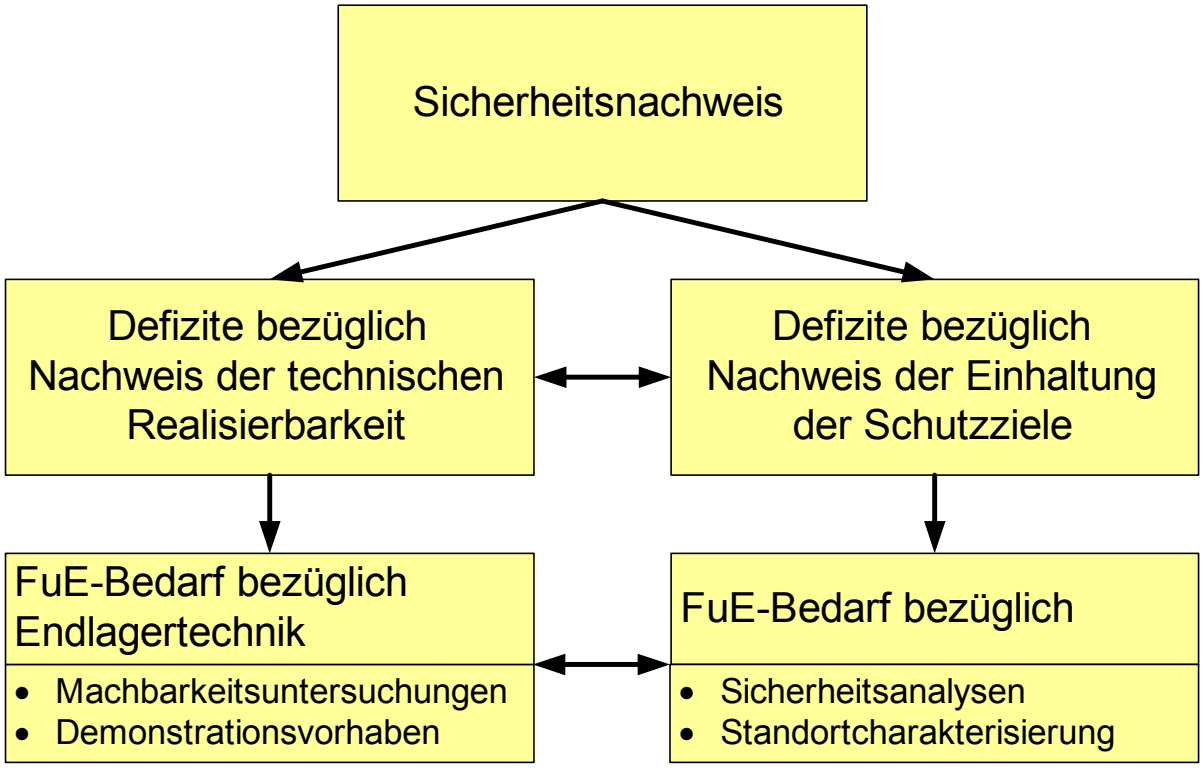

Abbildung 1-2: Grundzüge der Methodik zur Ermittlung des FuE-Bedarfs

Gegenstand des vorliegenden FuE-Vorhabens war es jedoch nicht, einen vollständigen Sicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager im Salzgestein zu erstellen. In Anbetracht der begrenzten personellen und finanziellen Ressourcen und des relativ kurzen Bearbeitungszeitraumes, waren die Arbeiten stattdessen darauf gerichtet, unter Berücksichtigung des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik ein Nachweiskonzept zu erstellen und zu prüfen, inwieweit anhand bekannter FuE-Ergebnisse die zugehörigen Einzelnachweise bereits geführt werden können bzw. wo weiterer FuE-Bedarf besteht.

1.3 Bearbeitungsgrundlagen

Die maßgeblichen Bearbeitungsgrundlagen sind neben den quantitativen Schutzzielen, deren Einhaltung nachzuweisen ist, das geologische Modell des Referenzstandortes, die Spezifikation der endzulagernden Abfälle und das technische Endlagerkonzept.

Beim geologischen Modell wurde auf die umfangreichen Daten aus der Erkundung des Salzstockes Gorleben zurückgegriffen. Sowohl hinsichtlich des Umfangs als auch des Tiefgangs der durchgeführten Untersuchungen stellen sie einen einzigartigen Fundus dar, der andernfalls durch eine Vielzahl ungesicherter generischer Annahmen ersetzt werden müsste.

Bei den betrachteten Arten und Mengen hochradioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente wurde davon ausgegangen, dass die Nutzung der Kernenergie in Deutschland, wie in der aktuellen Fassung des Atomgesetzes geregelt, planmäßig beendet wird und alle ausgedienten Brennelemente, die noch nicht zur Wiederaufarbeitung angeliefert wurden, direkt endgelagert werden (Ausstiegsszenario).

Das betrachtete Endlagerkonzept stellt eine Weiterentwicklung der „Aktualisierung des Konzeptes Gorleben“ [Filbert 1998] dar. Neben der Anpassung an das reduzierte Abfallaufkommen wurden insbesondere das Verschlusskonzept und die zugehörigen geotechnischen Barrieren weiterentwickelt. Bezüglich des Einlagerungskonzeptes zur direkten Endlagerung von ausgedienten Brennelementen wurden zwei Varianten:

- die Streckenlagerung in POLLUX-Behältern und
- die Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen

betrachtet.

Im Mittelpunkt der Arbeiten stand das Konzept des radiologischen Langzeitsicherheitsnachweises. Unter Berücksichtigung der internationalen Empfehlungen und fortgeschrittenen Praxis sowie der aktuellen Diskussion in Deutschland wurde dabei von einem radiologischem Schutzziel ausgegangen, das zwischen wahrscheinlichen, gering wahrscheinlichen und nicht mehr zu betrachtenden, äußerst gering wahrscheinlichen Entwicklungen unterscheidet [GRS 2003].

Für wahrscheinliche Entwicklungen wird in der Regel ein Dosisgrenzwert angesetzt, der laut Empfehlungen der Strahlenschutz- und Reaktorsicherheitskommission bei 0,1 mSv/a liegen

sollte. Für gering wahrscheinliche Entwicklungen hingegen werden sowohl höhere Dosisrichtwerte (z. B. 1 mSv/a) als auch Risikorichtwerte (z. B. 10^{-5}/a) diskutiert. Während es bei der Verwendung von Risikorichtwerten grundsätzlich möglich wäre, Unterschiede in der Eintrittswahrscheinlichkeit gering wahrscheinlicher Szenarien (Endlagerentwicklungen) zu berücksichtigen, scheidet dies bei der Verwendung von Dosisrichtwerten aus: Ihre Anwendung ist jedoch einfacher und die quantitative Ermittlung von Eintrittswahrscheinlichkeiten in der Regel ohnehin mit erheblichen Unsicherheiten verbunden oder gar unmöglich.

Als Nachweiszeitraum wurde für den radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis 1 Mio. Jahre angesetzt.

Bezüglich des Nachweises der Kritikalitätssicherheit wurde die in der Kerntechnik übliche Ungleichung

$k_{eff} \pm 2\,\delta \leq 0{,}95$

gewählt.

Im Rahmen der Arbeiten zur Methodik des Nachweises der Langzeitsicherheit wurde darüber hinaus auch die Einhaltung der nicht radiologischen Schutzziele berücksichtigt. Das sind einerseits der Grundwasserschutz vor chemisch-toxischen Stoffen gemäß den Anforderungen des Wasserhaushaltsgesetzes und der Grundwasserschutzverordnung sowie der untersetzenden Regelwerke und andererseits der Schutz der Tagesoberfläche. Bei letzterem wurde als Kriterium eine maximale Schiefstellung von 1 / 300 in 100 Jahren zu Grunde gelegt.

Neben dem Langzeitsicherheitsnachweis ist die Einhaltung der Schutzziele auch während der Betriebsphase des Endlagers nachzuweisen. Wesentliche Bestandteile des Betriebssicherheitsnachweises sind dabei der Nachweis der radiologischen und kerntechnischen Sicherheit entsprechend den Anforderungen des Atomgesetzes und der Strahlenschutzverordnung sowie der Nachweis der Bergbau- und Arbeitssicherheit gemäß den Anforderungen des Bundesberggesetzes und der bergrechtlichen bzw. Arbeitsschutzbestimmungen. Anforderungen des Objektschutzes und des physischen Schutzes blieben hingegen ebenso wie Safeguards-Anforderungen außer Betracht.

1.4 Grundzüge des radiologischen Langzeitsicherheitsnachweises

1.4.1 Methodischer Ansatz

Der Nachweis der radiologischen Langzeitsicherheit basiert auf der Betrachtung von möglichen Entwicklungen des Endlagersystems. Dabei werden auch Szenarien berücksichtigt, die die Ausbreitung von Radionukliden von den Abfallgebinden bis in die Biosphäre beschreiben. Die Ausbreitung kann dabei in flüssiger Phase oder in der Gasphase erfolgen. Eine ausführliche Szenarienentwicklung ist erforderlich, um alle in den Grenzen menschlicher Vernunft denkbaren Entwicklungen des Endlagersystems zu ermitteln.

In der Vergangenheit wurden im Rahmen von Langzeitsicherheitsbetrachtungen für HAW-Endlager im Steinsalz vorrangig konservative Freisetzungsszenarien betrachtet. Auch Szenarien zur Subrosion oder mit menschlichen Einwirkungen wurden mit einbezogen. Dabei erfolgte keine Unterscheidung zwischen wahrscheinlichen und geringwahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems. Als Beispiel für ein betrachtetes, konservatives Szenario ist das so genannte Anhydrit-Szenario zu nennen, bei dem die Ausbildung einer durchgängigen Wegsamkeit über den Hauptanhydrit vom Einlagerungsbereich bis zum Deckgebirge unterstellt wurde, über die Lösungen bis zu den Abfällen eindringen und gelöste Radionuklide in das Deckgebirge und schließlich in die Biosphäre freigesetzt werden können. Die Untersuchungen der BGR am Salzstock Gorleben haben mittlerweile gezeigt, dass dort der Hauptanhydrit während des Salzaufstiegs zerbrochen ist und nun als zerblockte, isolierte Schollen vorliegt. Daher ist für diesen Standort eine durchgängige Wegsamkeit über den Hauptanhydrit vom Einlagerungsbereich bis zum Deckgebirge als unwahrscheinlich einzustufen, so dass dieses konservative Freisetzungsszenario in Zukunft entsprechend nicht mehr zu betrachten ist.

Die vorrangige Betrachtung von konservativen Freisetzungsszenarien hat den gravierenden Nachteil, die Vorzüge von Salz als Wirtsgestein und einschlusswirksame geologische Hauptbarriere nicht genügend herauszustellen. Damit wird auch das auf den Vorzügen von Salz beruhende Sicherheitskonzept ungenügend gewürdigt. Obwohl bereits in der Vergangenheit aufgrund der Dichtheit und des Selbstheilungsvermögens von Salzgestein auch von einem langfristig sicheren Einschluss der endgelagerten Abfälle ausgegangen wurde, konnte der Eindruck entstehen, dass der systematische Nachweis des sicheren Einschlusses nicht das primäre Ziel des Sicherheitsnachweises ist, sondern, wie bereits ausgeführt, die Beurteilung konservativer Freisetzungsszenarien. Diese Vorgehensweise hat zu Verwirrungen geführt und die Vermittelbarkeit der Vorzüge und des Sicherheitskonzeptes der Endlagerung im Steinsalz erheblich erschwert.

Unter Berücksichtigung der zwischenzeitlich erzielten Fortschritte beim Nachweis der Integrität der geologischen Barriere und der geotechnischen Barrieren wurde daher im vorliegenden FuE-Vorhaben ein Nachweiskonzept entwickelt, das den Vorzügen und dem Sicherheitskonzept des sicheren Einschlusses voll Rechnung trägt (Abbildung 1-3):

- Im Mittelpunkt des Langzeitsicherheitsnachweises steht der Nachweis des langfristig sicheren Einschlusses der endgelagerten Abfälle durch den Nachweis der Integrität der geotechnischen Barrieren und der geologischen Hauptbarriere.

- Die Bewertung von Freisetzungen erfolgt für diejenigen Entwicklungen des Endlagersystems, für die eine Beeinträchtigung der Integrität des Barrierensystems und damit eine Ausbildung eines durchgängigen Transportpfades nicht ausgeschlossen werden kann. Ob diese Entwicklungen wahrscheinlich, gering wahrscheinlich, oder auszuschließen sind, ist Ergebnis der Szenarienanalyse. Im vorliegenden Vorhaben wurden beispielhaft einige Freisetzungsszenarien ausgewählt und ohne Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit des Szenarios betrachtet.

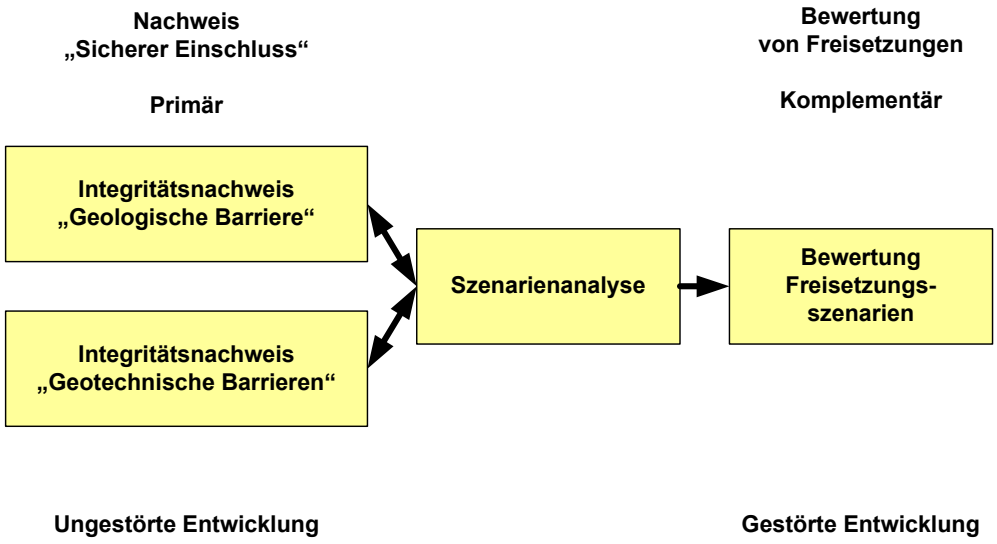

Abbildung 1-3: Methodischer Ansatz zum radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis

1.4.2 Sicherheitskonzept

Hinsichtlich der Auslegung des Endlagers beruht das verfolgte Sicherheitskonzept darauf, dass unter Berücksichtigung der vorgefundenen Geologie und der benötigten Einlagerungshohlräume und sonstigen Grubenbaue das Grubengebäude so ausgelegt wird, dass der Integritätsnachweis für die geologische Hauptbarriere, das Hauptsalz der Staßfurt-Folge (z2HS) geführt werden kann. Hierzu sind zur Einhaltung der Dilatanz- und Hydrofrac-Kriterien die Einlagerungshohlräume insbesondere in hinreichender Teufe und hinreichendem Abstand zu potentiellen Störungszonen bzw. Schichtgrenzen anzuordnen. Das Temperaturkriterium von max. 200 °C gilt dabei als wesentliche Randbedingung.

Ferner wird von einer Verfüllung des gesamten Hohlraumvolumens sämtlicher Grubenbaue des Endlagerbergwerkes mit Salzgrus ausgegangen, der durch die Konvergenz kompaktiert wird. Dabei nimmt seine Porosität und Permeabilität ab, bis er langfristig die gleichen Barriereeigenschaften wie Steinsalz aufweist.

Die Schächte und die Zugänge zu den Einlagerungsbereichen werden mit Schacht- bzw. Streckenverschlüssen verschlossen. Diese geotechnischen Barrieren sind dabei so anzuordnen und hinsichtlich ihres hydraulischen Widerstandes und der Langzeitstabilität so auszulegen, dass der Zutritt von Lösungen über den Schacht und die mit Salzgrus verfüllten Strecken zu den endgelagerten Abfällen und die anschließende Auspressung kontaminierter Lösungen über den gleichen Pfad infolge der abklingenden Konvergenz bei der ungestörten Endlagerentwicklung nicht mehr zu besorgen sind.

Unter Berücksichtigung der mit der Zeit abnehmenden Porosität und Permeabilität des kompaktierenden Salzgruses sind insbesondere die Anforderungen an die Langzeitstabilität und an den hydraulischen Widerstand der geotechnischen Barrieren so zu wählen, dass dieser

Nachweis einer de facto Nullemission geführt werden kann. Die Einhaltung dieser Anforderungen ist wiederum in den ingenieurtechnischen Nachweisen zur Barrierenintegrität zu belegen (Abbildung 1-4).

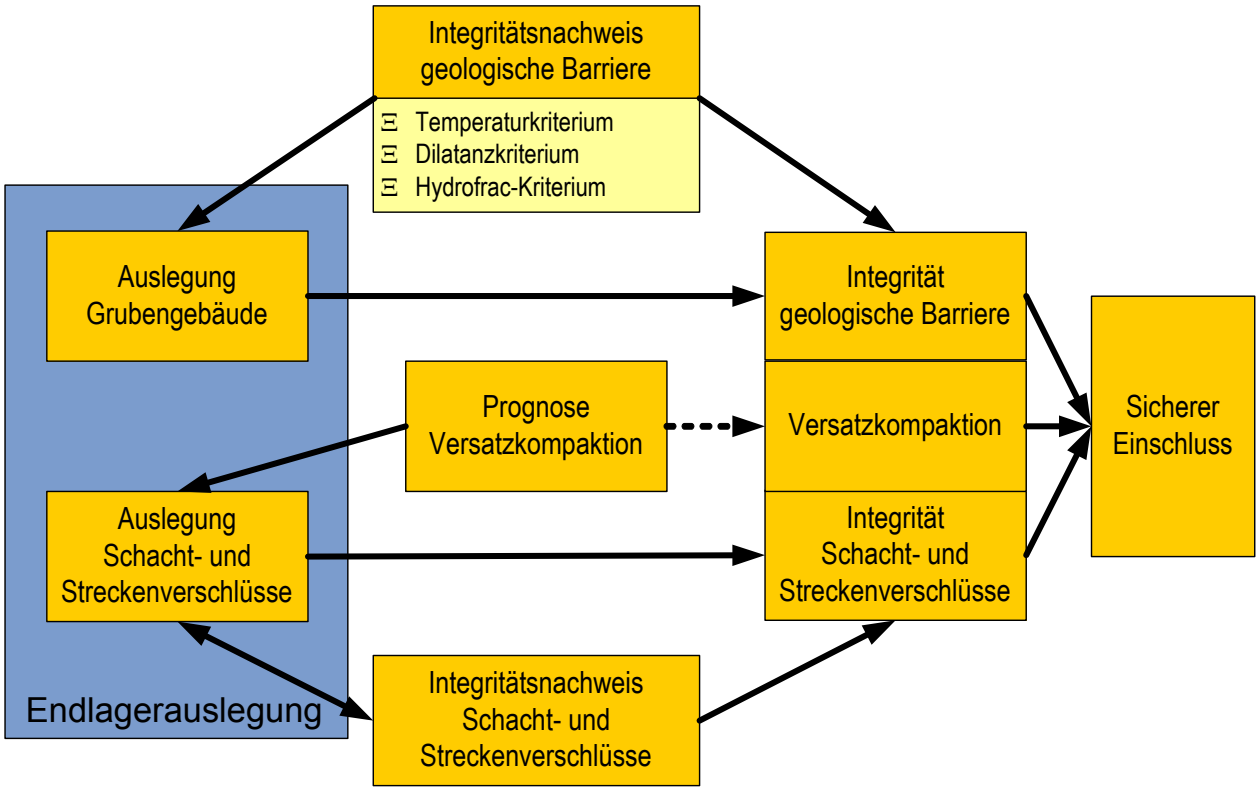

Abbildung 1-4: Sicherheitskonzept „Sicherer Einschluss“

Zunächst wird unterstellt, dass der Verschluss der Einlagerungsbohrlöcher mit einer vorkompaktierten Salzgrusschüttung erfolgt. Sofern für den Nachweis des sicheren Einschlusses erforderlich, kann hierfür auch eine aufwendige Konstruktion mit höheren Anforderungen vorgesehen werden.

Bezüglich der Integrität der Behälter hingegen werden für die Nachbetriebsphase keine besonderen Anforderungen gestellt.

Das gleiche gilt für mögliche zusätzliche Maßnahmen zur Radionuklidrückhaltung im Falle des Zutritts von Lösung zu den Abfällen. Hier werden für die Mobilisierung der Radionuklide aus den Abfällen und für ihre Rückhaltung im Nahfeld die Gegebenheiten unterstellt, die sich aus den Eigenschaften der Abfälle, Gebinde, Versatz- und Verschlussmaterialien ergeben.

1.5 Bearbeitungskonzept

Das wesentliche Ziel des Vorhabens lag in einer wissenschaftlich fundierten Überprüfung und Bewertung des erreichten Standes von Wissenschaft und Technik im Hinblick auf die Qualität und Vollständigkeit des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von

Endlagern für HAW im Salz. Die zur Erreichung dieses Zieles notwendigen Schritte bzw. Teilziele sind im Arbeitsprogramm systematisch abgebildet (siehe Abbildung 1-5).

Auf der Grundlage der vorliegenden Kenntnisse sowie international bewährter sicherheitsanalytischer Konzepte wurde ein Sicherheitsnachweis- und Referenzkonzept für ein HAW-Endlager im Salz entworfen. Dazu erfolgte eine gesamtheitliche Betrachtung des Endlagersystems sowohl hinsichtlich seiner technischen Realisierbarkeit als auch bezüglich der Einhaltung der Sicherheitsanforderungen unter Einbeziehung aller seiner maßgeblichen Komponenten. In diesem Zusammenhang wurden, wie im Arbeitspaket (AP1) definiert, Fragen zum Standortmodell und zum Planungskonzept behandelt.

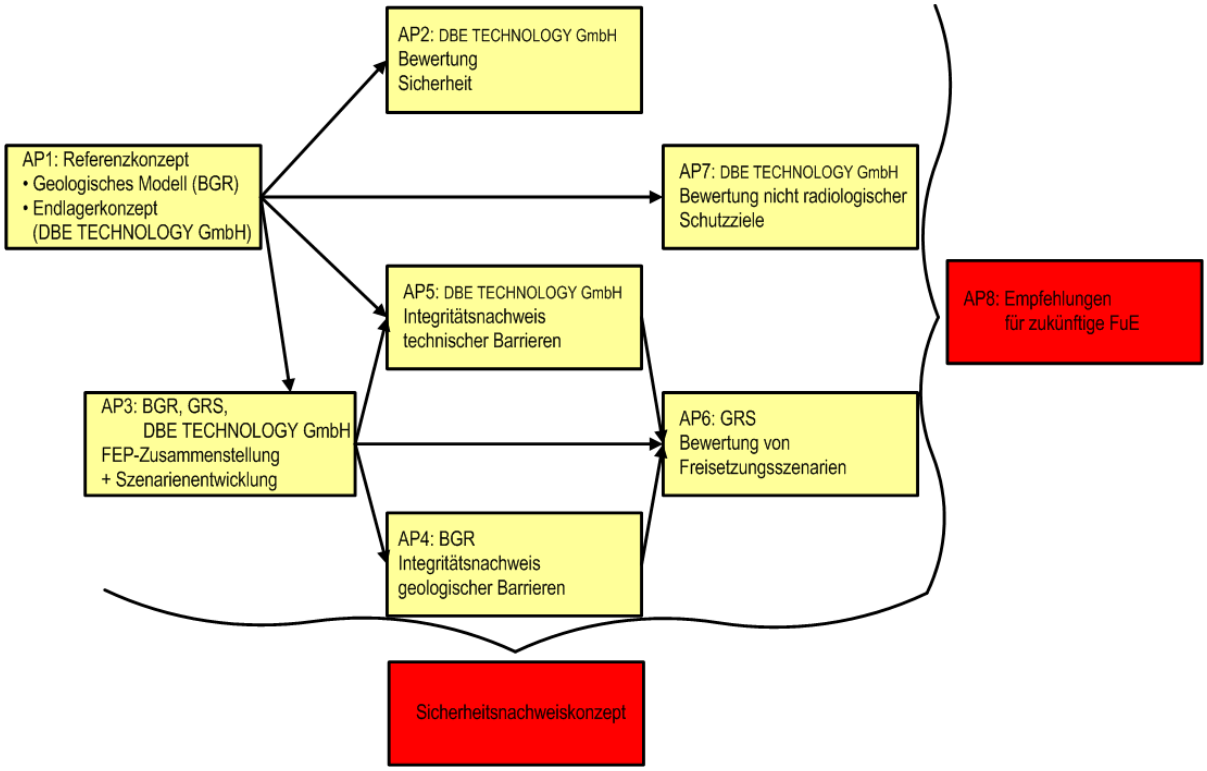

Abbildung 1-5: Bearbeitungskonzept

Neben der Bewertung von Fragen der Betriebssicherheit (AP2) war vor allem AP3 wesentlich, in dem die FEP-Genierung und die Szenarienentwicklung thematisiert wurden. Ergänzend zu den Aspekten, die der Erstellung eines Nachweiskonzeptes zur Integrität der geologischen und der technischen Barrieren dienten (AP4 bzw. 5), war im Hinblick auf die Langzeitsicherheit die Bewertung möglicher radiologischer Freisetzungsszenarien (AP6) sowie der Nachweis der Einhaltung der nichtradiologischen Schutzziele (AP7) von Bedeutung. Damit konnte geprüft werden, inwieweit adäquate Instrumentarien bereits zur Verfügung stehen und wie deren Anwendbarkeit auf der Grundlage vorliegender FuE-Ergebnisse zu bewerten ist. Im Ergebnis einer Defizitanalyse wurden Schwerpunkte und Zielstellungen für zukünftige ergänzende FuE-Arbeiten formuliert, um diese systematisch auf die Erfordernisse der Endlagersicherheitsforschung auszurichten (AP8).

Obwohl die Arbeiten an Hand von möglichst konkreten geologischen und technischen Daten durchgeführt werden sollten, hatte dieses FuE-Vorhaben nur die Intention, generell für ein technisch realisierbares Endlagerkonzept ein schlüssiges, nachvollziehbares und möglichst lückenloses Sicherheitsnachweiskonzept zu erstellen.

Es war jedoch nicht Ziel des Vorhabens, Endlager auszulegen und hierzu den Sicherheitsnachweis im Hinblick auf eine Genehmigungsreife oder eine Standorteignungsaussage zu führen.

Es war ebenso nicht vorgesehen, Einzelnachweise zu führen, sondern möglichst anhand von Analogieschlüssen und durch Auswertung vorliegender Forschungsergebnisse die Führbarkeit der Einzelnachweise und die Verfügbarkeit der hierzu erforderlichen Instrumentarien zu bewerten. Wichtig war es vor allem, die Konsistenz und Plausibilität der in Sicherheitsbetrachtungen getroffenen Annahmen und Randbedingungen mit dem technisch Realisierbaren zu überprüfen und eine Vorgehensweise für die Behandlung von FEPs und Szenarien zu entwickeln, die im Einklang mit dem verfolgten Sicherheitsnachweiskonzept steht. Für Lücken und Defizite, die nicht aufgelöst werden können, sollte aufgezeigt werden, wie mit weiterführenden Untersuchungen diese offenen Fragestellungen beantwortet werden können.

Die Abwicklung des Gesamtvorhabens erfolgte arbeitsteilig und in enger Zusammenarbeit durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, und die DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.

Die jeweils federführende Organisation stellte in gemeinsamen Projektbesprechungen zunächst die Ergebnisse und Überlegungen zu ihren Arbeitspaketen zur Diskussion, bevor die zugehörigen Berichte verfasst und erneut erörtert wurden. Die revidierten Berichte zu den Arbeitspaketen 1 bis 7 sind Anhänge zu diesem Abschlussbericht, der gleichzeitig dem Bericht zum AP8 entspricht und arbeitsteilig von den Projektpartnern verfasst wurde.

Die zusätzlich in das Projekt aufgenommene Erstellung eines umfassenden FEP-Kataloges erfolgte in besonders enger Zusammenarbeit. Auf der Grundlage einer von BGR vorgenommenen FEP-Zusammenstellung wurde die FEP-Liste gemeinsam vervollständigt und systematisiert. Die zugehörigen FEP-Beschreibungen wurden arbeitsteilig erstellt bzw. überarbeitet und in mehr als 15 Projektbesprechungen und einer dreitägigen Klausurbesprechung abgestimmt.

Die Inhalte der einzelnen Arbeitspakete werden nachfolgend kurz zusammengefasst.

AP1: Erstellung eines Referenzkonzeptes

Der Ist-Zustand des Endlagersystems ist Ausgangspunkt für die Betrachtung möglicher zukünftiger Entwicklungen des Systems in Szenarienanalysen. Die Beschreibung des Ist-Zustandes bildet damit die Basis für die Sicherheitsbewertung des Endlagers.

Für ein HAW-Endlager im Wirtsgestein Salz wurde der hypothetische Ist-Zustand als Referenzkonzept mit den Teilen Endlagerkonzept und Standortmodell beschrieben.

AP1.1: Geologisches Standortmodell
(Federführung BGR)
Die Beschreibung der Standortverhältnisse orientierte sich am aktuellen Kenntnisstand zu norddeutschen Salzstöcken. Wichtige Datengrundlagen bildeten dabei die BGR-Berichte [Bornemann 2004] / [Klinge 2004] / [Zirngast 2003] sowie eine Reihe von BGR-Berichten zur Ermittlung geotechnischer Kenngrößen des Wirtsgesteins Salz.

Das Standortmodell beinhaltet neben der Beschreibung einer repräsentativen Geometrie der Salzstruktur Aussagen zum Aufbau und zur strukturgeologischen Entwicklung des präsalinaren Untergrundes, des Wirtsgesteinskörpers und des Umfeldes sowie zu den tektonischen Verhältnissen.

AP1.2: Konzeptionelle Endlagerplanung
(Federführung DBE TECHNOLOGY GmbH)
Als weitere Grundlage für die Überprüfung des Instrumentariums zur sicherheitlichen Bewertung von HAW-Endlagern in einer Salzformation war eine konzeptionelle Endlagerplanung zu erstellen. Unter Berücksichtigung des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik und des zugrunde gelegten geologischen Standortmodells wurden hierzu die bisher verwendeten Referenzkonzepte für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in einer Salzformation weiterentwickelt.

In einem ersten Schritt wurde das endzulagernde Abfallaufkommen zusammengestellt und hinsichtlich des Mengengerüsts, des Radionuklidinventars, der Gebindeform und anderer sicherheitsrelevanter Merkmale beschrieben.

Im zweiten Schritt wurden Einlagerungstechniken für die jeweiligen Abfallarten beschrieben, wobei wiederum die sicherheitstechnischen Aspekte maßgeblich waren. Anhand von Überschlagsrechnungen und Analogieschlüssen wurde dann das Grubengebäude des Endlagerbergwerkes entworfen.

Im Weiteren wurden die geotechnischen Komponenten des Mehrbarrierensystems entworfen und beschrieben.

AP2: Bewertung der Betriebssicherheit
(Federführung DBE TECHNOLOGY GmbH)

Grundsätzlich wurde untersucht, wie die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen des Bergbaus und des Strahlenschutzes einschließlich der Kritikalitätssicherheit im ungestörten Betrieb sowie bei Betriebsstörungen und Störfällen durch geeignete technisch-organisatorische Maßnahmen gewährleistet werden kann. Im vorliegenden Vorhaben konzentrierte sich die Bewertung der Betriebssicherheit dabei auf die Identifizierung und Betrachtung von möglichen Schwachstellen und relevanten Störfällen. Es war festzustellen, inwieweit die Einhaltung der Anforderungen an die Betriebssicherheit technisch realisierbar ist oder bereits nachgewiesen wurde bzw. welche Defizite oder Konflikte noch bestehen, die durch zukünftige FuE-Arbeiten oder durch Änderungen des unterstellten Endlagerkonzeptes auszuräumen sind.

AP3: FEP-Generierung und Szenarienentwicklung
(Federführung BGR)

AP3.1 – 3.3: Generierung einer spezifischen FEP-Liste und Szenariengenerierung
Für ein HAW-Endlager an einem Referenzstandort im Wirtsgestein Salz wurde eine standortspezifische FEP-Liste in Grundzügen erstellt. Obwohl die FEP-Liste nicht für einen konkreten Standort ermittelt wurde, kann sie als standortspezifisch gelten, da sie speziell für ein HAW-Endlager im Steinsalz angelegt wurde und dabei diejenigen Verhältnisse angenommen wurden, die für einen norddeutschen Salzstock zu unterstellen sind. Die Struktur der Liste orientierte sich an der internationalen FEP-Database der NEA [NEA 2000]. Zunächst wurden das Nahfeld, die Strecken und Schächte, das Wirtsgestein sowie das Deck- und Nebengebirge separat betrachtet und der zeitliche Verlauf der zukünftigen Entwicklung gemäß charakteristischer Veränderungen der Wärmeleistung des Abfalls sowie der Abfolge von Kalt- und Warmzeiten in Abschnitte unterteilt.

Aus dieser prototypischen FEP-Liste wurden beispielhaft Szenarien abgeleitet als Kombinationen von Merkmalen sowie zukünftig stattfindenden Prozessen und Ereignissen, die den Einschluss bzw. die Freisetzung von Radionukliden bewirken oder beeinflussen können.

Das Verfahren der Szenario-Technik wurde wie in der Projektplanung vorgesehen auf die prototypische FEP-Liste angewendet. Dazu wurden die Wechselwirkungen zwischen sämtlichen FEP der Liste beurteilt und das Ergebnis in einer Einflussmatrix und einem Einflussdiagramm dargestellt, in dem sich der Vernetzungs- und Beeinflussungsgrad im System ablesen lässt. Für die bezüglich der Vernetzung als bedeutsam erkannten FEP wurden die möglichen Ausprägungen definiert und die Konsistenz dieser Ausprägungen mit den möglichen Ausprägungen der anderen stark vernetzten FEP beurteilt. Das Ergebnis der Konsistenzabschätzung wurde in einer Konsistenzmatrix eingetragen, auf deren Grundlage eine Cluster-Analyse zur Generierung von Rohszenarien erfolgte.

Durch das vielfache Durcharbeiten der FEP-Liste im Zuge der Anwendung der Szenario-Technik waren Screeningvorgänge zusätzlich zum erfolgten Abgleich mit der NEA-Database nicht notwendig.

AP3.4: Erarbeitung einer umfassenden konsolidierten FEP-Zusammenstellung
(zusätzlich aufgenommen)
Die Arbeiten zur FEP-Generierung und Szenarienentwicklung (AP3) haben gezeigt, dass eine fundierte Zusammenstellung der FEPs sowie deren sorgfältige Beschreibung und Bewertung eine maßgebliche Voraussetzung für die sicherheitliche Bewertung eines Endlagers sind.

Das zusätzliche Arbeitspaket zur Erarbeitung einer umfassenden konsolidierten FEP-Zusammenstellung sollte daher die Möglichkeit bieten, die noch bestehenden Defizite aufzuarbeiten. Dabei wurde der typischen iterativen Vorgehensweise Rechnung getragen, indem auch die Ergebnisse der anderen Arbeitspakete Berücksichtigung fanden. Ziel des zusätzlichen Arbeitspaketes war es, einen reviewfähigen möglichst vollständigen FEP-Katalog zu erstellen, einschließlich einer fundierten Beschreibung und nachvollziehbaren Bewertung.

Den Ausgangspunkt der Bearbeitung bildete die von der BGR im Rahmen des AP3 erstellte vorläufige FEP-Zusammenstellung, die von GRS maßgeblich durch die FEPs ergänzt wurde, die für Freisetzungsszenarien bedeutsam sind. In einem ersten Arbeitsschritt wurde die Vollständigkeit der FEP-Zusammenstellung geprüft. Insbesondere waren alle Aspekte zu berücksichtigen, die geeignet sind, die Integrität der geologischen und technischen Barrieren, sowie die Freisetzung und Ausbreitungsbedingungen von Radionukliden zu beeinflussen. Darüber hinaus sollten, sofern zweckmäßig, komplexe FEPs, die unterschiedliche Wirkungen hervorrufen, in mehrere einfache FEPs aufgelöst werden.

In einem zweiten Arbeitsschritt wurde der beschreibende Teil der FEP-Zusammenstellung überarbeitet bzw. vervollständigt. Dabei war die Konsistenz sowohl mit dem gewählten Referenzkonzept als auch mit den Beschreibungen der anderen FEP-Elemente zu gewährleisten.

Ferner wurden die Wirkungen der FEPs auf die einschlusswirksamen Barrieren und die Wechselwirkungen zwischen den FEPs dokumentiert, um als Grundlage für die späteren Szenarienentwicklung herangezogen zu werden.

Der FEP-Katalog wurde schließlich um eine Präambel ergänzt, die notwendige Erläuterungen, sowie eine Beschreibung der gewählten Vorgehensweise und eine Zusammenfassung der dabei gesammelten Erfahrungen beinhaltet.

AP 4: Integritätsnachweis geologischer Barrieren
(Federführung BGR)

Die Endlagerung von HAW-Abfällen im Wirtsgestein Salz zeichnet sich gegenüber Konzepten in anderen Wirtsgesteinen dadurch aus, dass im Salz der vollständige Einschluss als ungestörte Entwicklung anzusehen ist. Das Wirtsgestein Salz bietet dafür die erforderlichen

Voraussetzungen, da es in den makroskopisch fluidfreien zentralen Partien eines Salzstockes keinen durchströmbaren Porenraum enthält, also dort hydraulisch dicht ist. Diese Eigenschaft einer Barriere, für Flüssigkeiten und Gase nicht durchströmbar zu sein, wird als Integrität bezeichnet.

Ein wichtiges Kriterium für die Integrität stellt der Spannungszustand dar. Untersuchungen zeigen, dass Spannungszustände oberhalb der so genannten Dilatanzgrenze zur Bildung von durchströmbarem Porenraum und damit zum Integritätsverlust der Barriere führen können. Sofern in der Salzstruktur Gas- oder Flüssigkeitsmengen vorhanden sind, ist ihr Druck ein weiteres wichtiges Kriterium, da bei Fluiddrücken oberhalb der kleinsten Hauptnormalspannung ein Vordringen des Fluids im Wirtsgestein und damit ein partieller Integritätsverlust denkbar ist.

Neben diesen mechanischen Wirkungen müssen für die Barriere Steinsalz aufgrund der Wasserlöslichkeit auch chemische Wirkungen beachtet werden. Diese sind relevant bei der Ablaugung einer Salzstruktur, insbesondere im Zusammenhang mit einer halokinetischen Hebung des Salzspiegels. Solche geogenen Prozesse, wie beispielsweise auch die Seismizität am Standort, sind jedoch nicht Bestandteil dieses AP, das ausschließlich die durch die Schaffung der untertägigen Hohlräume und die Einlagerung der Abfälle verursachten integritätsrelevanten Prozesse behandelt.

In diesem AP wurde zunächst dargelegt, welche Prozesse die Integrität der Barriere Salz beeinträchtigen können und welche Kriterien für den Erhalt oder die Beeinträchtigung der Integrität verfügbar sind. Die Vorgehensweise zum Nachweis der Integrität wurde beschrieben und beispielhaft erläutert.

AP5: Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren
(Federführung DBE TECHNOLOGY GmbH)

Die vorrangige Aufgabe der technischen Barrieren, insbesondere der Verschluss-Systeme ist es, in Ergänzung zur geologischen Hauptbarriere, die zwangsweise für die Einlagerung der Abfälle durchörtert werden muss, den sicheren Einschluss der Abfälle zu gewährleisten. Die technischen Barrieren sollen insbesondere ein Zutreten von Lösungen in die verfüllten Grubenbaue und Einlagerungsbereiche wirksam behindern.

Eine Besonderheit der Endlagerung im Salz ist es, dass das arteigene Versatzmaterial Salzgrus infolge von Konvergenz und Kompaktion gleiche Barriereeigenschaften wie die geologische Barriere annehmen kann. Daraus resultieren für die geotechnischen Barrieren bestimmte Anforderungen hinsichtlich der Zeiträume ihrer Wirksamkeit, deren Einhaltung im Einzelnen nachzuweisen ist. Dabei sind gleichfalls die zuvor im Ergebnis der FEP-Filterung ermittelten relevanten Einwirkungen zu berücksichtigen und zu untersuchen, inwieweit sie zur Verletzung der Barrierenwirksamkeit führen können und inwieweit dem durch eine geeignete Auslegung der Barrieren begegnet werden kann. Bestehende Aussageunsicherheiten, Erkenntnislücken und –defizite sind festzuhalten.

In den nachfolgend aufgeführten Unterarbeitspaketen wurden die jeweils genannten technischen Barrieren behandelt, während die nicht genannten technischen Barrieren, wie z. B. geochemischer Buffer und Abfallmatrix, im AP6 im Rahmen der Bewertung nicht auszuschließender Freisetzungen berücksichtigt wurden.

AP5.1: Behälter
Im Einklang mit dem Sicherheitskonzept wurde unterstellt, dass die geforderte Schutzfunktion der Behälter zeitlich auf den Zeitraum bis zum Wirksamwerden anderer technischer Barrieren beschränkt ist. Die Behälterintegrität ist jedoch für die sichere Handhabbarkeit der Abfälle in der Betriebsphase eine maßgebliche Voraussetzung.

AP5.2: Versatz
Eine Sonderstellung nimmt der Salzgrusversatz ein. Im Unterschied zu den (anderen) geotechnischen Barrieren erreicht er seine Wirksamkeit erst mit zunehmender Kompaktion im Laufe der Zeit und soll auf lange Sicht den Einschluss der Abfälle gewährleisten. Es war daher zu untersuchen, inwieweit dieser Kompaktionsprozess bis hin zum Einschluss der Abfälle nachgewiesen werden kann.

AP5.3: Bohrlochverschluss
In Übereinstimmung mit dem in AP1.2 entworfenen Verschlusskonzept soll der Bohrlochverschluss als lose Salzgrusschüttung ausgeführt werden. Er nimmt damit die gleiche Sonderstellung wie der Salzgrusversatz ein.

AP5.4: Streckenverschlüsse
Auf der Grundlage der im AP1.2 entwickelten konzeptionellen Ansätze und Anforderungen für die Streckenverschlüsse wurde eine Methodik für den Integritätsnachweis erarbeitet und die zugehörigen Einzelnachweise bezüglich ihrer Vollständigkeit bewertet.

AP5.5: Schachtverschluss
Der Schachtverschluss ist der sicherheitstechnisch wichtigste Verschluss, da er den Abschluss des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches wiederherstellt. Analog zu den Streckenverschlüssen wurde eine Methodik für den Integritätsnachweis erarbeitet und bezüglich noch bestehender offener Fragestellungen bewertet.

AP6: Ermittlung und Bewertung nicht auszuschließender Freisetzungsszenarien
(Federführung GRS)

In Ergänzung zu den Arbeiten der BGR im AP3, die den Schwerpunkt auf die ungestörte Entwicklung des Endlagersystems legen, wurden in diesem Arbeitspaket beispielhaft einige Freisetzungsszenarien betrachtet, in denen Freisetzungen von Radionukliden aus den endgelagerten Abfällen nicht ausgeschlossen werden können. Für diese Szenarien wurden die FEP identifiziert, die zu einer Beeinträchtigung einer oder mehrerer Barrieren führen können und den Prozessablauf im Endlagersystem charakterisieren. Die daraus resultierende FEP-Liste war eine weitere Grundlage zur Erarbeitung eines FEP-Kataloges für ein HAW-Endlager im Salzgestein (siehe AP 3.4).

AP6.1: Konzept- und Modellentwicklung
Auf der Grundlage der Szenarienentwicklung wurde ein Konzept entworfen, wie die radiologischen Konsequenzen aus den Szenarien hinsichtlich der Einhaltung von Schutzzielen für ein Endlager in einer Salzformation bewertet werden können. Das Konzept zur Bewertung der radiologischen Konsequenzen von gestörten Entwicklungen des Endlagersystems wurde in Anlehnung an bereits durchgeführte Langzeitsicherheitsanalysen zusammengestellt. Wesentliche Bestandteile dieses Konzeptes sind neben der bereits beschriebenen Entwicklung freisetzungsrelevanter Szenarien die Auswahl der für den Sicherheitsnachweis geeigneten Modelle und Rechenprogramme, die Anpassung dieser Modelle und Rechenprogramme an standortspezifische Gegebenheiten und die Ermittlung und Überprüfung aller Eingangsdaten. Eine Bewertung von Unsicherheiten in den Modellen, deren Eingangsdaten und Parameter mittels Sensitivitätsanalysen war nicht Thema in AP6. Untersuchungen zur Kritikalität in der Nachbetriebsphase wurden nicht in diesem Arbeitspaket durchgeführt, sondern in AP2 gemeinsam mit der Betriebsphase behandelt.

AP6.2: Konsequenzenanalyse
Die in AP 6.1 zusammengestellten Modellansätze für die Prozesse im einschlusswirksamen Gebirgsbereich, im Fernfeld sowie in der Biosphäre wurden für die identifizierten Freisetzungsszenarien getestet und die Konsequenzen einer eventuellen Freisetzung analysiert. Bei der Bewertung der Analyseergebnisse wurden sowohl radiologische Indikatoren als auch Indikatoren eingesetzt, die sich stärker an dem Sicherheitskonzept des sicheren Einschlusses orientieren.

Im Ergebnis der Konsequenzenanalyse in AP6.2 wurde letztendlich die Vollständigkeit des Instrumentariums hinsichtlich aller relevanter FEP bewertet und noch bestehende Erkenntnisdefizite und -lücken als FuE-Bedarf ausgewiesen.

AP7: Nachweiskonzepte für die Einhaltung der nicht radiologischen Schutzziele in der Nachbetriebsphase
(Federführung DBE TECHNOLOGY GmbH)

Neben der Einhaltung der radiologischen Schutzziele sind insbesondere der Schutz der Tagesoberfläche (Hebungen und Senkungen) und der Grundwasserschutz nachzuweisen.

AP7.1: Grundwasserschutz
Für ein HAW-Endlager im Salz wurde die Notwendigkeit einer wasserrechtlichen Erlaubnis für die Nachbetriebsphase analysiert und geprüft, inwieweit Abschätzungen zu den Folgen einer nicht vollständig auszuschließenden gestörten Entwicklung erforderlich sind. Entsprechende Nachweiskonzepte wurden erstellt. Grundsätzlich wurde jedoch davon ausgegangen werden, dass hinsichtlich chemo-toxischer Kontaminationen keine anderen Anforderungen gestellt werden als an Untertagedeponien für besonders überwachungsbedürftige (nicht radioaktive) Abfälle und dass der Besonderheit von möglichen radioaktiven Kontaminationen durch die Einhaltung der radiologischen Schutzziele hinreichend Rechnung getragen wird.

AP7.2: Schutz der Tagesoberfläche
Insbesondere unter Berücksichtigung der notwendigen bergbaulichen Auffahrungs- und späteren Versatzmaßnahmen, sowie der thermomechanischen Konsequenzen aus der Einlagerung wärmeerzeugender Abfälle war zu prüfen, ob die Einhaltung einer akzeptierbaren Schiefstellung von < 1/300 in 100 Jahren nachgewiesen werden kann.

AP8: Empfehlungen für zukünftig erforderliche FuE-Arbeiten
(Federführung DBE TECHNOLOGY GmbH)

Die Empfehlungen für zukünftig notwendig werdende FuE-Arbeiten wurden anhand der in den vorangegangenen APs erkannten Erkenntnislücken und Defizite hinsichtlich des Nachweises der technischen Realisierbarkeit und der Endlagersicherheit formuliert.

Sie beinhalten insbesondere vertiefende Untersuchungen hinsichtlich der Wirksamkeit der technischen und geologischen Barrieren sowie zum Nachweis ihrer Integrität. Dabei finden Untersuchungen zu den geologischen Barrieren ihren Niederschlag auch in Anforderungen an zukünftige Arbeiten zur Standorterkundung.

Darüber hinaus war zu prüfen, inwieweit weitergehende Untersuchungen bezüglich der Szenarienanalyse insbesondere hinsichtlich der Relevanz einzelner FEPs und daraus abgeleiteter Szenarien sowie die Weiterentwicklung der Tools für die Bewertung nicht auszuschließender Freisetzungen erforderlich sind.

Ferner wurden Vorschläge für Demonstrationsversuche abgeleitet, um die technische Realisierbarkeit von maßgeblichen Komponenten des Endlagersystems in Übereinstimmung mit den in den Sicherheitsnachweisen zugrunde gelegten Anforderungen praktisch nachzuweisen.

Die entsprechenden Ergebnisse und Empfehlungen wurden in diesem Abschlussbericht zusammengestellt.

2 Geologisches Modell des Referenzstandortes

Datenbasis

Als Basis für die Betrachtung möglicher zukünftiger Entwicklungen während des Nachweiszeitraums von einer Million Jahre im Rahmen von Szenarien- und Konsequenzenanalysen ist die Geologie, Hydrogeologie, etc. des Referenzstandortes zu beschreiben. Die Daten wurden auf Grundlage der bisher durchgeführten Erkundungsergebnisse zum Standort Gorleben zusammengestellt.

Kurzbeschreibung des Standortmodells

Die Salzstock-Struktur setzt sich aus Salzgesteinen der Zechstein-Folgen z2 bis z4 (Staßfurt-, Leine- und Allerfolge) mit primären Mächtigkeiten von ca. 1080 bis 1330 m zusammen. Die Entwicklung zu einem Salzdiapir erfolgte hauptsächlich in der Zeit von der Trias bis zur Oberkreide. Der Internbau des Salzstocks ist durch eine starke Verfaltung der Schichtfolgen gekennzeichnet. Infolge des Salzaufstiegs wurden die kompetenten Schichten des Hauptanhydrits zerbrochen und in isolierte Blöcke zerlegt.

Im Salzstock Gorleben und grundsätzlich bei den durch Zechsteinschichten aufgebauten Salzstöcken in Deutschland sind zwei unterschiedliche Deformationsstockwerke verwirklicht. Das eine umfasst die Steinsalze der Staßfurt-Folge (z2) und das andere die jüngeren Schichten der Leine- und Aller-Folge (z3 u. z4). Insgesamt können vier tektonisch-stratigraphische Einheiten am Referenzstandort ausgehalten werden. Die Einheit 1 umfasst die NW-Flanke des Salzstocks mit Schichten der Leine- und Aller-Folge. Daran schließt sich nach SE die Einheit 2 an, die die Kernzone des Salzstocks darstellt und aus einem einfach gebauten Sattel des Hauptsalzes der Staßfurt-Folge besteht. In südöstlicher Richtung folgt die Einheit 3 mit der SE-Flanke des Salzstocks, die eine markante inverse Mulde darstellt und z3- und z4-Schichten enthält. Die Einheit 4, ein nach SE angrenzender Salzüberhang, besteht vorwiegend aus überkippt gelagertem Hauptsalz, das der Kernzone entstammt. Die beschriebenen Lagerungsverhältnisse in diesem Salzstockprofil sind mit der Bewegungsgeschichte des aufdringenden Salzes zu erklären. Während des Diapirstadiums überfaltete das fließfähigere Hauptsalz der Staßfurt-Folge die langsam fließenden, zurückbleibenden Salzgesteine der Leine- und Aller-Folge und legte sich zumindest im SE als Salzüberhang über die älteren Nebengesteine der Oberkreide. Dabei wurden die Salzgesteine des z3/z4 als inverse Mulde ausgeformt (Abbildung 2-1).

Salzstockintern wurden Lösungen und Gase angetroffen, die stratigraphisch und strukturell bedingt auf bestimmte Horizonte beschränkt und an räumlich begrenzte Kluftvorkommen gebunden sind (z. B. Hauptanhydrit, Grenze z2/z3). Mögliche Einlagerungsbereiche im Kern des Salzstocks (Hauptsalz des z2) sind nahezu frei von solchen Vorkommen. Die Fluide wurden im Zuge des Salzaufstiegs in ihren heutigen Positionen fixiert und besitzen damit ein Alter oberhalb der Oberkreide-Zeit, also von mindestens 100 Mio. Jahren.

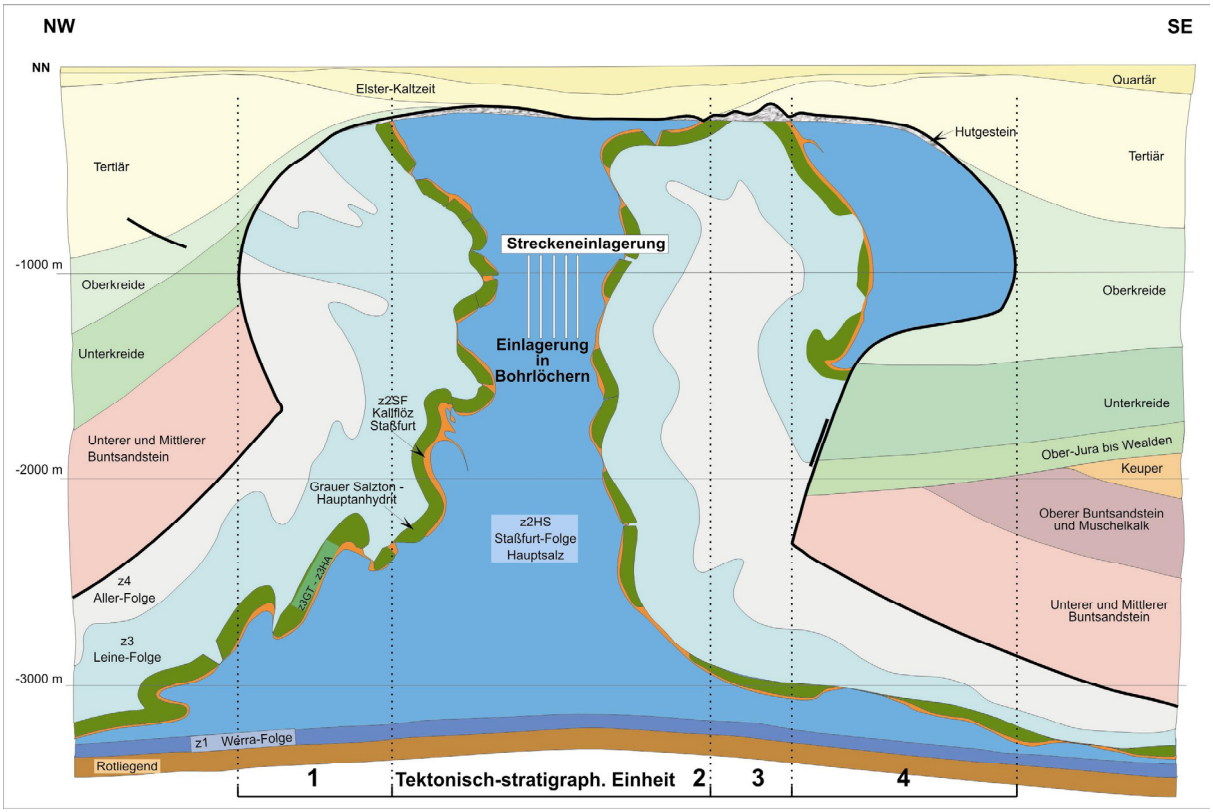

Abbildung 2-1: Vereinfachter, schematischer Schnitt durch den Salzstock des Referenzstandortes [Bornemann 2004].

In tektonischer Hinsicht gilt das Referenzgebiet ab dem jüngeren Tertiär als stabil. Lediglich geringe Subsidenzbewegungen sind für den Nachweiszeitraum zu erwarten. Ein weiterer Salzaufstieg ist unter diesen Voraussetzungen nicht zu erwarten.

Neben und über der Salzstruktur lagern Gesteine unterschiedlicher fazieller Entwicklung aus dem Zeitraum Trias bis Tertiär. Strukturell sind sie durch den Salzaufstieg geprägt. Die obersten sandig bis tonigen Schichten gehören dem Quartär an. Sie sind in einer glazigenen Rinne, die den Salzstock kreuzt und ältere Gesteine durchschneidet, besonders mächtig und liegen stellenweise direkt dem Salzspiegel auf. Diese Lagerungsverhältnisse und ein permeables Hutgestein lassen eine Ablaugung des Salzgesteins in Abhängigkeit von möglichen hydraulischen und geochemischen Veränderungen im Laufe des Nachweiszeitraumes weiterhin zu. Es wird erwartet, dass die Ablaugungsraten durchschnittliche Werte im Bereich von einigen hundertstel Millimetern pro Jahr erreichen.

Die tertiären und quartären Deckschichten im Umfeld des Salzstocks Gorleben bilden ein bis zu maximal 430 m mächtiges System von Grundwasserleitern und -geringleitern. Prägendes hydrogeologisches Strukturelement im Deckgebirge des Salzstocks ist die Gorlebener Rinne.

Hydrogeologisch lässt sich die über dem Salzstock und in den Randsenken verbreitete Schichtenfolge in ein oberes und ein unteres, durch Grundwassergeringleiter hydraulisch getrenntes, Hauptgrundwasserstockwerk gliedern. Untere Braunkohlensande und elsterzeitliche Rinnensande bilden einen im Norden und Süden des Salzstocks hydraulisch verbundenen unteren Grundwasserleiter, die weichsel- und saalezeitlichen Ablagerungen den oberen Grundwasserleiter. Beide Systeme werden durch die Grundwassergeringleiter Hamburg-Ton und Lauenburger-Ton-Komplex getrennt. Die Trennschichten sind in der Gorlebener Rinne sowie nördlich der Elbe lückenlos verbreitet, während im Südosten und Nordwesten größere Verbreitungslücken bestehen, so dass beide Grundwasserleiter hier in direktem Kontakt stehen.

Die oberflächennahe Grundwasserbewegung und großräumige hydrogeologische Situation ist geprägt durch die Lage im Elbeurstromtal. Das Grundwasser fließt generell von den Höhen der Geest den Niederungen zu. Hier wird der größte Teil des neu gebildeten Grundwassers oberirdisch in die Elbe abgeführt. Nur ein sehr kleiner Teil trägt zu einem Elbtal abwärts gerichteten Grundwasserabfluss bei. Der tiefere Grundwasserabstrom wird durch die hochsalinen Ablaugungswässer von der Salzstruktur und den benachbarten Salzstöcken beeinflusst. Aus der derzeitigen Süß-/Salzwasserverteilung können zwei Hauptausbreitungspfade der Salzwässer aus dem Kontaktbereich zwischen dem Zechsteinsalinar und dem elsterzeitlichen Rinnengrundwasserleiter abgeleitet werden (Abbildung 2-2):

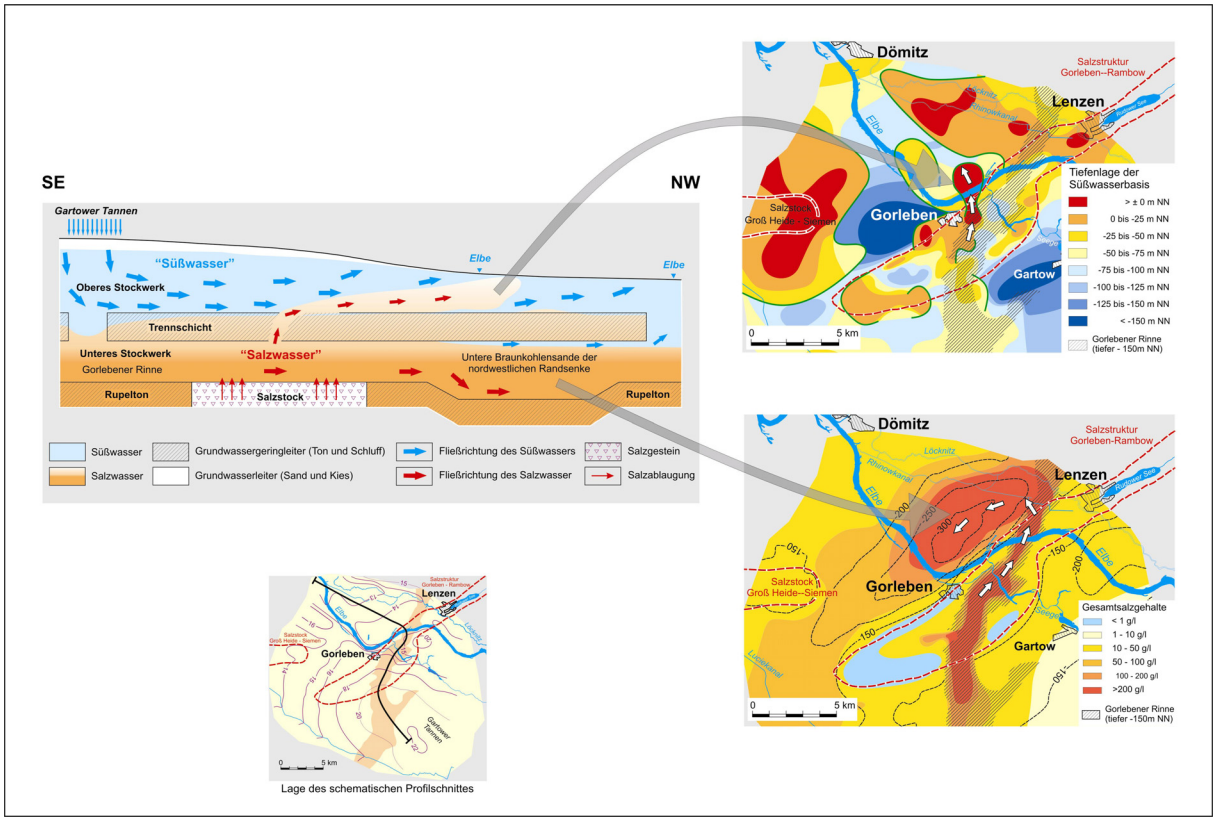

Abbildung 2-2: Schema des Salzwassertransports aus der Gorlebener Rinne [Klinge 2004]

1. Ein Salzwassertransport aus der Gorlebener Rinne in die Randsenke im Nordwesten des Salzstocks. Aufgrund der im Vergleich zu Süßwasser erhöhten Dichte der hochkonzentrierten Solen sammeln sich diese in der geschlossenen Muldenstruktur dieser Randsenke, ohne dass ein nennenswerter direkter vertikaler Austrag in oberflächennahe Grundwasserleiter erfolgt.

2. Ein wahrscheinlich direkter vertikaler Salzwasseraufstieg in den oberen Grundwasserleiter im Bereich eines lokal begrenzten hydraulischen Fensters am Westrand der Gorlebener Rinne. Die Salzwässer breiten sich mit dem regionalen Grundwasserabstrom nach Norden aus und erreichen in den Grundwasseraufstromgebieten der Elbeniederung in verdünnter Form die Grundwasseroberfläche.

Bewertung des vorliegenden Kenntnisstandes

Die für eine Langzeitsicherheitsanalyse relevanten und wesentlichen Inhalte aus dem vorliegenden Referenzstandortmodell sind:

1. Am Referenzstandort steht ein Einlagerungsmedium (Hauptsalz) in der geforderten großen Tiefe von ca. 800 bis 1000 m für die Einlagerung von hochradioaktiven, Wärme erzeugenden Abfällen in ausreichender Menge und unverritzt zur Verfügung.

2. Die Verteilung natürlicher Klüfte im Salzstock und der damit verbundenen Fluidvorkommen folgt bekannten Gesetzmäßigkeiten.

3. Der Hauptanhydrit ist in Schollen zerbrochen, die hydraulisch voneinander isoliert sind. Fluidmigrationen zwischen Einlagerungsbereichen und Deck- und Nebengebirge über den Hauptanhydrit sind daher nicht möglich.

4. Die Art, Genese und das Alter von Salzlösungsvorkommen innerhalb des Salzstocks sind bekannt und ihre Lage relativ zu einer möglichen Auffahrung der Einlagerungsbereiche vorhersehbar. Der Bereich des Hauptsalzes ist nahezu frei von Lösungsvorkommen. Sie sind untereinander nicht vernetzt. Dies gilt ebenfalls für die im zentralen Teil des Hauptsalzsattels auftretenden Kohlenwasserstoffvorkommen.

5. Das Wirtsgestein befindet sich im chemischen Gleichgewicht mit darin enthaltenen Fluiden. Im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sind keine von außerhalb des Salzstocks eingedrungenen Gebirgswässer vorhanden.

6. Die Entwicklung des Salzstocks ist abgeschlossen, so dass mit keinen hohen Aufstiegsraten innerhalb des Nachweiszeitraumes von einer Million Jahre gerechnet werden muss.

7. Die Integrität der Salzbarriere ist aus geologischer Sicht gewährleistet, da sich der Referenzstandort in einer tektonisch ruhigen Zone befindet und sich nur geringe Subrosionsraten im langfristigen geologischen Mittel herleiten lassen.

8. Die im Deckgebirge vorhandene Hydrodynamik bewirkt, dass das Deckgebirge im Gegensatz zum Hauptsalz als eine Barriere zu betrachten ist, die nur eine geringe Rückhaltefunktion für Radionuklide beinhaltet. Dagegen würde das Deckgebirge aufgrund der Grundwasserbewegungen einen Beitrag zur Verdünnung möglicher Radionuklidkonzentrationen in der Geosphäre liefern.

Empfehlungen für weiterführende Arbeiten

Die untertägige Erkundung am Referenzstandort ist im Rahmen der Auffahrung von Einlagerungsbereichen entsprechend einem noch festzulegenden Einlagerungskonzept weiterzuführen. Im Falle einer Einlagerung in tiefen Bohrlöchern müsste die Salzstockerkundung in größere Tiefen ausgeweitet werden.

Neben dieser begleitenden Erkundung sollten die im Hauptsalz vorkommenden isolierten Kohlenwasserstoffvorkommen einer eingehenden Bewertung bezüglich ihrer Relevanz für die Langzeitsicherheitsanalyse unterzogen werden.

Weiterführende geochemische Arbeiten sind sinnvoll, in denen Isotopenuntersuchungen zur Altersdatierung von Kluftmineralen bzw. zur Genese von interkristallinen Lösungseinschlüssen vorgenommen werden.

3 Konzeptionelle Endlagerplanung

Das Referenzkonzept für die Endlagerung von Wiederaufarbeitungsabfällen (HAW) und ausgedienten Brennelementen sollte weiterentwickelt werden. Zu berücksichtigen waren dabei der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik, das Sicherheitskonzept für ein geologisches Endlager in Salzformationen und das geologische Standortmodell. Ziel war es, gegebenenfalls notwendige Untersuchungen zu sicherheitstechnisch relevanten Themen zu identifizieren. Im Rahmen der Konzeptweiterentwicklung wurden dazu vier wesentliche Bereiche betrachtet: das Abfallmengengerüst, eine darauf ausgerichtete Grubengebäudeplanung, die Transport- und Einlagerungstechnik und die geotechnischen Barrieren. Die Ergebnisse der Analyse und Planungen werden im Folgenden zusammengefasst.

3.1 Endzulagerndes Inventar

Die in diesem Vorhaben neu ermittelte endzulagernde Menge an hochradioaktiven und wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen basiert auf dem Mengengerüst des Entwurfs des Nationalen Entsorgungsplans [BMU 2003]. Dort wird die Beendigung der Nutzung der Kernenergie gemäß der Konsensvereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen vom 14.06.2000 zu Grunde gelegt. Dieses Mengengerüst wurde durch Anfragen bei den Hauptablieferungspflichtigen aktualisiert und ist in der Tabelle 3-1 zusammenfassend dargestellt. In den Abbildungen 3-1 bis 3-3 sind die verschiedenen Endlagergebinde graphisch dargestellt.

Zu den Abfällen aus der Wiederaufarbeitung ausgedienter Brennelemente zählen HAW-Kokillen (CSD-V) mit verglasten hochradioaktiven Spaltprodukten und Feedklärschlämmen, verglaste mittelradioaktive Deko- und Spülwässer (CSD-B) und kompaktierte mittelradioaktive Brennelementhülsen, Strukturteile und Technologieabfälle (CSD-C). Das Mengengerüst berücksichtigt die bei der Verglasungseinrichtung des Forschungszentrums Karlsruhe (VEK) anfallenden HAW-Kokillen und die aus England und Frankreich zurückzuführenden Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (WA-Abfälle). Von BN-GS (British Nuclear Group Sellafield, ehemals BNFL British Nuclear Fuels) werden ausschließlich WA-Abfälle in Form von HAW-Kokillen zurückgeführt. Von AREVA-NC (ehemals COGEMA, La Hague) sind neben HAW-Kokillen (CSD-V) auch mittelradioaktive WA-Abfälle (CSD-C und CSD-B) zurückzuführen. In diesem Vorhaben wird von einer Menge endzulagernder Brennelemente mit insgesamt 10.678 tSM aus DWR, SWR und aus DWR russischer Bauart (WWER-DWR) ausgegangen. Es ist vorgesehen, die WA-Abfälle ohne zusätzliche Verpackung in Bohrlöchern endzulagern. Für die Brennelemente aus Leistungsreaktoren (DWR, SWR, WWER-DWR) wird einerseits die Streckenlagerung in POLLUX-Behältern und alternativ die Bohrlochlagerung in Brennstabkokillen (BSK) betrachtet. Für die CASTOR-Behälter der Typen AVR/THTR, MTR 2 und KNK mit Brennelementen aus Forschungsreaktoren wird vorrangig die Streckenlagerung betrachtet; eine Umkonditionierung zur Endlagerung in vertikale Bohrlöcher wäre zu prüfen.

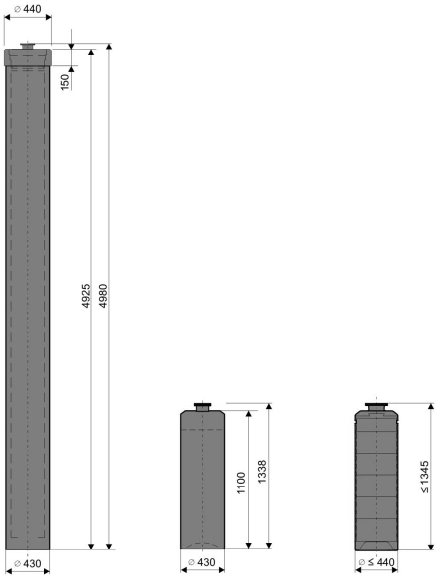

Abbildung 3-1: Brennstabkokille (BSK), links, HAW-Kokille, Mitte, (CSD-V, entspricht auch CSD-B) und CSD-C, rechts

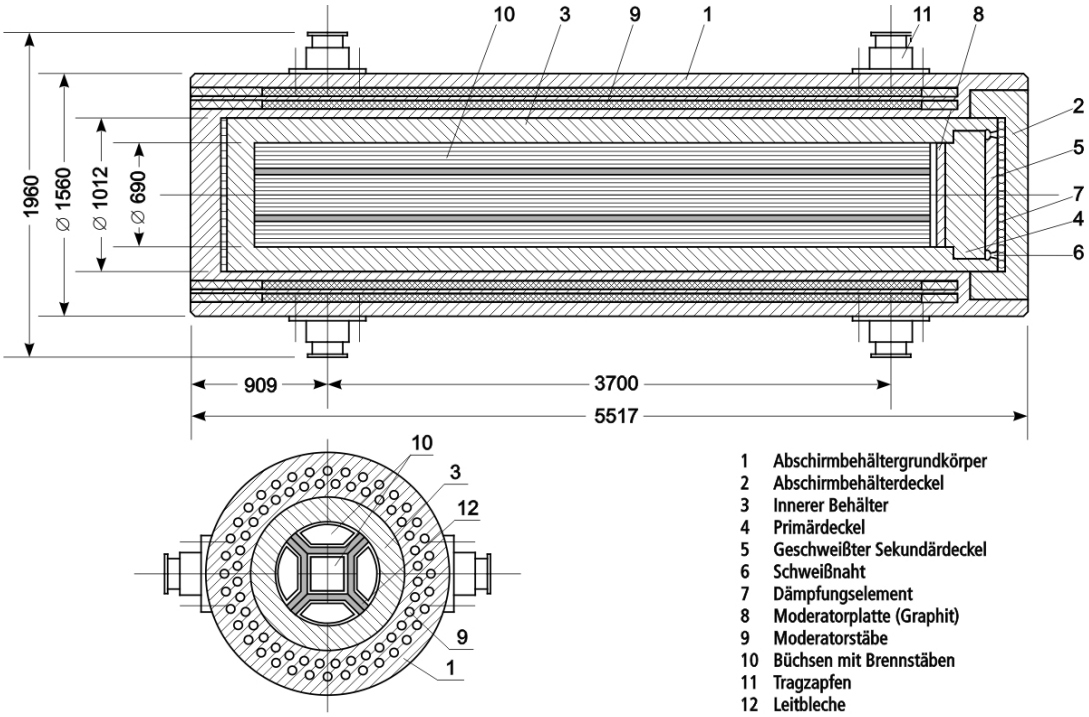

Abbildung 3-2: POLLUX-Behälter

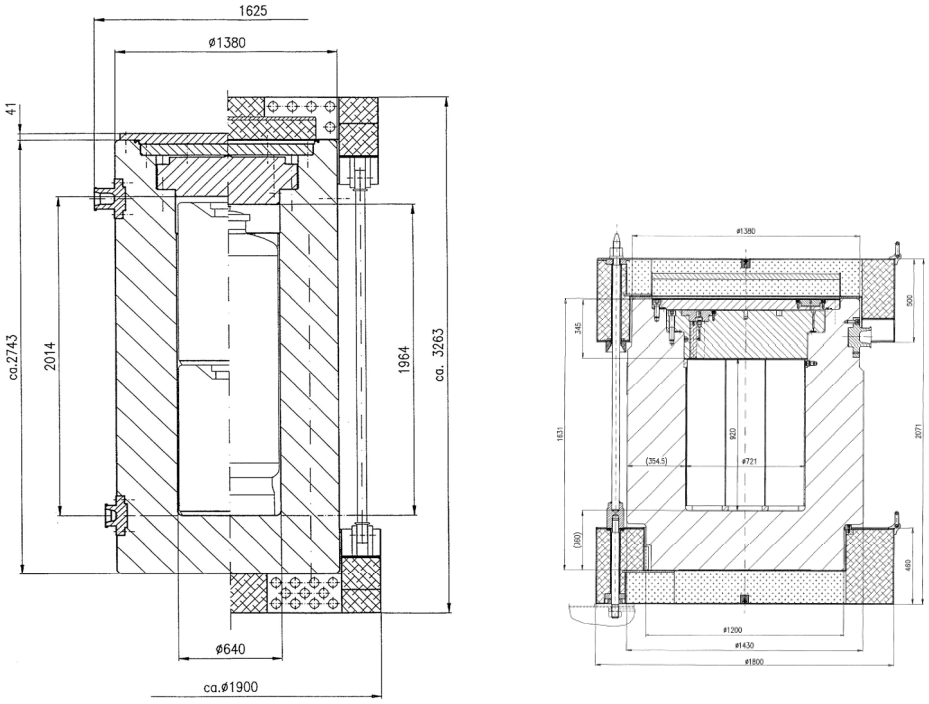

Abbildung 3-3: CASTOR AVR/THTR, links, (entspricht im wesentlichen auch CASTOR KNK) und CASTOR MTR 2, rechts

Die Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über die Anzahl der Endlagergebinde. Bei einer Endlagerung der gezogenen Brennstäbe ausgedienter Brennelemente aus Leistungsreaktoren in POLLUX-Behältern liegt die Anzahl der Endlagergebinde bei insgesamt 13.795 Stück; kämen alternativ dazu BSK zum Einsatz, würde die Anzahl der Endlagergebinde bei insgesamt 18.567 Stück liegen. Bei Verwendung von POLLUX-Behältern wird die Gesamtmasse der Endlagergebinde mit insgesamt 153.990 Mg und das Gesamtvolumen mit 25.674 m³ abgeschätzt; mit BSK würde die Gesamtmasse der Endlagergebinde bei insgesamt 57.195 Mg mit einem Gesamtvolumen von 9.008 m³ liegen. Das Inventar der Gesamtaktivitäten wird insgesamt mit ca. 6,2E+20 Bq abgeschätzt. Die wesentlichen Aktivitätsanteile befinden sich in den ausgedienten Brennelementen aus Leistungsreaktoren und den HAW-Kokillen.

Tabelle 3-1: Mengengerüst der hochradioaktiven wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle

Endlagergebinde	Anzahl
HAW-Kokille	3.767
CSD-B	560
CSD-C	6.902
POLLUX-Behälter oder Brennstabkokille (BSK)	2.045 oder 6.817
CASTOR AVR/THTR	459
CASTOR MTR 2	58
CASTOR KNK	4
Gesamt	13.795 oder 18.567

3.2 Auslegung eines Grubengebäudes

Das Sicherheitskonzept des Endlagers beruht hinsichtlich der Auslegung des Grubengebäudes darauf, - wie in der Einleitung bereits erwähnt - dass der Integritätsnachweis für die geologische Barriere geführt werden kann. Das bedeutet, dass der Zuschnitt und die Anordnung der für die vorgegebene Abfallmenge benötigten Grubenräume so geplant werden müssen, dass stets die Dilatanz- und Hydrofrac-Kriterien eingehalten werden. Das betrifft sowohl die Einlagerungsstrecken und -bohrlöcher als auch alle Grubenräume für die Infrastruktur wie Transportstrecken, Werkstätten und Lagerräume. Für all diese Hohlräume müssen hinreichend große Sicherheitsabstände zu potentiellen Störungszonen und relevanten Schichtgrenzen eingehalten werden.

Die wesentliche Auslegungsrandbedingung für das Grubengebäude ist das Temperaturkriterium von 200 °C, das zu keiner Zeit im gesamten Endlager überschritten werden darf. Dieses erfordert eine systematische Planung der Anordnung von Einlagerungsstrecken und –bohrlöchern und deren Belegung mit Endlagerbehältern. Mittels vorlaufender thermischer Berechnungen werden dazu deshalb entsprechende Strecken- und Bohrlochabstände ermittelt. Qualifizierte Berechnungsmodelle dafür sind vorhanden.

3.2.1 Grundlagen und Vorgehensweise

Da es nicht Ziel war, ein vollständig neues Endlagerkonzept zu entwickeln, sondern unter Berücksichtigung des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik und des reduzierten Mengengerüstes durch Analogieschlüsse ein technischen Endlagerkonzept zu beschreiben, wurde folgende Vorgehensweise gewählt.

Auf Basis einer bereits vorliegenden Endlagerkonzeption für den Standort Gorleben [Filbert 1998] wurde mit dem vorgenannten Mengengerüst an Endlagerbehältern (Tabelle 3-1) eine

Grubengebäudeauslegung für zwei Varianten durchgeführt. Einerseits wurde die gemeinsame Einlagerung von POLLUX-Endlagerbehältern in horizontalen Strecken und HAW-Kokillen und CSD-C in vertikalen Bohrlöchern geplant. Als Alternative dazu wurde andererseits die Endlagerung aller Endlagerbehälter in vertikalen Bohrlöchern (ausgediente Brennstäbe in Brennstabkokillen (BSK 3)sowie HAW-Kokillen und CSD-C) vorgesehen. Die Ergebnisse dieser Planungen, die nachfolgend in den Abbildungen 3-4 und 3-5 zusammengefasst werden, wurden für die Langzeitsicherheitsuntersuchungen bereitgestellt, um dort mit aktuellem Mengengerüst und angepasstem Grubengebäude einige Freisetzungsberechnungen für gestörte Entwicklungen des Endlagers durchführen zu können.

3.2.2 Randbedingungen

Das Endlager, das in einer Teufe von 870 m angelegt ist, wird über zwei Schächte betrieben, von denen der eine für die Einförderung der Endlagerbehälter und gleichzeitig für die Abfuhr der Wetter dient. Der zweite, über den die Frischwetter einziehen, wird für Mannschafts- und Materialtransport genutzt. Das an die Schächte angeschlossene Grubengebäude ist mit getrennten Wetterführungen für den kerntechnischen Bereich (Endlagerbehältertransport und -einlagerung) und den bergmännischen Bereich (Streckenauffahrung und Versatztransport) auszulegen.

Neben der bereits genannten thermischen Randbedingung sind auch bergbauliche Randbedingungen (z. B. Mindestpfeilerbreiten, Schachtsicherheitspfeiler) einzuhalten. Die betrieblichen und thermischen Randbedingungen führen dazu, dass die Endlagerbehälter im Rückbau eingelagert werden, d. h. zunächst werden die vom Schacht entferntesten Felder belegt und die entsprechenden Strecken und Bohrlöcher verfüllt und verschlossen.

Für die detaillierten Grubengebäudeplanungen sind maximale Längen für Einlagerungsstrecken (250 m), Mindestlängen für Streckenverschlüsse (15 m) und Behälterabstände (1 m) angenommen worden. Bei genauer Kenntnis der geologischen Verhältnisse im Einlagerungsbereich sind diese Annahmen bei weitergehenden Planungen zu konkretisieren. Als Einlagerungshorizont für die Streckenlagerung von POLLUX-Behälter wurde die 870 m-Sohle gewählt; die HAW-Kokillen und CSD-C sowie die BSK 3 werden von dieser Sohle in 300 m tiefe vertikale Bohrlöcher eingelagert. Nicht berücksichtigt wurden bei den Planungen der Grubengebäude die Brennelemente aus Forschungsreaktoren, die in Castor-Behältern lagern sowie die CSD-B.

3.2.3 Grubengebäude für Strecken- und Bohrlochlagerung

Unter Zugrundelegung des vorgenannten Mengengerüstes und der Randbedingungen wurde ein Grubengebäude für die Streckenlagerung von POLLUX-8-Behältern und die Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen und CSD-C geplant. In Abbildung 3-4 ist das entsprechende Grubengebäude dargestellt. Für jede der drei Abfallarten wurden getrennte Einlagerungsfelder mit rund 300 m Breite angelegt, wobei sich für das in Kapitel 3.1 beschrieben Mengengerüst jeweils 1 HAW- und 1 CSD-C-Feld ergeben. Für die Einlagerung aller

POLLUX-Behälter werden in diesem Konzept acht Felder benötigt. In weiteren Planungen wäre zu untersuchen, ob HAW-Kikillen und CSD-C gemeinsam in Bohrlöchern eingelagert werden könnten. Dabei wäre auch die Einlagerung Brennelemente aus Forschungsreaktoren und der CSD-B zu berücksichtigen. An der Konzeption und der Größe des Grubengebäudes würde sich dadurch jedoch wenig ändern.

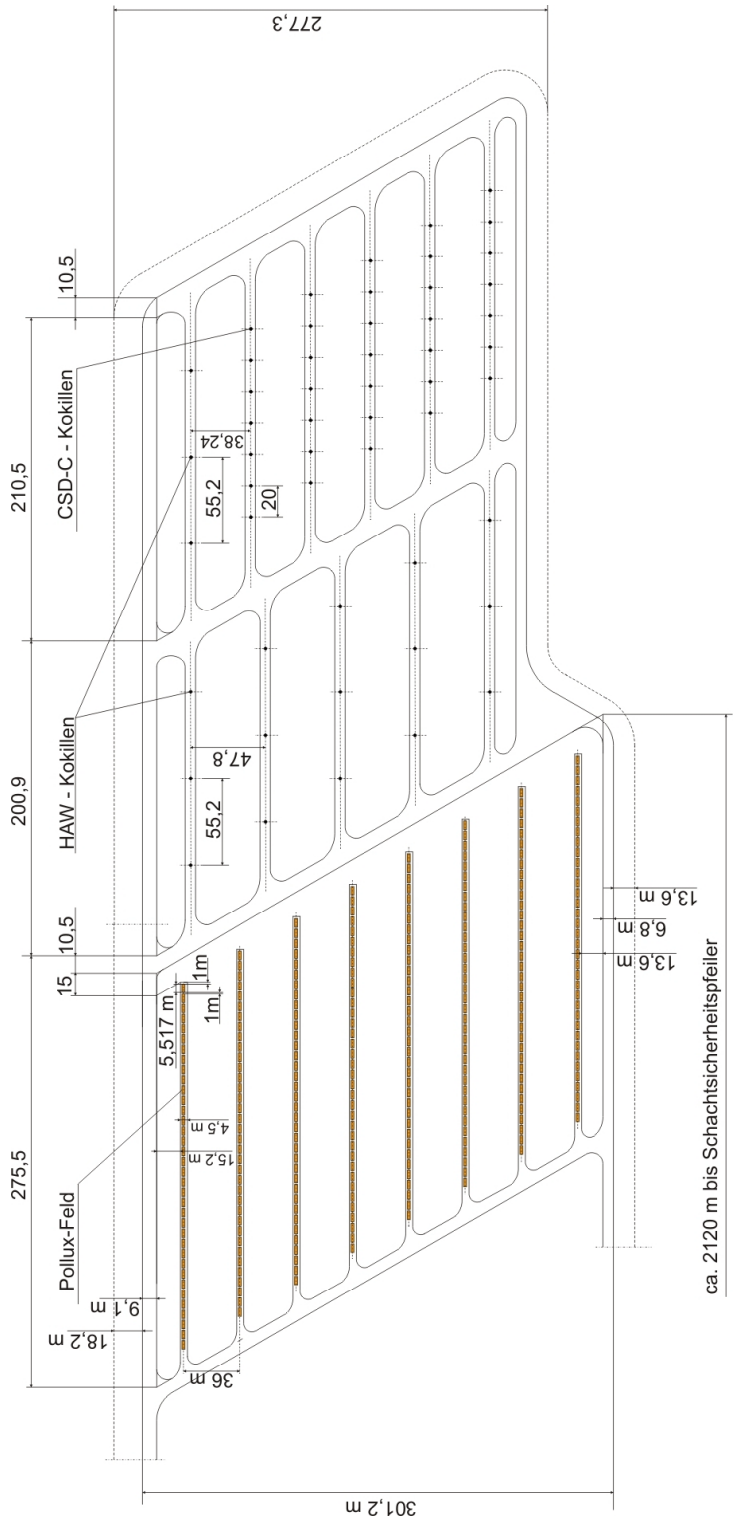

Abbildung 3-4: Grubengebäude für gemeinsame Strecken- und Bohrlochlagerung

3.2.4 Grubengebäude für reine Bohrlochlagerung

Beim Konzept der „reinen Bohrlochlagerung“ in 300 m tiefen vertikalen Bohrlöchern werden die Brennstäbe von ausgedienten Brennelementen in Brennstabkokillen (BSK 3) verpackt. Unter Berücksichtigung des o. g. Mengengerüstes für HAW-Kokillen und CSD-C sowie BSK 3 werden insgesamt elf Einlagerungsfelder benötigt. Abbildung 3-5 zeigt dafür den Zuschnitt eines vollständigen Grubengebäudes, bei dem die Felder wiederum mit einer Breite von ca. 300 m ausgelegt wurden. Bei Kenntnis der exakten geologischen Struktur in den potentiellen Einlagerungsbereichen kann diese Feldesbreite angepasst werden.

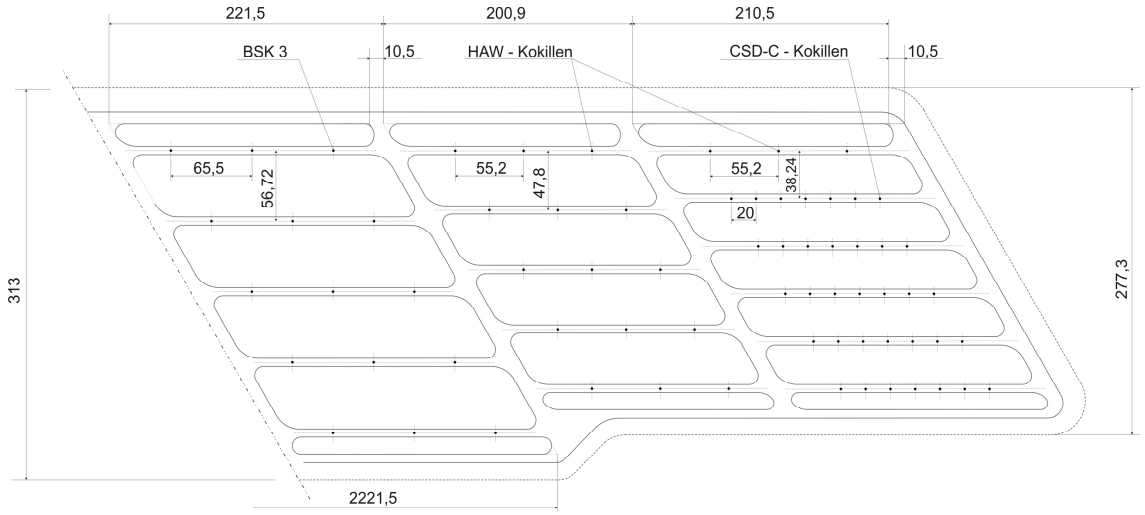

Abbildung 3-5: Grubengebäude für reine Bohrlochlagerung

Im Rahmen einer Überprüfung der Grubengebäudeauslegung wurden exemplarisch thermische Berechnungen für das Konzept der Bohrlochlagerung von BSK 3-Kokillen durchgeführt. Damit sollten die Auswirkungen auf die Auslegungsparameter (Behälter-, Strecken- und Bohrlochabstände) bei Berücksichtigung realitätsnaher Bedingungen (Temperaturprofil über Bohrlochlänge, temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) untersucht werden. Es zeigte sich, dass gegenüber Berechnungen mit vereinfachten Annahmen Optimierungen hinsichtlich der Ausnutzung des Salzstockvolumens möglich sind.

3.3 Transport- und Einlagerungstechnik

Basierend auf den vorher beschriebenen beiden Grubengebäudeplanungen wurde der Stand der Entwicklung der erforderlichen Transport- und Einlagerungstechnik für POLLUX-Behälter sowie BSK 3, HAW-Kokillen, CSD-B und CSD-C untersucht und beschrieben.

Für das Konzept der Streckenlagerung von POLLUX- Behältern ist gemäß [Filbert 1998]. ein gleisgebundener Transport des Endlagerbehälters vorgesehen. Der Transport nach unter Tage erfolgt über eine dafür ausgelegte Schachtförderanlage, die Nutzlasten bis 85 t fördern kann. Für den Transport unter Tage wird eine batteriebetriebene Grubenlokomotive und ein für den POLLUX-Behälter entwickelter Plateauwagen eingesetzt. In der Einlagerungsstrecke

wird der Behälter von einer Einlagerungsvorrichtung vom Plateauwagen gehoben und anschließend sicher auf dem Streckenboden abgelegt. Die für diesen Transport und die Einlagerung erforderlichen Komponenten wurden im Rahmen von zwei FuE-Vorhaben (Simulation des Schachttransportes, Handhabungsversuche zur Streckenlagerung) in den 90er-Jahren bis zur Genehmigungsreife entwickelt und erprobt und stehen zur Anwendung zur Verfügung. Abbildung 3-6 zeigt den Versuchsstand zur Erprobung des gleisgebundenen Transportes von POLLUX-Behältern und zur Einlagerung mittels einer dafür ausgelegten Einlagerungsmaschine.

Abbildung 3-6: Erprobung der Transport- und Einlagerungstechnik für POLLUX-Behälter am Versuchsstand Peine

Für den Transport und die Einlagerung von HAW-Kokillen wurden im Rahmen von FuE-Vorhaben bereits in den 80er-Jahren vom Institut für Tieflagerung der GSF Komponenten entwickelt und im Forschungsbergwerk Asse erprobt. Dabei handelte es sich zum einen um einen Einzelabschirmbehälter für den sicheren Transport der Kokillen von über Tage bis zum Einlagerungsort und zum anderen um ein Einlagerungsfahrzeug zur Entladung der HAW-Kokille aus dem Einzelabschirmbehälter und zur Einlagerung in ein Bohrloch. Ein gleisgebundener Transport war damals nicht vorgesehen. Im Zuge der Neuentwicklung und Erprobung einer Transport- und Einlagerungstechnik für POLLUX-Behälter wurde aus sicherheitstechnischen Überlegungen die grundsätzliche Entscheidung für einen gleisgebundenen Transport getroffen.

Im Rahmen des FuE-Vorhabens „Optimierung der Direkten Endlagerung durch Kokillenlagerung in Bohrlöcher“ (Kurzform: DENKMAL) wird die Einlagerungstechnik für Brennstabkokillen entwickelt und erprobt. Dort ist ebenfalls ein gleisgebundener Transport zum Einlagerungsbohrloch vorgesehen. Mit dem Abschluss dieses Vorhabens im Januar 2009 liegt auch dafür eine genehmigungsreife Technik vor. Diese Technik, die für den Transport der Brennstabkokille einen wiederverwendbaren Transferbehälter vorsieht, kann mit gewissen Modifikationen auch für HAW-Kokillen sowie CSD-C und CSD-B genutzt wer-

den, weil alle Behälter ähnliche Geometrien aufweisen (gleiche Behälterdurchmesser, gleiche Greifvorrichtung (Pilzkopf) für die Handhabung). Durch ergänzende Untersuchungen und Demonstrationsversuche wäre dies zu überprüfen und nachzuweisen.

Falls keine Umkonditionierung in Betracht gezogen wird, muss die für die Endlagerung der CASTOR-Behälter mit Forschungsreaktorbrennelementen notwendige Transport- und Einlagerungstechnik noch entwickelt und erprobt werden.

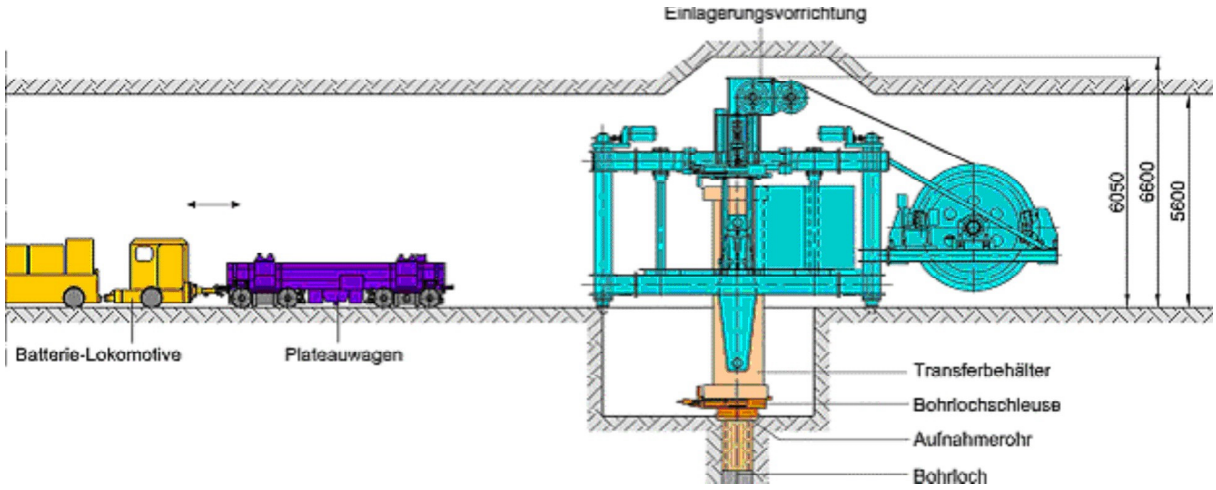

Abbildung 3-7: Komponenten des Einlagerungssystems zur Erprobung der Transport- und Einlagerungstechnik für BSK 3

Abbildung 3-7 zeigt die Komponenten des Einlagerungssystems für BSK 3, die derzeit gefertigt und im Sommer 2008 auf Zuverlässigkeit und Funktionalität in einem Versuchsstand im Maßstab 1:1 geprüft werden.

3.4 Technische und geotechnische Barrieren

Das Sicherheitskonzept für ein geologisches Endlager in Salzformationen stützt sich auf ein Mehrbarrierensystem, das nach [GRS 2003] als Gesamtheit von geologischen, geotechnischen und technischen Barrieren verstanden wird. Die Barrierewirksamkeit basiert auf den verschiedenen physikalischen und chemischen Mechanismen einzelner Barrieren sowie auf einer partiellen Redundanz und einer relativen funktionalen Unabhängigkeit. In einem HAW-Endlager wird der Endlagerbehälter als technische Barriere betrachtet; die Gesamtheit weiterer ingenieurtechnischer Maßnahmen, die eine Schadstoffausbreitung ver- oder behindern, als geotechnische Barrieren. Für die im Kapitel 3.2 beschriebenen Endlagerkonzepte zählen dazu Schachtverschlüsse, Streckenverschlüsse, Salzgrusversatz, und Bohrlochverschlüsse. Die für die einzelnen Barrieren geltenden funktionalen Anforderungen werden nachfolgend zusammengefasst. Hinsichtlich des technischen Konzeptes und der Baustoffe wird auf Kapitel 5.1.2 verwiesen.

Endlagerbehälter

Die Funktion der Endlagerbehälter besteht primär darin, die in ihnen verpackten radioaktiven Stoffe während des Transportes und der Einlagerung sicher und dicht zu umschließen. In Kapitel 3.1 sind die hier betrachteten Behälterarten beschrieben.

Für die Betriebsphase des Endlagers ergeben sich die Auslegungsanforderungen an die Endlagerbehälter im wesentlichen aus dem technischen Endlagerkonzept. Die Anforderungen für die Nachbetriebsphase stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit der Art und Weise der Nachweisführung für die Langzeitsicherheit. Gewährleisten beispielsweise andere geotechnische und geologische Barrieren (Versatz, Bohrloch-, Strecken- und Schachtverschluss sowie Wirtsgestein) bereits die Endlagersicherheit, braucht darüber hinaus von den Barriereeigenschaften der Endlagerbehälter kein Kredit mehr genommen zu werden.

Bis dahin ist der sichere Einschluss durch die technische Barriere zu gewährleisten. Zu den sicherheitstechnischen Anforderungen, die an Endlagerbehälter während der Betriebs- und Nachbetriebsphase des Endlagers gestellt werden, zählt der Nachweis der Unterkritikalität, die Begrenzung der Dosisleistung und Wärmeleistung der Endlagerbehälter und der Nachweis der Integrität (Dichtheit) der Endlagerbehälter. Im Bericht [ISIBEL 2007a] sind die Einwirkungen auf Endlagerbehälter bei planmäßiger Entwicklung (ungestörter Endlagerbetrieb) und bei außerplanmäßiger Entwicklung (gestörter Endlagerbetrieb) beschrieben, für die die Integrität bzw. Dichtheit der Endlagerbehälter nachzuweisen ist.

Versatz

Die primäre Funktion des Salzgrusversatzes besteht in der Verringerung des Hohlraumvolumens der Strecken im Endlagergrubengebäude. Darüber hinaus soll er die geologische Barriere mechanisch stabilisieren und so zum Erhalt ihrer Integrität beitragen. In den Einlagerungsstrecken und -bohrlöchern übernimmt der Versatz auch die Ableitung der Wärme der eingelagerten Endlagerbehälter auf das Gebirge. All diese Funktionen sind von der Porosität des Versatzes abhängig.

Bohrlochverschluss

Als abschließendes Element einer Einlagerungsbohrung kommt dem Bohrlochverschluss die Funktion einer radiologischen Abschirmung in der Betriebsphase zu. Langfristig soll der Bohrlochverschluss die eingelagerten Endlagerbehälter dicht einschließen, so dass in der Nachbetriebsphase keine Fluide zu den Abfällen gelangen können. Als Baustoff kommt arteigenes Material in Betracht (Salzgrus, passgenaue Salzformsteine).

Streckenverschluss

Streckenverschlüsse sind Bestandteil des Gesamtverschlusskonzeptes des Endlagers und haben die Funktion, im Störfall über den Schachtverschluss eintretende Fluide vor einem Zutritt ins Grubengebäude zu ver- oder behindern. Die Festlegung der Positionen im Grubengebäude richtet sich nach dem Zuschnitt des Streckensystems und der vorgefundenen geologischen Situation. Die Baustoffe müssen unter den im Endlager herrschenden Bedingungen langfristig beständig sein. Ein Konzept eines Streckenverschlusses ist in Kapitel 5.1.2 beschrieben.

Schachtverschluss

An den Schachtverschluss als technisches Bauwerk, das die einzige Verbindung vom Endlager zur Biosphäre sicher verschließen soll, werden hohe Anforderungen gestellt. Sowohl ein relevanter Fluiddurchtritt von über Tage als auch aus dem Endlager muss dauerhaft verhindert werden. Dazu sind Komponenten zu wählen, die die Dichtfunktion gewährleisten als auch solche, die die Lagestabilität dieser Dichtelemente im Salzkörper sicherstellen. Die zum Einsatz kommenden Baustoffe müssen über einen langen Zeitraum beständig bleiben, damit die Dichtfunktion erhalten bleibt. Im Kapitel 5.1.2 ist ein Konzept eines Endlagerschachtverschlusses dargestellt.

3.5 Zusammenfassung des ermittelten FuE-Bedarfs

Mit den im Rahmen dieses Vorhabens ermittelten Daten zu den endzulagernden WA-Abfällen und ausgedienten Brennelementen konnte eine erheblich präzisere Datenbasis geschaffen werden. Diese wäre um Daten für Forschungsreaktorbrennelemente zu erweitern und zu ergänzen und in der Datenbank, so wie sie derzeit für Brennelemente von Leistungsreaktoren aufgebaut wird, aufzunehmen. Die Analyse hat auch gezeigt, dass es erforderlich ist, – wie für nicht wärmeentwickelnde Abfälle bereits erfolgt – Endlagerannahmebedingungen für hochradioaktive und wärmeentwickelnde Abfälle festzulegen.

Im Bereich der Transport- und Einlagerungstechnik ist für wärmeentwickelnde und hochaktive Abfälle durch eine Reihe von Demonstrationsversuchen ein weit fortgeschrittener Entwicklungsstand erreicht. Diese Versuche werden jeweils mit Dummy-Behältern über Tage durchgeführt, so dass ein Nachweis der radiologischen Sicherheit noch aussteht ebenso wie der störungsfreie und zuverlässige Einsatz unter Bedingungen unter Tage. Dabei sind die Abschirmfunktionen von Schleusen am Transferbehälter und der Bohrlochschleuse bei der geforderten Bohrlochlagerung von besonderem Interesse. Darüber hinaus sind die Genauigkeit bei der Erstellung von vertikalen Bohrungen und deren thermomechanisches Verhalten vor und während des Einlagerungsbetriebes noch Gegenstand von Untersuchungen.

Grubengebäude können mit den vorhandenen Kenntnissen und Berechnungsmodellen hinreichend genau ausgelegt werden. Zu klären sind noch Fragen im Zusammenhang mit der Optimierung von Bohrlochlängen und Konfiguration von Einlagerungsfeldern. In diesem Zusammenhang ist auch zu prüfen, ob die übliche Ausnutzung von Symmetrieeffekten bei der Modellbildung auch bei besonders thermisch und mechanisch beanspruchten Bereichen (z. B. Streckenkreuzungen) hinreichend genaue Ergebnisse liefern.

Hinsichtlich des FuE-Bedarfs im Bereich technischer und geotechnischer Barrieren wird auf die Empfehlungen im Kapitel 5.1.2 verwiesen.

4 Bewertung der Betriebssicherheit

4.1 Zusammenfassung der Vorgehensweise

Grundsätzlich wird angenommen, dass die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen des Bergbaus und des Strahlenschutzes einschließlich der Kritikalitätssicherheit im ungestörten Betrieb sowie bei Betriebsstörungen und Störfällen durch geeignete technisch-organisatorische Maßnahmen gewährleistet werden kann. Im vorliegenden Vorhaben konzentrierte sich daher die Bewertung der Betriebssicherheit auf die Identifizierung und Betrachtung von möglichen Schwachstellen und relevanten Störfällen. Die Untersuchung der radiologischen Betriebssicherheit erfolgte für den Bereich der Anlieferung und Umlagerung über Tage sowie für den Schachttransport und den Kontrollbereich des Endlagerbergwerks. Die Untersuchung der konventionellen Betriebssicherheit wurde hingegen unter Berücksichtigung bergbaulicher Aspekte nur für den Schachttransport und den Kontrollbereich des Endlagerbergwerks durchgeführt.

4.2 Radiologische Betriebsicherheit

Die Überprüfung und Bewertung im Rahmen der Aufgabe „Radiologische Betriebssicherheit“ beschränkt sich auf die Anforderungen, die sich aus einschlägigen Vorschriften für Kernkraftwerke ergeben. Dabei ist zu beachten, dass das z. Z. gültige kerntechnische Regelwerk zur Sicherheit von Kernkraftwerken durch das BMU-Vorhaben „Aktualisierung des kerntechnischen Regelwerkes“ [BMU 2005] entsprechend dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik aktualisiert wird.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde eine RSK-Empfehlung zum „Gestaffelten Sicherheitskonzept“ [RSK 2005] erarbeitet. Dieses Konzept umfasst eine Kombination verschiedener technischer Systeme sowie administrativer Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Beherrschung von Störungen und Störfällen (Sicherheitsebenen: 1 - Normalbetrieb, 2 – Anomaler Betrieb und 3 - Störfälle), zur Begrenzung der Auswirkungen von Unfällen (Sicherheitsebene 4 – sehr seltene Ereignisse, Unfälle und Unfälle mit schweren Kernschäden) und Maßnahmen zur Unterstützung der für den Katastrophenschutz zuständigen Behörden (Ebene 5 – Unfälle mit erheblichen Freisetzungen in die Umgebung). In der hier vorliegenden Arbeit wurde nur die Sicherheitsebene 3 betrachtet.

Die GRS hat im Rahmen der Aktualisierung des kerntechnischen Regelwerkes Sicherheitsanforderungen für Kernkraftwerke verfasst und dabei die radiologischen Sicherheitsziele auf der Sicherheitsebene 3 [GRS 2002a] definiert. Danach sind für Tätigkeiten zur Beherrschung von Ereignissen, zur Minderung ihrer Auswirkungen oder zur Beseitigung ihrer Folgen die einschlägigen Grenzwerte als Maximalwerte für die Strahlenexposition des Personals zu Grunde zu legen. Für die Auslegung der Anlage zum Schutz der Bevölkerung vor freisetzungsbedingten Strahlenexpositionen sind maximal die Störfallplanungswerte der Strahlenschutzverordnung zu Grunde zu legen.

Weiterhin werden in [GRS 2002a] u. a. „zu berücksichtigende Ereignisse“ angeführt. Demnach ist für die zu verwirklichenden Maßnahmen und Einrichtungen u. a. „ein abdeckendes Spektrum an Ereignissen, deren Eintreten während der Betriebsdauer der Anlage nicht zu erwarten, jedoch dennoch zu unterstellen ist (Sicherheitsebene 3)“ zu Grunde zu legen. Die Vollständigkeit und der abdeckende Charakter der zu betrachtenden Ereignisse sind anlagenspezifisch zu gewährleisten. Bei der Bestimmung der Auslegungsstörfälle (Sicherheitsebene 3) werden nicht alle theoretisch denkbaren Störfälle in Betracht gezogen. Vielmehr berücksichtigt man nur solche Störungsursachen und die daraus resultierenden Ereignisabläufe, die aufgrund von Wahrscheinlichkeitsüberlegungen über deren Eintritt und Ablauf als nicht zu weit entfernte Schadensmöglichkeiten erscheinen.

Folgende Ereignisse sind aufgrund ihres geringen Risikos keine Auslegungsstörfälle (Sicherheitsebene 4). Maßnahmen gegen diese Ereignisse dienen der Risikominimierung:

- Ereignisse in Folge eines Flugzeugabsturzes,
- Ereignisse in Folge äußerer Einwirkungen gefährlicher Stoffe und
- Ereignisse in Folge äußerer Druckwellen aus chemischen Reaktionen.

Der Nachweis der Störfallbeherrschung wird mittels einer Sicherheitsanalyse geführt. Hierbei wird zwischen deterministischer und probabilistischer Sicherheitsanalyse unterschieden.

Es erscheint sinnvoll, diese für Kernkraftwerke entwickelten Grundlagen unter Berücksichtigung der Besonderheiten eines Endlagers für den erforderlichen Nachweis über die getroffene Schadensvorsorge bei Errichtung und Betrieb eines Endlagerbergwerkes zu übernehmen. Für die Betriebsphase eines Endlagers lässt sich – unabhängig vom Endlagerkonzept bzw. vom Wirtsgestein - hinsichtlich der Störfallvorsorge das radiologische Schutzziel „Sicherer Einschluss radioaktiver Stoffe“ unter Einwirkungen von außen und Einwirkungen von innen ableiten.

4.2.1 Deterministische Sicherheitsanalyse

Das methodische Vorgehen bei der deterministischen Sicherheitsanalyse besteht aus den nachfolgend beschriebenen Schritten:

(1) *Erbringung eines Vollständigkeitsnachweises*

Der Vollständigkeitsnachweis dient zur vollständigen Erfassung aller möglichen Störfälle. Er besteht im wesentlichen aus der (Kurz-)Beschreibung des Einlagerungsablaufes unter Angabe des Einlagerungsgutes, der Zusammenstellung der Aktivitätsinventare, der Angabe der Möglichkeiten zur Freisetzung radioaktiver Stoffe unter Berücksichtigung der vorhandenen Barrieren, der Festlegung der radiologischen Grundlagen und der Durchführung einer Voranalyse.

(2) Zusammenstellung relevanter Einwirkungen

Radioaktive Stoffe können durch Einwirkungen von innen und außen freigesetzt werden. Als Einwirkungen von innen kommen in Betracht:

- Kritikalität,
- Gebindeabsturz,
- mechanische Beschädigung durch Absturz schwerer Lasten bzw. durch Fahrzeugzusammenstoß,
- Förderkorbabsturz,
- Seilrutsch,
- Übertreiben des Förderkorbs,
- Beeinträchtigung der Wärmeabfuhr,
- Ausfall von Systemen mit sicherheitstechnischer Bedeutung,
- Brand,
- Explosion,
- gebirgsmechanische Störfälle,
- Eintritt von Grubenwässern,
- Bildung von Gasen,
- Gasleckage,
- Fehlbedienung (Personalhandlungen),
- Einwirkungen Dritter

Ergänzend sind folgende Einwirkungen von außen zu betrachten:

- Flugzeugabsturz,
- Einwirkungen gefährlicher Stoffe,
- Druckwelle aus chemischen Reaktionen,
- Erdbeben,
- Blitzschlag, Hochwasser, Wind, Eis und Schnee,
- äußerer Brand,
- sonstige standortbedingte Einwirkungen.

(3) Ermittlung auslegungsbestimmender Störfälle:

Es wird geprüft, ob die als möglich betrachteten Ereignisse und Ereigniskombinationen unter den spezifischen Gegebenheiten des Endlagerbergwerkes auch tatsächlich zu nennenswerter Aktivitätsfreisetzung führen können. Es werden solche Teilsysteme der Anlage zur detaillierten Analyse ausgewählt, bei denen ein solches Ereignis voraussichtlich die gravierendsten Auswirkungen (Auslegungsstörfälle) haben würde. Durch diese Vorgehensweise wird diese Ereignismöglichkeit in anderen Teilsystemen bezüglich der radiologischen Auswirkungen abgedeckt.

(4) Nachweis der erforderlichen Schadensvorsorge

Der Nachweis der getroffenen Schadensvorsorge für die ausgewählten auslegungsbestimmenden Störfälle wird durch eine detaillierte Analyse dieser Störfälle erbracht. Im Einzelnen werden unter Angabe der vorbeugenden Schutzvorkehrungen das auslösende Ereignis, der Störfallablauf, die wirksam werdenden Barrieren und die abwehrenden Maßnahmen beschrieben. Anschließend werden die freigesetzte Aktivität unter Berücksichtigung des Inventaraustrags und dessen Rückhaltung in den Barrieren berechnet und die radiologischen Auswirkungen ermittelt.

Bei Ereignissen mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit wird der Nachweis der getroffenen Schadensvorsorge durch die Angabe der Maßnahmen zur Risikominimierung erbracht.

4.2.2 Probabilistische Sicherheitsanalysen

Die im Rahmen der „periodischen Sicherheitsüberprüfungen für Kernkraftwerke“ durchzuführende „Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA)“ bezieht sich auf bestehende Kernkraftwerke. Über das Erfordernis zur Erstellung probabilistischer Sicherheitsanalysen als Genehmigungsvoraussetzung für die Errichtung und den Betrieb eines Endlagers existiert zur Zeit keine regulatorische Festlegung.

Ungeachtet von jetzigen Genehmigungsvoraussetzungen werden im Folgenden einige Empfehlungen zur sinnvollen Anwendung probabilistischer Sicherheitsanalysen zur Errichtung und zum Betrieb eines Endlagerbergwerkes zur Einlagerung von HAW und ausgedienter Brennelemente vorgeschlagen.

Gemäß [Leitfaden 2005] sollen die Ergebnisse der PSA

- die deterministische Beurteilung der Sicherheit ergänzen,
- zur Festlegung der Notwendigkeit und Dringlichkeit von Sicherheitsverbesserungen herangezogen werden,
- über einen Vergleich der Einzelhäufigkeiten nicht beherrschter Anlagenzustände Schwachstellen feststellen können sowie
- die sicherheitstechnische Ausgewogenheit des Anlagenkonzeptes ermöglichen.

Zur Durchführung der PSA sind die in [Leitfaden 2005] vorgeschlagenen Methoden eine geeignete Richtschnur.

4.3 Konventionelle Betriebssicherheit im Endlagerbergwerk

Sicherheitliche Belange in einem konventionellen Bergwerk werden durch zahlreiche untersetzende Durchführungsvorschriften zum Bundes-Berggesetz (BbergG) [BbergG 2005] geregelt. Diese Durchführungsvorschriften finden ebenfalls Anwendung auf ein untertägiges

Endlager. Im Hinblick auf den kerntechnischen Teil eines Endlagers ist zusätzlich u. a. die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) [StrlSchV 2005] zu beachten.

Eine Identifizierung von Ereignisabläufen, die gemäß §3 StrlSchV als Störfälle zu bezeichnen sind, und die Festlegung von abdeckenden Auslegungsstörfällen sind im Unterschied zu der zuvor beschriebenen deterministischen bzw. probabilistischen Sicherheitsanalyse nicht Gegenstand der hier anzustellenden Betrachtungen. Hier soll im Hinblick auf den vorgesehenen Grubengebäudezuschnitt und unter Zugrundelegung der geplanten untertägigen Betriebsabläufe geprüft werden, ob durch Einflüsse oder Einwirkungen aus den Bereichen Bewetterung, Stromversorgung, Gebirge, Brand oder Schäden am Transportmittel für die Gebinde (Plateauwagen) Situationen hervorgerufen werden, die über Behinderungen oder Störungen der Betriebsabläufe hinaus zu einer Gefährdung der Betriebssicherheit führen und ggf. weiteren Untersuchungsbedarf erfordern. Diese sind nicht zwangsläufig mit radiologischen Auswirkungen verbunden.

Zu den zu betrachtenden Ereignissen mit möglichen Einwirkungen auf die verschiedenen Arbeits- bzw. Betriebsabläufe, die die Betriebssicherheit gefährden könnten, gehören

- Ausfall der Bewetterung
- Ausfall der Stromversorgung
- Gebirgsmechanische Einwirkungen
  - Querschnittsverminderungen
  - Sohlenschiefstellung
  - Firstsicherung / Löserbildung
  - Einwirkungen auf eingelagerte Gebinde im Bohrloch
- Zutritt von Lösungen und natürlichen Gasen
- anlageninterner Brand
- Entgleisung eines beladenen Plateauwagens.

Die hier durchgeführte Analyse ergab, dass sowohl der Ausfall der Bewetterung oder der Stromversorgung sowie der anlageninterne Brand als auch die Entgleisung eines beladenen Plateauwagens beherrschbar sind und damit zu keinen sicherheitlichen Risiken führen.

4.4 Offene Fragen und FuE-Bedarf

Für die Gewährleistung der Betriebssicherheit liegt ein umfassendes kerntechnisches, strahlenschutzrechtliches und bergrechtliches Regelwerk vor, das es ermöglicht, durch geeignete technische und organisatorische Maßnahmen die Sicherheitsanforderungen umzusetzen. Seine erfolgreiche Anwendung wurde in einer Vielzahl übertägiger kerntechnischer Anlagen, bzw. im Salzbergbau demonstriert. Die Besonderheit eines HAW-Endlagers besteht darin, dass sowohl kerntechnische und strahlenschutzrechtliche Anforderungen als auch bergrechtliche Vorgaben zu erfüllen sind. Die meisten dabei auftretenden Fragestellungen wurden bereits im Zuge der Demonstrationsversuche zur direkten Endlagerung erfolgreich gelöst und ihre technische Realisierbarkeit nachgewiesen.

Unter Berücksichtigung des jetzigen Planungsstandes lassen sich für FuE-Arbeiten zur radiologischen und zur betrieblichen Sicherheit in der Betriebsphase vier Schwerpunke ableiten:

Sedimentation

Die Rückhaltung von luftgetragenen störfallerzeugten Aerosolpartikeln durch Sedimentation im Grubengebäude und in der Abwetterstrecke wurde bisher nicht quantitativ bewertet. Dazu wäre es zunächst notwendig, die bei einem Absturz eines Abfallgebindes sich bildende Aerosolfraktion zu bestimmen. Weiterhin müssten sowohl rechnerisch als auch experimentell in Abhängigkeit von der Wettergeschwindigkeit und von Querschnitt und Länge der Strecken (Transportzeit) die Rückhaltefaktoren zu den einzelnen Partikelgrößen erforscht werden.

Generierung von Ausfalldaten

Da ein Endlagerbergwerk für HAW und ausgediente Brennelemente nicht existiert und – im Gegensatz zu Kernkraftwerken – folglich keine Betriebserfahrungen vorliegen können, müssen, wenn probabilistische Sicherheitsanalysen durchgeführt werden sollen, Ausfalldaten generiert werden.

Zunächst können aus 1:1-Versuchen an Original-Maschinen Ausfalldaten generiert werden. Weiterhin kann auf bestehende Datenbanken mit Ausfalldaten für entsprechende kerntechnische Komponenten unter Berücksichtigung der Randbedingungen zurückgegriffen werden. Eine Übertragbarkeit der Daten muss geprüft werden. Ebenfalls wäre eine Auswertung und Aufbereitung von vorhandenen und zugänglichen Betriebserfahrungen mit bergbautechnischen Komponenten möglich, die von Bergwerksbetreibern zur Verfügung gestellt werden können .

Gebirgsmechanische Einwirkungen

Ungeachtet der grundsätzlichen sicherheitstechnischen Beherrschbarkeit geomechanischer Einwirkungen ist für einen reibungslosen Einlagerungsbetrieb bei der Bohrlochlagerung zu untersuchen, welche Konvergenzen in Beschickungsstrecken und Bohrlöchern unter den zu erwartenden Bedingungen und unter Berücksichtigung des Wärmeeintrags von Abfällen in benachbarten Bohrlöchern zu erwarten sind. Daraus lassen sich die erforderlichen Auffahrquerschnitte für den Einlagerungsbetrieb und maximal mögliche Bohrlochlängen ermitteln.

Zutritt von Lösungen und natürlichen Gasen

Im Gegensatz zu einer Strecke ist ein Abpumpen der zutretenden Lösungen aus einem Bohrloch praktisch nicht möglich bzw. nur oberhalb der zuletzt eingebrachten Kokille denkbar.

Der Zutritt von Lösung in ein Bohrloch ist zwar unwahrscheinlich, jedoch nicht gänzlich auszuschließen. Insofern ist unter Berücksichtigung der vorgesehenen geophysikalischen Messmethodik für das Auffinden von Lösungsreservoirs zu untersuchen und zu bewerten, wie hoch trotz vorlaufender Erkundung die Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein eines unentdeckten Lösungsreservoirs ist und welche potenziellen Lösungsvolumina tatsächlich auftreten können.

Weiterhin ist zu untersuchen, wie hoch trotz vorlaufender Erkundung die Wahrscheinlichkeit für einen Zutritt natürlicher Gase (insbesondere Wasserstoff und Methan) in ein Bohrloch ist und welche Mengen tatsächlich anfallen können. Es ist zu prüfen, ob dieser Fall ausgeschlossen werden kann. Sollte dies nicht der Fall sein, sind die potenziellen Auswirkungen einer Deflagration zu ermitteln.

5 Langzeitsicherheit

5.1 Nachweis des sicheren Einschlusses

5.1.1 Integritätsnachweis geologischer Barrieren

Zur Bewertung der Wirksamkeit der geologischen Barriere eines Endlagers für radioaktive Abfälle in Salzformationen wird der Begriff „Integrität“ verwendet. Damit wird die Fähigkeit der Barriere verstanden, das Eindringen von Fluiden aus dem Deck- und Nebengebirge in das Endlagerbergwerk sowie ggf. das Austreten kontaminierter Fluide und Gase aus dem Endlager in die Biosphäre durch die Barriere dauerhaft zu verhindern. Im unverritzten Zustand ist das Salzgebirge mit Ausnahme möglicher isolierter Lösungseinschlüsse trocken und dicht. Dichtheit bedeutet hierbei eine mit derzeitigen Messmethoden nicht nachweisbare, äußerst geringe Durchlässigkeit. Zur Bewertung der Barriereeigenschaften und des langfristigen Barriereverhaltens unter der Einwirkung bergbaulicher Maßnahmen und der Wärmefreisetzung im Einlagerungsbereich sind daher die Prozesse zu untersuchen, die durch mechanische Einwirkungen zur Entstehung von Porenvolumen, z. B. durch Mikrorissbildung, zu Wegsamkeiten und schließlich zum Eindringen von Lösungen in den Einlagerungsbereich führen können. Die derzeit gewählte und allgemein akzeptierte Vorgehensweise bei dem Nachweis der Barrierenintegrität sieht daher vor, dass die Bewertung der hydraulischen Barriereeigenschaften ausschließlich auf der Grundlage mechanischer Zustandsgrößen, nämlich in Modellberechnungen ermittelter Spannungen, erfolgt.

Dabei wird ein chemischer Angriff auf die geologische Barriere, der ebenfalls einen Verlust der Barrierewirkung herbeiführen kann, an dieser Stelle nicht betrachtet, sondern als Subrosion im Kapitel 5.3 angesprochen.

Ein Zutritt von Fluiden in den Einlagerungsbereich eines Endlagers in Salz ist nur möglich, wenn an der äußeren Begrenzung der Salzbarriere Lösungen anstehen. Die äußere Begrenzung ist dabei der Übergang vom Salzgebirge zum primär als durchlässig angenommenen Deck- oder Nebengebirge. Eine weitere äußere Begrenzung kann aber auch ggf. der Kontakt zwischen Salzgebirge und einzelnen Anhydritschollen sein, wenn diese Schollen durch ihre räumliche Anordnung und ihre primär vorhandene Klüftigkeit eine hydraulische Verbindung zum Deck- oder Nebengebirge aufweisen.

Die an der äußeren Begrenzung der Barriere ggf. anstehenden Lösungen können über Schwächezonen der Barriere (aufgelockerte, dilatante und damit mikrorissbehaftete Bereiche) in die Barriere eindringen und dort in Abhängigkeit vom Spannungszustand eine hydromechanische Wirkung entfalten, die zu einer Aufweitung der aufgelockerten Bereiche oder zu einer Fortpflanzung einzelner Makrorisse ggf. bis in den Einlagerungsbereich führt. Üblicherweise gilt für den äußeren Saumbereich der Barriere die Annahme einer primären Unversehrtheit; d. h., die ggf. auftretenden Schwächezonen sind sekundär durch bergmännische Eingriffe oder durch thermische Einwirkung aus der Einlagerung entstanden.

Für den Nachweis der Integrität der Salzbarriere werden primär die Ergebnisse mechanischer bzw. thermomechanischer Modellberechnungen, z. B. unter Verwendung der Finite-Elemente-Methode, herangezogen. Aufgrund der Notwendigkeit, Aussagen über sehr große Zeiträume zu treffen, sind dabei geomechanische Prognosemodelle zu verwenden, die die langfristig zu erwartenden physikalischen Prozesse im Gebirge zutreffend beschreiben. Über die rein numerischen Betrachtungen hinaus sind im Zuge einer gesamtheitlichen Betrachtung auch geologische und ingenieurgeologische Erkundungen, gesteinsphysikalische Laboruntersuchungen, geotechnische in situ-Messungen, Beobachtungen vor Ort oder bergmännische Erfahrungen aus vergleichbaren geologischen Medien und Bergwerken einzubeziehen. In Abhängigkeit von der Problemstellung sind i. A. großräumige dreidimensionale Prognosemodelle zu verwenden.

Die Funktionstauglichkeit der Salzbarriere gilt als rechnerisch nachgewiesen, wenn eine Bildung von Wegsamkeiten aus geomechanischer Sicht ausgeschlossen werden kann. Dazu können nach dem derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstand für die Bereiche mit kriechfähigem Salzgestein zwei Kriterien herangezogen werden [Heusermann 2001]:

Dilatanzkriterium

Die Integrität ist gewährleistet, wenn keine Schädigung des Gebirges auftritt. In umfangreichen gesteinsphysikalischen Laboruntersuchungen an Steinsalz ist nachgewiesen, dass Spannungszustände unterhalb der Dilatanzgrenze auch langfristig nicht mit Auflockerungen verbunden sind, so dass für Spannungen in diesem Bereich die Dichtheit des Salzgesteins gewährleistet ist. Erst Spannungszustände oberhalb der Dilatanzgrenze führen zu einer Auflockerung des Mikrogefüges, wodurch bei Andauern des Zustandes allmählich ein Netzwerk von Mikrorissen entsteht.

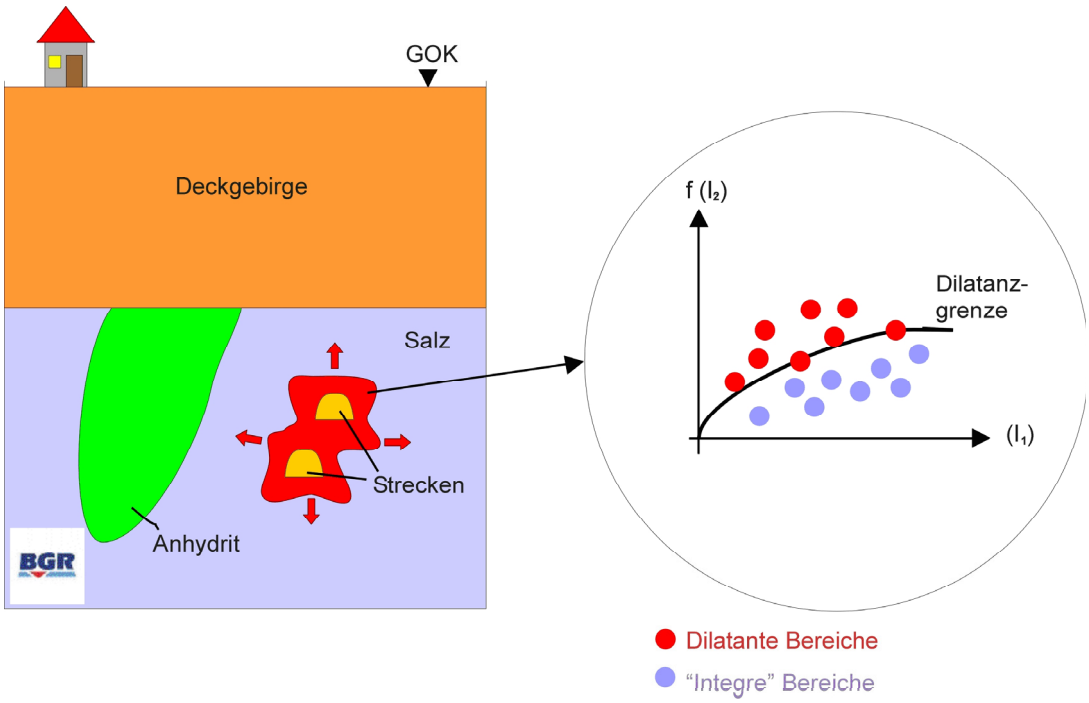

Abbildung 5-1: Visualisierung des Dilatanzkriteriums, dilatante Bereiche in der Barriere infolge bergmännischer Eingriffe

Laugendruckkriterium

Die Integrität ist gewährleistet, wenn die kleinste Hauptdruckspannung nicht unter den Wert des in der entsprechenden Teufe anzunehmenden hydrostatischen Drucks fällt. Dieser Druck ergibt sich aus einer hypothetischen, bis zur Geländeoberfläche reichenden Flüssigkeitssäule. Üblicherweise wird von einer Lösung mit einer Dichte von 1,2 kg/dm³ ausgegangen.

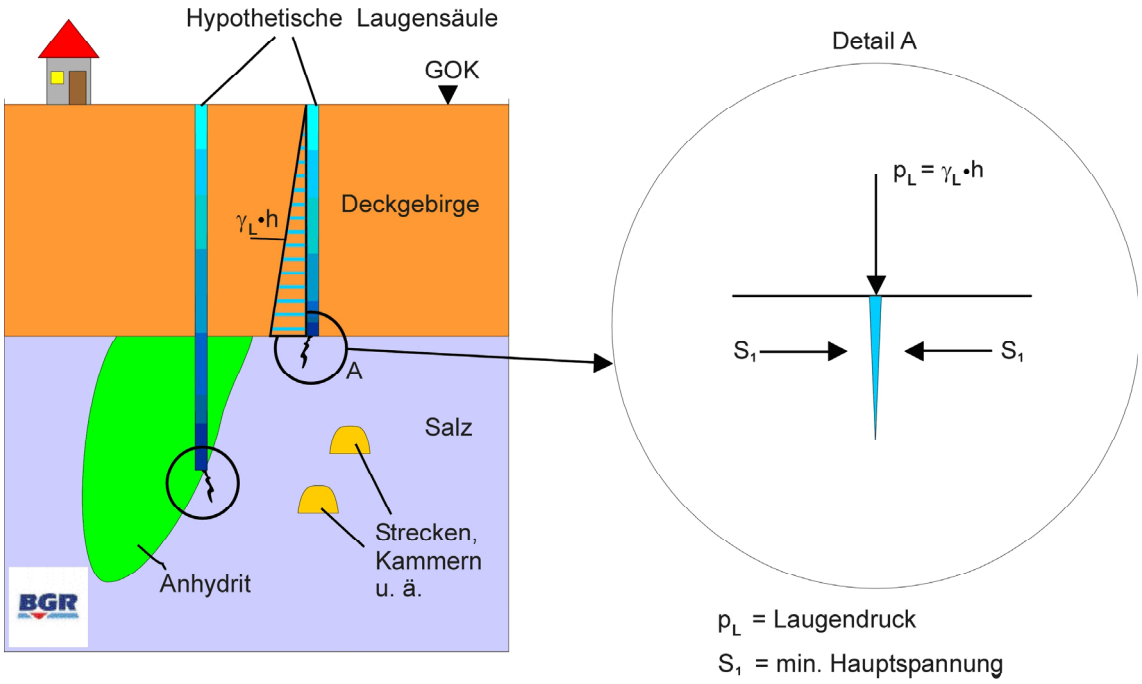

Abbildung 5-2: Visualisierung des Laugendruckkriteriums, Einwirkung von Laugendruck auf die geologische Barriere

Über die tatsächlich ablaufenden Prozesse gibt es derzeit keine abschließenden wissenschaftlichen Erkenntnisse. Die praktische Anwendung dieser beiden zunächst als gleichgewichtig angenommenen Kriterien zeigt, dass im Regelfall (primär unversehrter äußerer Saumbereich der Salzbarriere) erst bei Nichterfüllung des Dilatanzkriteriums im Saumbereich Bedingungen entstehen, die das Eindringen von Lösungen aus dem Deck- oder Nebengebirge ermöglichen.

Das derzeit verwendete und allgemein akzeptierte Verfahren zum Nachweis der geomechanischen Integrität geologischer Barrieren beruht auf der Berechnung und Bewertung von Spannungszuständen als Indikator für die Beurteilung der hydraulischen Eigenschaften der Salzbarriere (z. B. hinsichtlich der Barrierendurchlässigkeit). Neuere Entwicklungen im Bereich gesteinsphysikalischer Laboruntersuchungen und von entsprechenden Materialmodellen (z. B. zur Dilatanz von Steinsalz und daraus abgeleiteter Kennwerte wie Porosität und Permeabilität) sowie im Bereich numerischer Methoden (z. B. Entwicklung eines hydromechanischen Rissmodells und Implementierung in einem Finite-Elemente-Programm zur Simulation der Entstehung und Aufweitung einzelner fluidgefüllter Risse) sollen zukünftig zu einer Verbesserung der Prognosemodelle, zu einer Konkretisierung der derzeit bestehenden Integritätskriterien und zu einer Präzisierung der Berechnung der hydromechanischen Ei-

genschaften und des langfristigen thermo-hydromechanischen Verhaltens der Salzbarriere führen.

5.1.2 Nachweiskonzept zur Integrität der technischen und geotechnischen Barrieren

Wie bereits in der Einleitung dargestellt, steht im Mittelpunkt des Langzeitsicherheitsnachweises der Nachweis des langfristig sicheren Einschlusses der endgelagerten Abfälle durch den Nachweis der Integrität der technischen und geotechnischen Barrieren und der geologischen Hauptbarriere. Der Integritätsnachweis der geologischen Hauptbarriere wurde in Abschnitt 5.1.1 behandelt, im Folgenden erfolgt eine zusammenfassende Darstellung des Nachweiskonzeptes und des erreichten Kenntnisstandes zum Nachweis der Integrität der technischen und geotechnischen Barrieren. Betrachtet werden neben Schacht- und Streckenverschlüssen auch Bohrlochverschlüsse, der eingebrachte Versatz und die Behälter. Gemäß dem in der Einleitung dargestellten Sicherheitskonzept ergeben sich für die einzelnen Komponenten unterschiedliche Anforderungen, die aus den Aufgaben der jeweiligen Komponente im Sicherheitskonzept abzuleiten sind. Hierbei steht zunächst der Nachweis des sicheren Einschlusses für die ungestörte Entwicklung des Endlagers im Vordergrund. Aus den in der Szenarienanalyse ermittelten zu betrachtenden Freisetzungsszenarien ergeben sich ggf. weitere Anforderungen.

Das Endlagerkonzept sieht vor, dass die Schächte und die Zugänge zu den Einlagerungsbereichen mit Schacht- bzw. Streckenverschlüssen verschlossen werden. Diese geotechnischen Barrieren sind dabei so anzuordnen und auszulegen, dass der Zutritt der Lösungen über den Schacht und die mit Salzgrus verfüllten Strecken zu den endgelagerten Abfällen und die anschließende Auspressung kontaminierter Lösungen über den gleichen Pfad nicht zu besorgen sind. Im Zuge der Stilllegung und des Verschlusses des Endlagerbergwerkes wird das gesamte Hohlraumvolumen sämtlicher Grubenbaue des Endlagerbergwerkes mit Salzgrus versetzt, der durch die Konvergenz des umgebenden Steinsalzes kompaktiert wird. Dabei nimmt seine Porosität und Permeabilität ab, bis er langfristig vergleichbare Eigenschaften wie Steinsalz aufweist. Abhängig von der Kompaktion des Salzgrus und der daraus abzuleitenden Anforderungen an den hydraulischen Widerstand und die Lebensdauer der Schacht- und Streckenverschlüsse ergeben sich ggf. auch Anforderungen an die Bohrlochverschlüsse. Bezüglich der Integrität der Behälter werden keine besonderen Anforderungen in der Nachbetriebsphase gestellt. Ihre einschlusswirksame Funktion ist grundsätzlich auf die Betriebsphase beschränkt. Im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse spielt also die Anforderung an die Integrität des Behälters im Vergleich zu den Anforderungen an die Verschlüsse und den Versatz eine untergeordnete Rolle.

Das früher für die gestörte Entwicklung konservativ betrachtete Szenario des Lösungszutritts über den Hauptanhydrit kann mittlerweile für den Referenzstandort als unwahrscheinlich betrachtet werden und muss daher für die Ableitung der Anforderungen an die geotechnischen Barrieren nicht mehr berücksichtigt werden. Zutritte aus dem Deckgebirge können nur über die Strecken- und Schachtverschlüsse in den Einlagerungsbereich und damit zu den Abfällen gelangen. Nicht auszuschließen sind begrenzte Lösungseinschlüsse im Steinsalz, aus denen Lösung an die Abfälle gelangen kann. Das Antreffen von größeren Lösungseinschlüssen im Einlagerungsbereich wird als gering wahrscheinlich eingeschätzt.

In Kapitel 5.3 werden die Arbeiten zur Ermittlung und Bewertung nicht auszuschließender Freisetzungsszenarien zusammenfassend dargestellt. Hier wurden bereits einige Freisetzungsszenarien untersucht. Es wurden für Lösungszutritte über Schacht- und Streckenverschlüsse unter Annahme verschiedener Versagensfälle sowie einem Zutritt aus begrenzten Lösungseinschlüssen Modellrechnungen durchgeführt. Die Berechnungen haben derzeit nur orientierenden Charakter und dienten insbesondere der Überprüfung des vorhanden Instrumentariums zur Langzeitsicherheitsanalyse für ein HAW-Endlager im Steinsalz. Zur Ableitung konkreter quantitativer Anforderungen an die geotechnischen Barrieren sind noch weitere Berechnungen erforderlich.

In Abbildung 5-3 ist beispielhaft die Nachweisführung für den Integritätsnachweis geotechnischer Bauwerke, wie sie für die Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben durchgeführt wird, dargestellt. Aus den Radionuklidtransportberechnungen der Langzeitsicherheitsanalyse werden Vorgaben an den hydraulischen Widerstand der Barrieren ermittelt. Für jede zu betrachtende Barriere muss dann der Nachweis der Standsicherheit, der Rissbeschränkung und der Dauerhaftigkeit geführt werden. Zudem ist auch der Nachweis der Herstellbarkeit zu führen. Die Einhaltung des vorgegebenen hydraulischen Widerstands für Dichtkörper, Kontaktzone und Auflockerungszone ergibt dann zusammen mit den vorgenannten Nachweisen den Integritätsnachweis für das jeweilige geotechnische Bauwerk. Das dargestellte Nachweiskonzept lässt sich sowohl für den Nachweis des sicheren Einschlusses als auch zum Nachweis der ausreichenden Freisetzungsbegrenzung im Rahmen von nicht auszuschließenden Freisetzungsszenarien anwenden. Der Unterschied besteht lediglich darin, dass beim Nachweis des sicheren Einschlusses an die Stelle der Vorgaben aus den Radionuklidtransportberechnungen des Langzeitsicherheitsnachweises Vorgaben aus hydraulischen Modellrechnungen zum Lösungszutritt bzw. zur Lösungsfreisetzung treten.

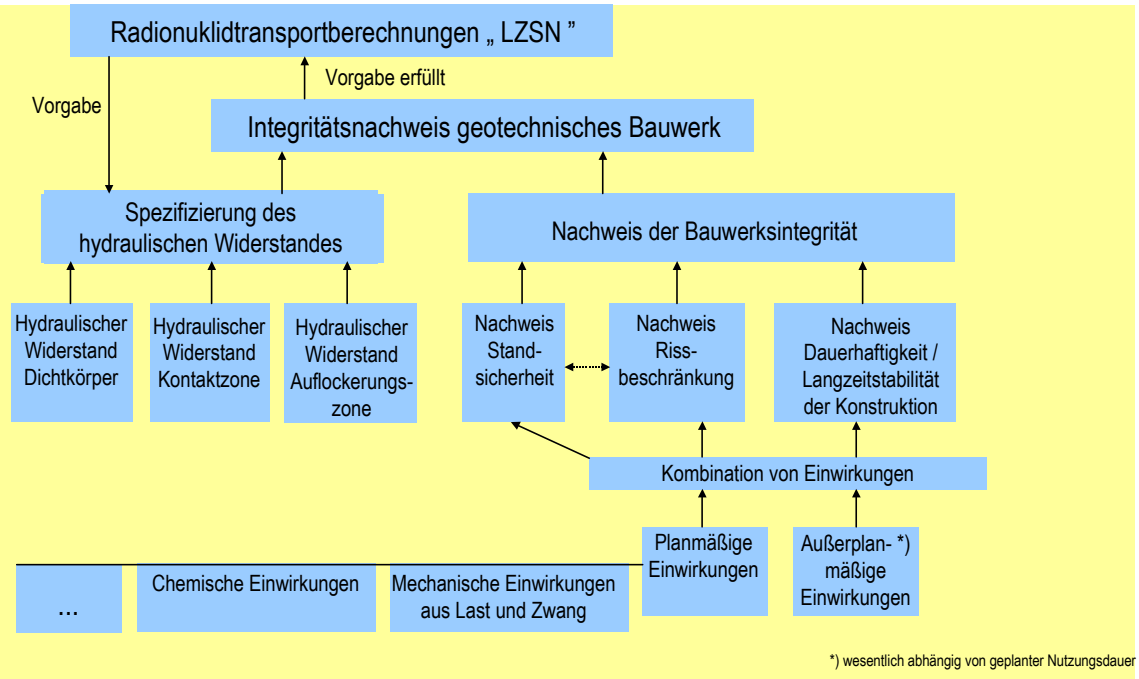

Abbildung 5-3: Zusammenhang zwischen Langzeitsicherheitsanalyse und dem ingenieurtechnischen Nachweis geotechnischer Barrieren

Die Anforderungen an den erforderlichen hydraulischen Widerstand sowie die Lebensdauer der Barrieren Schacht- und Streckenverschluss stehen im direkten Zusammenhang mit dem Kompaktionsverhalten des eingebrachten Salzgrusversatzes. In situ-Versuche und Analoga zeigen, dass das Ziel des vollständigen Einschlusses erreichbar ist. Die ablaufenden Prozesse sind zum momentanen Zeitpunkt jedoch noch nicht vollständig beschreibbar. Die wesentlichen Einflussgrößen, die das Verhalten des Salzgrusversatzes bestimmen, sind als geometrische Größen die Porosität und die i. a. über die Sieblinie beschriebene Korngröße, die Kompaktionsrate, das Spannungsniveau und der Spannungszustand, die Temperatur, der Feuchtegehalt bzw. die Sättigung sowie die mineralogische Zusammensetzung. In der Regel wirken mehrere Größen auf einen zu beschreibenden physikalischen Effekt des Materialverhaltens ein, im Fall der Wärmeleitfähigkeit sind es z. B. die Porosität und der Sättigungsgrad in den Poren sowie ggf. das Spannungsniveau. Damit erfordert die Beschreibung des Materialverhaltens die Berücksichtigung dieser Einflussgrößen. Auf Basis der bisherigen Forschungsarbeiten in den Projekten BAMBUS und DEBORA ist das Materialverhalten und damit das Kompaktionsverhalten bereits bis zu einer Restporosität von 10 % sehr gut beschreibbar, für Porositäten unterhalb von 10 % besteht jedoch noch weiterer Forschungsbedarf, um belastbare Prognoseberechnungen durchführen zu können.

Im Folgenden werden für die einzelnen Komponenten kurz die Ergebnisse der Untersuchungen zum Nachweiskonzept zusammengefasst.

Schacht- und Streckenverschluss

Der Schachtverschluss ist der sicherheitstechnisch wichtigste Verschluss, da er die Unversehrtheit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wieder herstellt. Seine Hauptfunktion besteht darin, einen Wasser-/Lösungszutritt vom Deckgebirge ins Endlager nach dessen Schließung zu verhindern, und für den Fall, dass Radionuklide in der Endlagernachbetriebsphase mobilisiert werden, diese durch entsprechende Dichtfunktion im Endlager zurückzuhalten. Abbildung 5-4 zeigt eine Prinzipskizze für einen Schachtverschluss im Salinar.

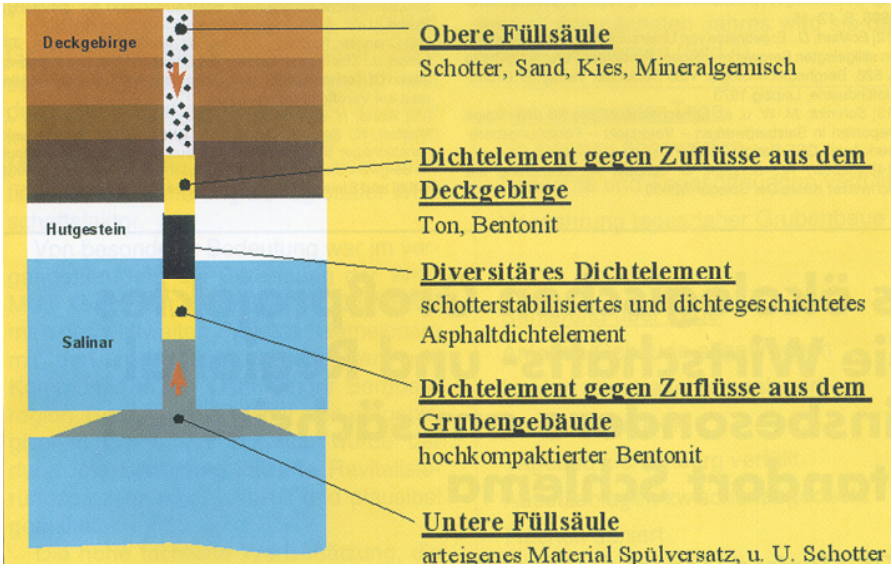

Abbildung 5-4: Vorschlag für ein Schachtverschlusskonzept für Endlager im Salinar

Die für Schachtverschlüsse bereits bestehenden Konzepte sind unter Berücksichtigung neuester Erkenntnisse zur Langzeitstabilität der Baustoffe anzupassen. Für die Komponenten „Dichtelement“ und „setzungsstabile Stützsäule“ liegen nach erfolgreicher Durchführung der in situ-Großversuche in den Schächten Salzdetfurth bereits Referenzen hinsichtlich der Materialwahl, einbauvorbereitenden Arbeiten sowie Einbautechnik und -parameter vor. Geprüft werden muss jedoch noch die Übertragbarkeit der Ergebnisse des Bohrschachtversuchs Salzdetfurth auf die Randbedingungen eines Endlagerschachtverschlusses. Hier sind sowohl ein geometrisches als auch zeitliches up-scaling sowie eine Überprüfung der Übertragbarkeit standortspezifischer Randbedingungen und Parameter (insbesondere in Hinblick auf die Ausbildung der Auflockerungszone) erforderlich. Im Rahmen der Nachweisführung steht die Übertragung des Konzeptes der Teilsicherheitsbeiwerte auf probabilistische Verfahren zur Angabe von Versagenswahrscheinlichkeiten noch aus.

An noch genauer festzulegenden Positionen sollen Verbindungsstrecken von den Schächten zu den Einlagerungsbereichen des Endlagers durch Streckenverschlüsse abgedichtet werden. Seit Mitte der 80er Jahre wurden verschiedene technische Konzepte für Streckenverschlüsse entwickelt. Allen technischen Konzepten gemein ist, dass ein statisches Widerlager zur Aufnahme von horizontalen Drücken und des Gebirgsdruckes vorgesehen ist. Ein weiteres Element, das in allen Konzepten vorkommt, sind ein oder mehrere Dichtelemente. Das zu bauende Streckenverschlussbauwerk wird sowohl in der Konzeption (Art und Position der einzelnen Elemente) als auch hinsichtlich der Materialauswahl den tatsächlichen am Einbauort angetroffenen Randbedingungen angepasst werden. Abbildung 5-5 zeigt beispielhaft den Entwurf eines Streckenverschlusses für die Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM).

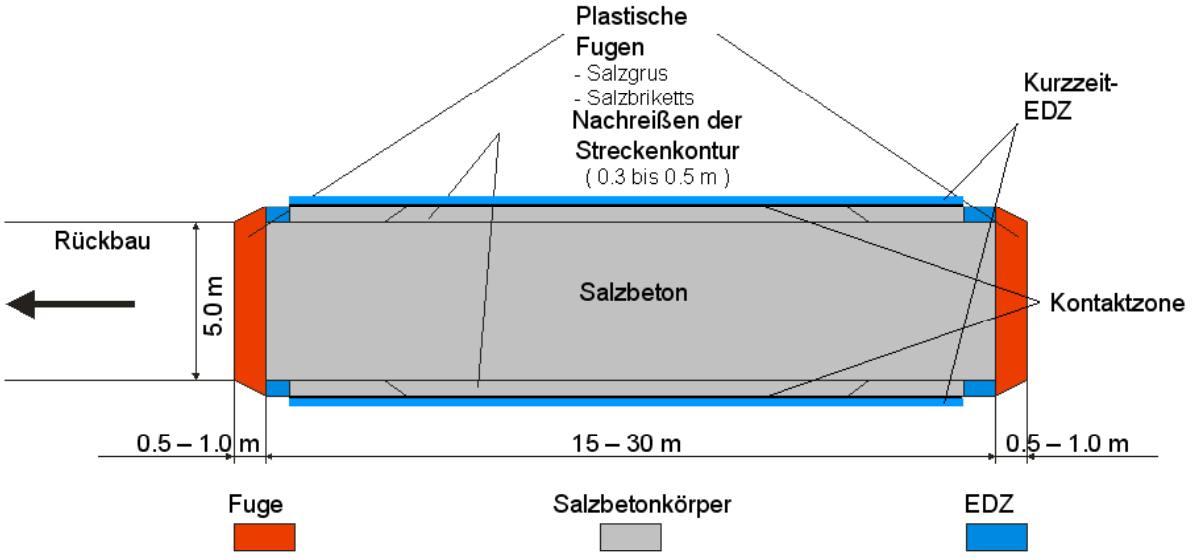

Abbildung 5-5: Entwurf Streckenverschluss ERAM

Das in Abbildung 5-3 dargestellte Nachweiskonzept wurde bereits exemplarisch für eine Referenz-Streckenabdichtung des ERAM angewendet und der Nachweis konnte geführt werden. Die an die ERAM-Streckenabdichtung gestellten Anforderungen (Nachweiszeitraum 30.000 a, querschnittsgemittelte Permeabilität $k < 10^{-18}$ m^2, maximale Fluiddruckbelastung p_{max} = 6 MPa, etc.) unterscheiden sich jedoch von denen eines HAW-Endlagers. Die bestehenden Konzepte sind unter Kenntnis der Nachweiszeiträume - welche im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse noch genauer spezifiziert werden müssen - sowie unter dem Aspekt neuerer Erkenntnisse zur Langzeitstabilität der Baustoffe zu überarbeiten. Dies betrifft beispielsweise Fragen zur Kompaktion und der damit gekoppelten Entwicklung der hydraulischen Parameter des Langzeitdichtelementes (z. B. Steinsalzbriketts) oder der Langzeitstabilität der Widerlagerbaustoffe bzw. ggf. eingesetzter Dichtmaterialien, wie Asphalt und Bitumen.

Für die Bewertung des hydraulischen Widerstandes der geotechnischen Barrieren Strecken- und Schachtverschluss ist die Beschreibung der Auflockerungszone (geschädigter Gebirgsbereich) von besonderem Interesse. Besonderes Augenmerk ist hierbei auf den Einfluss standortspezifischer Randbedingungen (z. B. Teufenlage und herrschender Gebirgsdruck, Fluiddruck, rheologische Gebirgseigenschaften, Festigkeitseigenschaften, etc.) zu richten, die unmittelbaren oder mittelbaren Einfluss auf die Ausbildung und Größe der dilatanten Auflockerungszone haben. Für diesen geschädigten Gebirgsbereich können bisher die für die hydraulische Nachweisführung erforderlichen Parameter Permeabilität und Porosität in Abhängigkeit des Schädigungsgrades noch nicht hinreichend genau quantifiziert werden. Ebenso ist deren (zeitliche) Entwicklung in Abhängigkeit der sich ändernden Spannungsrandbedingungen (Aufkriechen des Gebirges, Aufbau eines Porendrucks) noch weiter zu untersuchen. Die hierzu erwarteten Ergebnisse des derzeit laufenden EU-Forschungsprojektes THERESA sind dahingehend auszuwerten.

Bohrlochverschluss

Verglichen mit den zuvor behandelten Strecken- und Schachtverschlüssen hat der Bohrlochverschluss im Sicherheitskonzept eine andere Funktion zu erfüllen. Zunächst □ng der Bohrlochverschluss eine Abschirmwirkung gegen ionisierende Strahlung der letzten eingelagerten Abfallbehälter während der Betriebszeit des Endlagers erfüllen. Langfristig soll der im Referenzkonzept als lose Salzgrusschüttung vorgesehene Bohrlochverschluss dann eine Dichtfunktion übernehmen und zusammen mit dem Steinsalz den sicheren Einschluss der Endlagerbehälter gewährleisten. Die Abbildung 5-6 zeigt das Schema des oberen Bereichs einer Einlagerungsbohrung mit einem Bohrlochverschluss aus Salzgrus. Die in Abbildung 5-6 dargestellte Variante wurde bereits z. B. im Projekt DEBORA untersucht.

Diese Variante wurde gewählt, da der Verschluss in der frühen Nachbetriebsphase gasdurchlässig, in den späteren Phasen jedoch lösungsdicht sein sollte. Hier ist zu prüfen, inwieweit eine Gasdurchlässigkeit erforderlich ist. Um die Erfüllung der Funktion des Bohrlochverschlusses im Sicherheitskonzept nachzuweisen, ist der Nachweis zu führen, dass eine hinreichende Kompaktion des Salzgrus eintritt. Wie schon zuvor beschrieben, ist hier eine weitergehende Absicherung der vorhandenen Stoffmodelle zur Salzgruskompaktion für

geringe Porositäten und Permeabilitäten erforderlich. Untersucht werden sollte auch eine Modifikation des Designs. Der Bohrlochverschluss könnte auch aus Salzformstücken mit einem Ringraum aus Salzgrus ausgeführt werden. Eine hinreichende Kompaktion des Salzgrus wäre mit diesem Design früher zu erreichen als bei einem Verschluss, der komplett aus Salzgrus besteht.

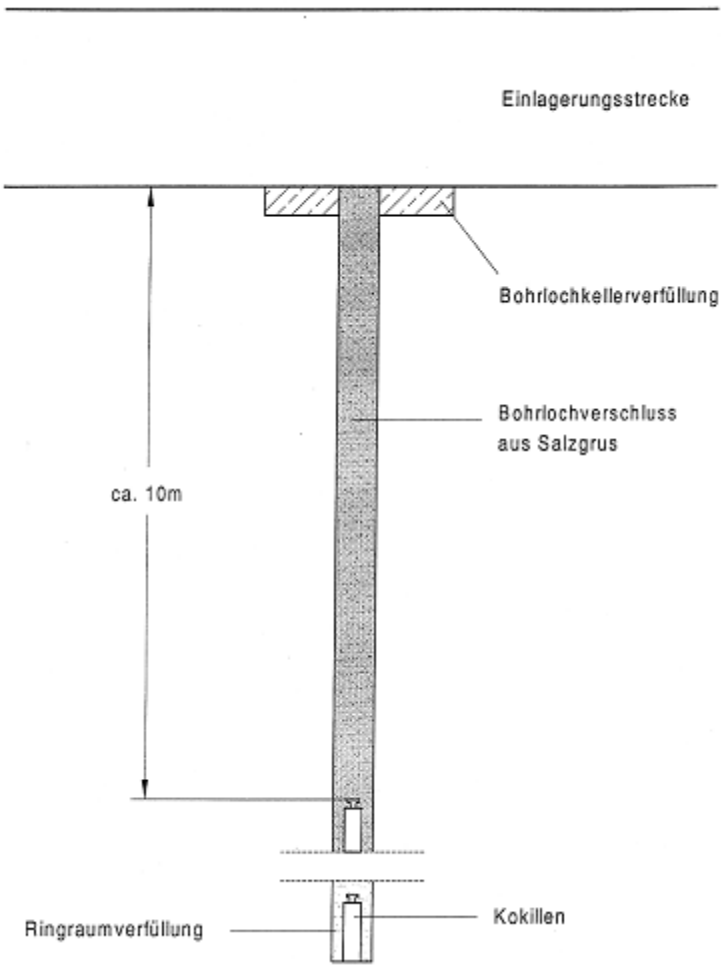

Abbildung 5-6: Bohrlochverschluss aus Salzgrus

Behälter

Neben den geotechnischen Barrieren Schacht- und Streckenverschluss, dem Bohrlochverschluss und dem Versatz wurden im AP5 auch die Behälter betrachtet. Deren Hauptfunktion besteht darin, die in ihnen verpackten radioaktiven Abfälle zu fixieren und während des Transports über und unter Tage den sicheren Einschluss der radioaktiven Stoffe zu gewährleisten. Wie schon zuvor erläutert, sieht das Nachweiskonzept vor, dass die Barriereeigenschaften der Behälter, d. h. der technischen Barriere, für den sicheren Einschluss der radioaktiven Stoffe zeitlich begrenzt sind bis zu dem Zeitpunkt, an dem die vorgesehenen geotechnischen Barrieren (Versatz, Bohrloch-, Strecken- und Schachtverschluss) eine ausreichende Wirksamkeit erreicht haben. Der Nachweis der für die

Endlagergebinde vorgeschlagenen Grenz- bzw. Richtwerte für „Unterkritikalität“, „Dosisleistung“, „Integrität“ (Dichtheit), „Temperatur“ und „Gasbildung“ ist für die verschiedenen Behälter bzw. Endlagergebindetypen zu führen.

Dies ist bislang nicht für alle in diesem Vorhaben betrachteten Endlagergebindetypen erfolgt oder unter der Annahme von Rahmenbedingungen, die nur eingeschränkt auf die heutigen Behälter- bzw. Endlagerkonzepte übertragen werden können. Nach derzeitiger Datenlage ist der Nachweis der Integrität von Brennstabkokillen aufgrund mechanischer Einwirkungen durch den Gebirgsdruck sowie durch thermisch induzierte Spannungen von besonderem Interesse. Ein weiterer Schwerpunkt ist der Nachweis der Integrität der Endlagergebinde für die auslegungsrelevanten Störfälle und die daraus resultierenden mechanischen und thermischen Einwirkungen.

Zusammenfassung des ermittelten Forschungsbedarfs

Zunächst ist festzuhalten, dass ein Nachweiskonzept vorliegt, mit dem der Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren geführt werden kann. Im Ergebnis der Bearbeitungen zu den einzelnen Barrieren ist jedoch festzustellen, dass zur Quantifizierung von Anforderungen und Einwirkungen und damit für eine belastbare Nachweisführung weitere Arbeiten erforderlich sind. Dies betrifft beispielsweise den Nachweis einer ausreichend dichten Auflockerungszone im Bereich der geotechnischen Barrieren sowie die Übertragung der in der Bautechnik üblichen und als Methodik der Teilsicherheitsbeiwerte bezeichnete Vorgehensweise [Eurocode 2002] bei deutlich längeren Nachweiszeiträumen. Von zentraler Bedeutung für die Nachweisführung und auch für die Quantifizierung von Einwirkungen ist die vertiefende Untersuchung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus bei kleinen Porositäten und Permeabilitäten. Diese Fragestellung ist auch beim Design eines Bohrlochverschlusses zu berücksichtigen.

5.2 FEP-Generierung und Szenarienentwicklung

Die Identifizierung und die anschließende quantitative Analyse und Bewertung von Szenarien, die jeweils eine der zukünftig möglichen Entwicklungen des Endlagersystems darstellen, ist ein wesentlicher Bestandteil eines Langzeitsicherheitsnachweises für ein Endlager. Die einzelnen Szenarien werden durch Merkmale, Ereignisse und Prozesse (abgekürzt FEP, abgeleitet von den englischen Bezeichnungen Features, Events und Processes) charakterisiert, die die betrachtete zukünftige Entwicklung des Endlagersystems beeinflussen können.

Ausgehend von der geologischen Situation am Referenzstandort und dem Abfallspektrum wurde zum ersten Mal systematisch ein FEP-Katalog für ein HAW-Endlager im Wirtsgestein Salz erarbeitet. Außerdem wurden verschiedene Vorgehensweisen im Hinblick auf ihre Eignung zur Entwicklung von Szenarien untersucht.

Die Struktur des standortspezifischen FEP-Katalogs orientiert sich an der internationalen FEP-Database der NEA und berücksichtigt die Besonderheiten eines Endlagers in einer Salzformation. Die Identifizierung der einzelnen, in den Katalog aufzunehmenden FEP erfolgte durch die Projektpartner in mehreren Iterationsschritten. Dabei wurden verschiedene methodische Ansatzpunkte verfolgt und schließlich zusammengeführt, um so einen Beitrag zur Vollständigkeit des FEP-Katalogs zu leisten.

Ein methodischer Ansatz zielte vorrangig auf eine Identifizierung aller FEP, die im Prinzip einen Einfluss auf geologische Entwicklungen am betrachteten Referenzstandort oder die Geosphäre des Endlagersystems haben können, sowie ihrer möglichen Folgen im Hinblick auf die eingelagerten Abfälle. Dieses Vorgehen kann als Bottom-Up-Ansatz bezeichnet werden.

Für eine erste Teilliste wurden zunächst das Nahfeld, die Strecken und Schächte, das Wirtsgestein sowie das Deck- und Nebengebirge separat betrachtet und der zeitliche Verlauf der zukünftigen Entwicklung gemäß charakteristischer Veränderungen der Wärmeleistung des Abfalls sowie der Abfolge von Kalt- und Warmzeiten in Abschnitte unterteilt. Aus dieser prototypischen FEP-Liste wurden beispielhaft Szenarien abgeleitet als Kombinationen von Merkmalen sowie zukünftig stattfindenden Prozessen und Ereignissen, die den Einschluss bzw. die Freisetzung von Radionukliden bewirken oder beeinflussen können. Dazu wurden auf Basis der Szenario-Technik die Wechselwirkungen zwischen sämtlichen FEP der Liste beurteilt und das Ergebnis in einer Einflussmatrix und einem Einflussdiagramm dargestellt, in dem sich der Vernetzungs- und Beeinflussungsgrad im System ablesen lässt. Für die bezüglich der Vernetzung als bedeutsam erkannten FEP wurden die möglichen Ausprägungen definiert und die Konsistenz dieser Ausprägungen mit den möglichen Ausprägungen der anderen stark vernetzten FEP beurteilt. Das Resultat der Konsistenzabschätzung wurde in einer Konsistenzmatrix eingetragen, auf deren Grundlage eine Cluster-Analyse zur Generierung von Rohszenarien erfolgte. Im Ergebnis zeigte sich, dass dieses Verfahren der Szenario-Technik nicht für die Szenarienentwicklung geeignet ist, wenn die in der zugrunde liegenden FEP-Liste beschriebenen Prozesse nicht nur qualitativ, sondern quantitativ nach physikalischen Gesetzmäßigkeiten aufeinander wirken.

Die Vorgehensweise wurde dann dahingehend modifiziert, dass für das Wirtsgestein beispielhaft Szenarien als Zusammenstellung der mechanischen, thermischen, hydraulischen und chemischen Prozesse, die die Barriereeigenschaften des Wirtsgesteins verändern können, abgeleitet wurden. Da der Bottom-Up-Ansatz darauf basiert, potenzielle Szenarien durch die Kombination sämtlicher FEP zu identifizieren, wurde zunächst die Anzahl der zu berücksichtigenden FEP durch Einschränkung des Zeitraums auf 0 bis 10 000 Jahre nach Verschluss des Endlagers reduziert. Dann wurde der Initialzustand hinsichtlich der mechanischen, thermischen, hydraulischen und chemischen Randbedingungen definiert. Aus der Kombination der zu berücksichtigenden FEP wurde anschließend als Zwischenergebnis eine Gesamtheit der zu betrachtenden Szenarien abgeleitet, die vor einer quantitativen Konsequenzenanalyse allerdings weiter zu überarbeiten sind. Bei dieser Vorgehensweise erfolgt die Szenariengenerierung abhängig von der Sicherheitsfunktion des Wirtsgesteins und enthält damit ein typisches Element des Top-Down-Ansatzes.

In einem weiteren methodischen Ansatz zur Entwicklung von zu betrachtenden Szenarien und zur Identifizierung der zu berücksichtigenden FEP wurde von der Frage ausgegangen, ob und wie Lösungen mit den Abfällen in Kontakt treten können. Auf Basis dieses Top-Down-Ansatzes wurden mögliche Szenarien identifiziert, die zu einem Versagen einer oder mehrerer geologischer oder geotechnischer Barrieren führen können. Ausgangspunkt der Überlegung war, dass in Folge solcher Ereignisabläufe Radionuklide aus den Abfällen freigesetzt und möglicherweise bis in die Biosphäre transportiert werden können. Anhand dieser Szenarien wurden dann in einem zweiten Schritt alle FEP identifiziert und beschrieben, die bei diesen Szenarien eine Rolle spielen. Bei dieser Vorgehensweise besteht die Schwierigkeit vor allem darin, den Nachweis zu führen, dass die Liste der Szenarien vollständig ist und dass alle relevanten FEP identifiziert worden sind.

Die verschiedenen methodischen Ansätze haben ihre Vorteile, sie weisen aber auch jeweils spezifische Nachteile auf. Diese Aspekte sind auch vor dem Hintergrund zu bewerten, dass sich Salzgestein in einem wesentlichen Aspekt von den übrigen Gesteinen unterscheidet, die als mögliche Wirtsgesteine weltweit untersucht werden. Erfahrungen mit der Szenarienentwicklung und der Identifizierung von FEP, die in anderen Ländern gemacht wurden, sind daher nur eingeschränkt übertragbar.

Da es sich bei Salz um ein dichtes Gestein handelt, das nicht durchströmbar ist und in dem Lösungseinschlüsse mit einem makroskopisch relevanten Volumen nur sehr vereinzelt anzutreffen sind, kommen die im Salz endgelagerten hochradioaktiven Abfälle nur unter bestimmten Voraussetzungen mit größeren Lösungsmengen in Kontakt. Die Anwesenheit ausreichender Lösungsmengen ist aber das zentrale Merkmal, das zu einer Freisetzung von Radionukliden aus den eingelagerten Abfällen und zum Transport dieser Radionuklide in die Biosphäre führen kann. Bei einem Endlager im Salzgestein kommt es erst dann zu einem Kontakt mit Lösungen aus dem Deck- und Nebengebirge, wenn eine oder mehrere Barrieren ausgefallen sind. Aufgrund der Standortwahl und der Auslegung des Endlagerbergwerks mit seinen geotechnischen Barrieren ist ein Ausfall der geologischen Barriere oder der geotechnischen Barrieren nur unter bestimmten Randbedingungen zu besorgen. Da die Wahrscheinlichkeit solcher Vorgänge in der Regel sehr niedrig ist, diese Vorgänge jedoch nicht auszuschließen sind, müssen sie im Rahmen von Szenariendefinitionen berücksichtigt werden. Für die sicherheitliche Bewertung der Szenarien ist dabei ein detailliertes Verständnis der bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit der einzelnen FEP und ihrer Abhängigkeiten und Beeinflussungen notwendig.

Der Bottom-Up-Ansatz sollte vorrangig genutzt werden, die FEP zu identifizieren, die für die Standortentwicklung potenziell relevant sein können. Dies trägt dazu bei, einen möglichst vollständigen FEP-Katalog zu erhalten, insbesondere im Hinblick auf die ungestörten Entwicklungen im Endlagersystem. Die Schwierigkeit besteht hier in der geeigneten Kombination von FEP zur Entwicklung von Szenarien.

Beim Top-Down-Ansatz dagegen können auf Grund der Vorgehensweise die betrachteten Szenarien direkt als Basis für die Konsequenzenanalyse dienen. Allerdings ist der Nachweis schwierig, dass die Liste der Szenarien vollständig ist. Außerdem werden nur FEP im Katalog aufgenommen, die bei den betrachteten Szenarien eine Rolle spielen. Bei dieser Vorgehensweise haben Expertenmeinungen einen unmittelbaren und sehr großen Einfluss auf das Ergebnis.

Im Ergebnis ist zu konstatieren, dass für ein Endlager in einer Salzformation, bei der die normale, ungestörte Entwicklung des Endlagersystems durch den dichten Einschluss der Abfälle charakterisiert ist, eine Vorgehensweise, bei der Elemente eines Bottom-Up-Ansatzes und eines Top-Town-Ansatzes geeignet miteinander verknüpft werden, am ehesten zielführend erscheint. Hinsichtlich der Eindeutigkeit der angewandten Methodik zur Entwicklung von Szenarien ist eine weitere Überarbeitung der Vorgehensweise und ihrer Beschreibung erforderlich.

In Bezug auf die Vollständigkeit des FEP-Katalogs hat sich gezeigt, dass die Verfolgung und Zusammenführung unterschiedlicher methodischer Ansätze einen wertvollen Beitrag liefern kann. Der für den Referenzstandort entwickelte FEP-Katalog, dessen standortspezifische, geowissenschaftlichen Merkmale entsprechend den vorhandenen Daten zum Standort Gorleben festgelegt worden sind, kann mit einer entsprechenden Überarbeitung an jeden Standort angepasst werden, bei dem die geologische Situation und das vorgesehene Endlagerkonzept ähnlich der am Referenzstandort sind.

5.3 Ermittlung und Bewertung nicht auszuschließender Freisetzungsszenarien

Im Vordergrund der Untersuchungen stand, das vorhandene sicherheitsanalytische Instrumentarium hinsichtlich seiner Anwendbarkeit für eine Konsequenzenanalyse für Szenarien, die zu einer Freisetzung von radioaktiven Stoffen aus einem Endlager bis in die Biosphäre führen können, zu testen. Dies erfolgte auf Basis einiger nicht auszuschließender Szenarien bzw. What-If-Szenarien, die beispielhaft ermittelt und analysiert worden sind. Die betrachteten Szenarien sind allerdings nicht auf Basis einer systematischen Szenarienentwicklung ermittelt worden. Auch sollten die betrachteten Freisetzungsszenarien weder möglichst abdeckend sein noch hinsichtlich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit bewertet werden.

Eine radiologisch relevante Freisetzung von Radionukliden aus einem Endlager setzt in der Regel voraus, dass Lösungen mit den eingelagerten Abfällen in Kontakt kommen. Dies bedeutet für ein Endlager in einer Salzformation, die nicht durchströmbar ist und in der Lösungseinschlüsse mit einem relevanten Volumen nur sehr vereinzelt anzutreffen sind, dass eine oder mehrere Barrieren auf Grund von bestimmten Prozessen oder Ereignissen ausfallen müssen, damit ein Zutritt von Lösung in das Endlager bis in die Einlagerungsorte möglich ist. Freisetzungsszenarien für ein Endlager in einer Salzformation betreffen daher immer eine gestörte Entwicklung des Endlagersystems.

Im zweiten Schritt wurden die Konzepte und Modelle für die sicherheitsanalytische Bewertung der zu betrachtenden Szenarien zusammengestellt und Konsequenzenanalysen für einige ausgewählte Szenarien durchgeführt. Aus diesen Arbeiten wurde der noch erforderliche FuE-Bedarf zur Vervollständigung des sicherheitsanalytischen Instrumentariums ermittelt. Dabei wurden auch die Auswirkungen von zukünftigen menschlichen Einwirkungen und die Ergebnisse von Studien zu natürlichen Analoga berücksichtigt.

Aus den Arbeiten in diesem Arbeitspaket wurden gegenüber dem Arbeitspaket 3 weitere, für gestörte Entwicklungen des Endlagersystems relevante FEP identifiziert. Diese identifizierten FEP waren eine wichtige Grundlage für die Vervollständigung des FEP-Katalogs.

Betrachtete Entwicklungen des Endlagersystems

Das Referenzszenario beschreibt die ungestörte Entwicklung des Endlagersystems und wird als Regelfall betrachtet. Diesem Szenario lagen die folgenden Annahmen zu Grunde: Bei einem Endlager im Salzgestein, wie beispielsweise am Referenzstandort, treten keine Wegsamkeiten im Wirtsgestein auf und es gibt keinen Lösungszutritt durch die geologische Barriere von außen. Durch entsprechende Erkundung wird sichergestellt, dass makroskopische Lösungseinschlüsse im Wirtsgestein nicht angetroffen werden bzw. sich bei der Auffahrung der Grubenbaue entleeren. Der Porenraum in den Grubenbauen verringert sich aufgrund der Konvergenz des Salzes mit der Zeit. Alle Verschlussbauwerke funktionieren anforderungsgemäß, ihre Eigenschaften entsprechen den Planungswerten. Bei den Modellrechnungen werden diese Eigenschaften während des Nachweiszeitraums als konstant angenommen. Im Referenzszenario kommt es zu keiner Freisetzung von Radionukliden.

Aufbauend auf dem Referenzszenario wurden die folgenden Freisetzungsszenarien betrachtet:

- Versagen des Schachtverschlusses (nach 50 Jahren),
- Versagen der Streckenverschlüsse zwischen Infrastrukturbereich und restlichen Grubenbauen (nach 50 Jahren),
- Gemeinsames Versagen des Schachtverschlusses und der Streckenverschlüsse,
- Sofortiger Zutritt von Lösungen aus begrenzten Lösungseinschlüssen im Wirtsgestein,
- Szenarien, in denen die vorstehenden Ereignisse miteinander kombiniert wurden.

Eine sicherheitstechnische Bewertung der berechneten Modellergebnisse für die verschiedenen betrachteten Szenarien ist nicht angebracht, da das Ziel der Untersuchungen auf dem Test des sicherheitsanalytischen Instrumentariums lag. Zu diesem Zweck wurden auch Kombinationen von Szenarien betrachtet, die wegen ihrer sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeit auszuschließen sind. Die nachfolgenden Aussagen zu den Ergebnissen sollen nur eine Orientierung über das Systemverhalten geben und die Bedeutung bestimmter Ereignisabläufe dokumentieren.

Weitere Szenarien, wie z. B. die Subrosion, wurden nicht im Detail untersucht, weil sie zu keiner Freisetzung von Radionukliden im Nachweiszeitraum von 1 Million Jahren führen. Dabei wird vorausgesetzt, dass am Referenzstandort die Subrosionsraten so klein sind, dass eine Freisetzung durch Subrosion auszuschließen ist. Einige Freisetzungsszenarien wurden nicht detailliert untersucht, weil noch keine Werkzeuge für die Sicherheitsbewertung vorhanden sind, oder weil die Szenarien noch nicht abschließend definiert worden sind. Zu nennen ist in diesem Zusammenhang die Freisetzung gasförmiger Radionuklide nach einem durch mechanische Einwirkung verursachten Ausfall von Brennstabkokillen.

Zukünftige menschliche Handlungen, insbesondere ein Eindringen in den Endlagerbereich, können zu einer Freisetzung von Radionukliden führen. Es fehlt jedoch die wissenschaftliche Grundlage für die Voraussage solcher Handlungen, d.h. sie können nicht im Rahmen einer systematischen Szenarienentwicklung berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, die Einwirkungen des Menschen auf ein Endlager außerhalb der Sicherheitsanalyse auf Basis gesonderter stilisierter Szenarien zu behandeln. Zur Vorgehensweise sind regulatorische Vorgaben zu treffen. Die Auswirkungen dieser Szenarien sollten bei der Standortauswahl und der Konzeption und Auslegung des Endlagers berücksichtigt werden.

Modellentwicklung und Konsequenzenanalyse

Für alle betrachteten Szenarien wurden Modellrechnungen mit dem Programmpaket EMOS durchgeführt, um zu untersuchen, inwieweit mit den vorhandenen Werkzeugen solche Szenarien modelliert und die Sicherheit eines potenziellen Endlagers beurteilt werden kann. Neben der Beurteilung der Modelle standen auch Fragen zu den Eingabedaten und Parametern dieser Modelle im Blickpunkt. Es sollte zudem geklärt werden, ob die ausgegebenen Daten zur Berechnung der Indikatoren gemäß den in Diskussion befindlichen Sicherheitsanforderungen bei der Beurteilung von Endlagern ausreichen.

EMOS ist ein modulares Programmpaket, bestehend aus verschiedenen miteinander verknüpfbaren Programmmodulen für die Vorgänge in einem Endlagernahbereich, im Deckgebirge und in der Biosphäre. Das im Kapitel 3.2 beschriebene Endlagerkonzept wurde im EMOS-Nahfeldmodul LOPOS in vereinfachter Form unter Beibehaltung der wesentlichen Kenngrößen in einer Segmentstruktur abgebildet. Die einzelnen Segmente repräsentieren jeweils Abschnitte von Schächten, Zugangs-, Beschickungs- und Einlagerungsstrecken oder Bohrlöchern. Alle relevanten physikalisch-chemischen Prozesse, wie z.B. Hohlraumverringerung und Salzgruskompaktion durch Konvergenz des Salzes, Radionuklidmobilisierung aus den Abfällen, Ausbreitung von Salzlösung ggf. mit Transport von Radionukliden, Diffusion von Radionukliden in einer Lösung, sind in den jeweiligen Segmenten modelltechnisch verankert und werden in ihrer Gesamtheit unter Berücksichtigung sich ändernder Temperatur- und Druckrandbedingungen modelliert.

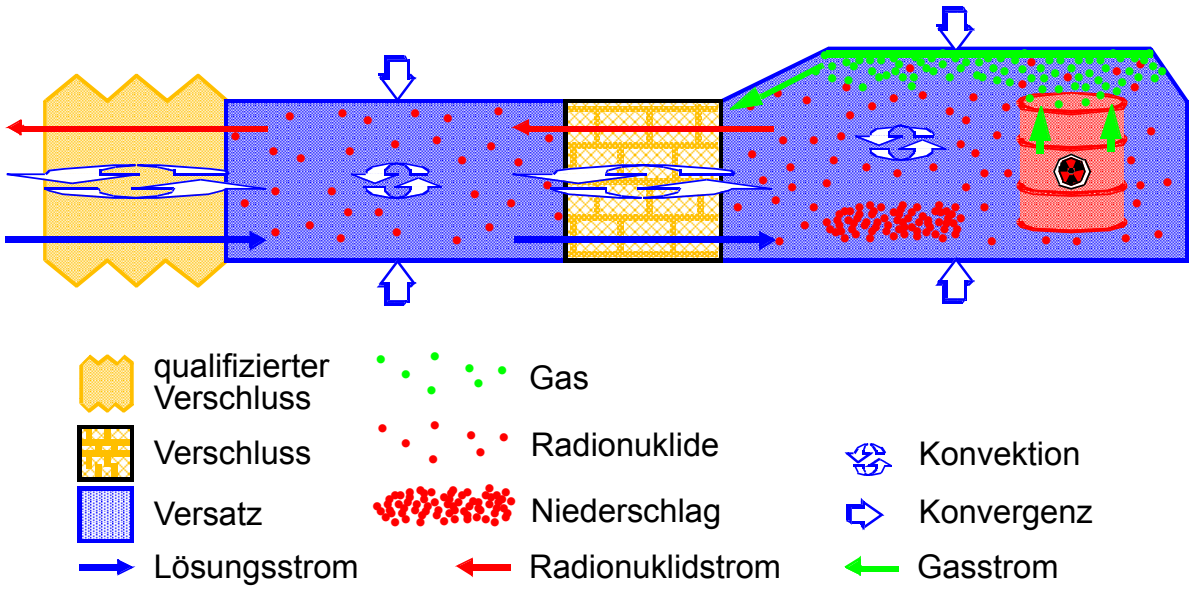

Abbildung 5-7: Teilmodell eines Grubengebäudes in LOPOS

Bei der Modellierung der Freisetzungsszenarien zeigte sich, dass zur Berücksichtigung von makroskopischen Lösungseinschlüssen, die z. B. bei der Erkundung nach dem Abteufen von Bohrlöchern nicht detektiert wurden, einige programmtechnische Anpassungen bei den Segmentmodellen für Bohrlöcher vorzunehmen waren.

Bei der ungestörten Entwicklung des Endlagers kann Lösung über den anforderungsgemäß funktionierenden Schachtverschluss in das Endlager eindringen. Die Gesamtmenge an eindringender Lösung und die zeitliche Entwicklung hängen von den hydraulischen Kennwerten des Schachtverschlusses ab. Durch die zunehmende Verringerung des Porenraums im Versatz aufgrund der Konvergenz der Grubenbaue wird diese Lösung wieder aus dem Endlager über den Schachtverschluss herausgepresst. Die sicherheitsanalytischen Rechnungen ergeben, dass es zu keiner Zeit zu einem Kontakt der eindringenden Lösung mit den eingelagerten Abfällen kommt und folglich auch nicht zu einer Freisetzung von Radionukliden aus dem Grubengebäude über den Lösungspfad.

Selbst das Versagen eines einzelnen Bauwerkes, ob Schachtverschluss oder Verschlussbauwerk zwischen Infrastrukturbereich und Zugangsstrecken, verursacht keine Freisetzung von Radionukliden innerhalb des Nachweiszeitraumes. Es zeigte sich, dass das Versagen des Schachtverschlusses mehr Einfluss auf die Modellergebnisse hat als ein Versagen eines Verschlussbauwerkes im Inneren des Grubengebäudes. Erst bei einem gemeinsamen Versagen beider Verschlussbauwerke dringt die zutretende Lösung während des Nachweiszeitraumes bis in die Einlagerungsorte vor, und es kommt zu einer Freisetzung von Radionukliden in die Geosphäre.

Zum Test des Instrumentariums wurde ferner ein spezielles Szenario definiert, bei dem insgesamt sechs Lösungseinschlüsse á 100 m^3 im Wirtsgestein angenommen werden, die in Kontakt mit je einem Einlagerungsbohrloch stehen. In diesem speziellen Szenario, das auf-

grund der geologischen Gegebenheiten am Referenzstandort und der entsprechenden Erkundungen als What-If-Szenario einzustufen ist, liefern die Modellrechnungen im Ergebnis immer eine Freisetzung von Radionukliden aus dem Grubengebäude, da die Lösung kontaminiert ist und durch die Konvergenz aus dem Grubengebäude gepresst wird. Die freigesetzte Menge ist bei intakten Verschlussbauwerken im Nachweiszeitraum sehr klein. Bei einer Kombination der verschiedenen FEP – Zutritt aus einem Lösungseinschluss im Wirtsgestein und Ausfall aller Verschlussbauwerke – in einem Szenario, errechnen sich vergleichsweise signifikante potenzielle Strahlenexpositionen.

Identifizierter FuE-Bedarf

Das Instrumentarium für eine Konsequenzenanalyse für bei der Sicherheitsanalyse zu betrachtende Szenarien für ein Endlager in einer Salzformation ist weit entwickelt und anwendbar. Die nach derzeitigem Kenntnisstand relevanten Freisetzungsszenarien lassen sich mit den Modulen von EMOS für Nahfeld, Fernfeld und Biosphäre abbilden. Es sind gegebenenfalls Programmanpassungen erforderlich, wie das Beispiel der Berücksichtigung von Lösungseinschlüssen gezeigt hat. Für bisher nicht definierte Szenarien ist jeweils zu prüfen, ob neue Module des Programmpakets EMOS oder neue Modelle für die vorhandenen Module zu entwickeln sind.

Für die Auswertungen der durchgeführten Rechenläufe sind die vorhandenen Ausgabedateien von EMOS gut geeignet. Sollten zukünftig neben den bisherigen radiologischen Sicherheitsindikatoren zusätzliche Indikatoren für die Bewertung der Langzeitsicherheit verwendet werden, z. B. wenn die Isolation der hochradioaktiven Abfälle als zentrale Sicherheitsfunktion des Endlagersystems betrachtet wird, sind Anpassungen vorzunehmen, da bisher nicht alle Ausgabegrößen oder Algorithmen für die Berechnung der Indikatorwerte zur Verfügung stehen.

Im Folgenden werden die wichtigsten offenen Fragen erörtert, die im Zusammenhang mit der Bewertung des Instrumentariums zur Analyse von Freisetzungsszenarien in diesem Arbeitspaket aufgetreten sind:

1. Für die verschiedenen einzulagernden Abfallarten ist ein unterschiedlicher Stand in Bezug auf die Frage festzustellen, ob solche Modelle noch zu entwickeln sind oder ob bereits vorhandene konzeptionelle Modelle noch implementiert werden müssen. So existieren bereits zwei erweiterte konzeptuelle Mobilisierungsmodelle für verglasten hochaktiven Abfall und für abgebrannte LWR-Brennelemente, die nicht in der aktuellen Version des Nahfeldmoduls LOPOS implementiert sind. Für die Mobilisierung aus abgebrannten Brennelementen aus HTR und Forschungsreaktoren liegen keine numerischen Modelle vor. Das vorhandene konzeptuelle Modell für HTR-Brennelemente sollte übernommen werden; für Brennelemente aus Forschungsreaktoren sind Mobilisierungsmodelle zu entwickeln und in die Rechenprogramme zu übernehmen.

2. Es ist zu untersuchen, ob die Bildung und das Verhalten von Gasen in einem HAW-Endlager in den sicherheitsanalytischen Modellen detaillierter berücksichtigt werden müssen. Die Gasspeicherung in einem Segment und die Gasfreisetzung aus einem Segment werden konzeptuell bisher nur in sehr vereinfachter Form berücksichtigt. Der Transport von Gasen im Grubengebäude kann nicht explizit berechnet werden, sondern wird implizit als Randbedingung vorgegeben, die durch vorangehende Berechnungen mit externen Programmen ermittelt wird. Bevor konzeptuelle Modelle zum Gastransport entwickelt werden, ist zu klären, wie stark die Gasbildung in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle ist. Gegebenenfalls können die Auswirkungen der Gase im Endlager vernachlässigt werden und eine Programmentwicklung wäre überflüssig.

3. Die Vorgänge bei einer Flutung von Modellsegmenten sind nicht ausreichend detailliert modelltechnisch abgebildet. Es gibt mehrere Vereinfachungen, die bei einer Weiterentwicklung behoben werden sollten. Beispielsweise sollte ein Modell entwickelt werden, mit dem die Flutung eines leeren Bohrlochs von oben bei hoher Permeabilität des Stopfens berechnet werden kann. Auch die Flutung von Modellsegmenten, die sich auf gleicher Teufe befinden, aber eine unterschiedliche Höhe aufweisen, sollte – unter Berücksichtigung der LOPOS-spezifischen Kopplung von Segmenten auf Mittelpunktsniveau – verbessert werden. Des Weiteren sollte die Berechnung von Strömungswiderständen bei der kontinuierlichen Flutung von Segmenten noch genauer untersucht werden.

4. Die Segmentmodelle zur Beschreibung von Strömungsbarrieren müssen erweitert werden, um mehrere – über einen Zeitbereich jeweils konstante – Werte der Permeabilität ansetzen zu können. Beispielsweise hat es sich in den Modellrechnungen als erforderlich erwiesen, eine vorgegebene Permeabilität für eine gewisse Anfangsperiode anzusetzen und nach einem angenommenen Ausfall der Barriere durch eine erhöhte Permeabilität zu ersetzen. Durch ein solches Modell könnte auch ein unterschiedliches Barrierenversagen durch Korrosion, die entweder unter trockenen Bedingungen oder unter Beteiligung von Feuchtigkeit abläuft, abgebildet werden.

Darüber hinaus wurde bei den Untersuchungen eine Reihe von allgemeinen Gesichtspunkten identifiziert, die im Vorfeld eines konkreten Standortverfahrens noch näher zu untersuchen sind. Sie betreffen Randbedingungen oder Eingangsdaten für die sicherheitsanalytischen Modellrechnungen:

1. Eine wichtige ausstehende Aufgabe ist die Ermittlung des tatsächlich zu erwartenden Radionuklidinventars für alle Abfallarten. Durch die politisch vorgegebenen Rahmenbedingungen ist das zu erwartende Abfallaufkommen prinzipiell bekannt, so dass die Erstellung eines vollständigen Inventars als eine der nächsten Aufgaben sinnvoll ist. Dabei bedarf es eines gewissen Aufwands, die Inventare von Abfällen aus Forschungsreaktoren oder anderen, ähnlichen Quellen zusammenzustellen, da beispielsweise Abbranddaten für alle einzulagernden Brennelemente ermittelt werden müssen.

2. Für ein Endlager mit hochradioaktiven, Wärme erzeugenden Abfällen müssen das Temperaturfeld und seine zeitliche Entwicklung berechnet werden. Auch in Zukunft wird es als sinnvoll erachtet, derartige Berechnung mit separaten Rechenprogrammen auf Prozesslevel durchzuführen und die Ergebnisse als Tabellen in die Rechenprogramme für Langzeitsicherheitsanalysen zu übernehmen. Es fehlen aber aktuelle Temperaturfelddaten für die derzeit diskutierten Endlagerkonzepte.

3. Die Eingabedaten für die Berechnung der Konvergenz sind standortspezifisch. Anhand von gebirgsmechanischen Modellrechnungen müssen die für das in LOPOS implementierte Modell erforderlichen Daten ermittelt werden. Es wäre sinnvoll, einen generischen Datensatz für die Konvergenz zu ermitteln, der für vorläufige Rechnungen eingesetzt werden könnte. Die derzeit verfügbaren Daten sind nicht abgesichert und bilden im Prinzip die Konvergenz nach, wie sie in alten, ca. 20 Jahre zurückliegenden Rechnungen verwendet wurde.

4. Die Konvergenz des Gebirges hängt stark von der Porosität der kompaktierbaren Materialien in den aufgefahrenen Grubenbauen ab. Insbesondere bei sehr kleinen Porositäten ist jedoch das Kompaktionsverhalten weder experimentell noch theoretisch gut abgesichert. Zukünftige gebirgsmechanische Untersuchungen zur Versatzkompaktion bei sehr geringen Porositäten sind daher zu verfolgen, und gegebenenfalls sind im Nahbereichsmodul LOPOS neue konzeptuelle Modelle für die dabei ablaufenden Prozesse zu entwickeln und die numerischen Modelle entsprechend anzupassen.

Die derzeit in den Fernfeldmodulen verwendeten Transportmodelle berücksichtigen Rückhalteprozesse, wie die Matrixdiffusion und Sorption, in unterschiedlichem Ausmaß. Es ist zu prüfen, ob eines der vorhandenen Modelle den Bedarf für eine Langzeitsicherheitsanalyse abdeckt oder gegebenenfalls angepasst werden muss.

5.4 Nachweiskonzepte für die Einhaltung der nichtradiologischen Schutzziele in der Nachbetriebsphase

Zu den nichtradiologischen Schutzzielen für ein Endlager hochradioaktiver und wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle (im Folgenden nur als wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle bezeichnet) gehören der Schutz der Tagesoberfläche bei Hebungen und Senkungen und der Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen.

In Kapitel 5.4.1 wird der Nachweis des Schutzes der Tagesoberfläche unter Berücksichtigung der notwendigen bergbaulichen Auffahrungs- und späteren Versatzmaßnahmen, sowie insbesondere der thermomechanischen Konsequenzen aus der Einlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle beschrieben. Hierzu werden für das Schutzziel „Schutz der Tagesoberfläche“ die im technischen Regelwerk vorhandenen Nachweiskriterien zusammengestellt, die zum Nachweis der Einhaltung des Schutzziels angewendet werden können sowie allgemein dargestellt, wie der Nachweis zur Einhaltung des Schutzziels mittels numerischer Berechnungen geführt werden kann. Für den Referenzstandort werden die

Vorgehensweise und der vorhandene Kenntnisstand anhand vorhandener Berechnungen erläutert.

In Kapitel 5.4.2 wird ein Vorschlag für einen Langzeitsicherheitsnachweis für chemotoxische Stoffe eines HAW-Endlagers im Wirtsgestein Salz beschrieben. Dazu erfolgen eine Darstellung der Vorgaben der Grundwasserverordnung, die Ableitung von Grenz- und Prüfwerten für chemotoxische Stoffe als Bewertungskriterien von Grundwasserverunreinigungen und die Beschreibung des Inventars chemischer und chemotoxischer Stoffe eines solchen HAW-Endlagers. Für den vorgeschlagenen Langzeitsicherheitsnachweis für chemotoxische Stoffe erfolgt abschließend eine zusammenfassende Bewertung, ob FuE-Bedarf für den Konzeptvorschlag zum Nachweis des Grundwasserschutzes besteht.

5.4.1 Schutz der Tagesoberfläche

Neben der Einhaltung der radiologischen Schutzziele sind als konventionelle Schutzziele insbesondere der Schutz der Tagesoberfläche und der Grundwasserschutz nachzuweisen. Auswirkungen eines HAW-Endlagers auf die Tagesoberfläche resultieren zum einen aus den bergbaulichen Auffahrungen, zum anderen aus der Einlagerung wärmeerzeugender Abfälle. Hierbei ist zu beachten, dass die Auffahrungen zu Senkungen, die Einlagerung jedoch zu Hebungen aus der thermischen Expansion (bedingt durch die Wärmeentwicklung) führt.

In diesem Kapitel werden für das Schutzziel „Schutz der Tagesoberfläche“ die im technischen Regelwerk vorhandenen Nachweiskriterien zusammengestellt, die zum Nachweis des Erhalts der Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken angewendet werden können. Des Weiteren wird dargestellt, inwieweit die Nachweisführung zur Einhaltung des Schutzziels mit den vorhandenen Kenntnissen möglich ist.

Zusätzlich sind noch Auswirkungen von Hebungen und Senkungen auf die Vorflut zu betrachten. Dies ist jeweils standortspezifisch durchzuführen und stellt keine Schwierigkeit im Rahmen der Nachweisführung da. Die Auswirkungen auf die hydrogeologischen Verhältnisse dürften wegen des kleinen Hebungsbetrages, der zudem durch die flächenhafte Erosion zumindest teilweise reduziert wird, gering ausfallen.

5.4.1.1 Nachweiskriterien

Ein erstes Kriterium für das Schutzziel „Schutz der Tagesoberfläche“ kann aus der Vorgehensweise im bergrechtlichen Genehmigungsverfahren abgeleitet werden. Hier ist in der Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben (UVP-V Bergbau) [UVP 1990] geregelt, dass betriebsplanpflichtige Tiefbauvorhaben, bei denen

- Senkungen der Oberfläche von 3 m oder mehr oder
- Senkungen der Oberfläche von 1 m bis weniger als 3 m, wenn erhebliche Beeinträchtigungen im Hinblick auf Vorflut, Grundwasser, Böden, geschützte Kulturgüter oder vergleichbare Schutzgüter zu erwarten sind

einer Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) bedürfen. Bei einer zu erwartenden Senkung der Tagesoberfläche von weniger als 1 m muss keine UVP durchgeführt werden, da aus Erfahrungen bekannt ist, dass bei Einhaltung dieses Kriteriums keine besondere Gefährdung der Umwelt vorliegt.

Des Weiteren dient der Schutz der Tagesoberfläche dem Erhalt der Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken. Die zulässigen Verformungen lassen sich aus der Grenzbedingung zur Schiefstellung von Gebäuden ableiten. So gilt bei Ausbildung einer Setzungsmulde nach Skempton [Schneider 1994] der in Abbildung 1-1 dargestellte Zusammenhang. Im Regelfall wird der Grenzwert 1/300 [Schneider 1994] verwendet. In Abhängigkeit der Bebauung oberhalb des Endlagers können ggf. andere Grenzwerte zum Ansatz kommen.

Die in Abbildung 1 angegebenen Grenzwerte gelten für Senkungen, für Hebungen sind die zulässigen Werte zu halbieren [Schneider 1994]. Es ergibt sich also im Regelfall als Grenzwert für die zulässige Schiefstellungsrate eine Rate von 1/300 pro 100 Jahre bei Senkungen bzw. von 1/600 pro 100 Jahre bei Hebungen.

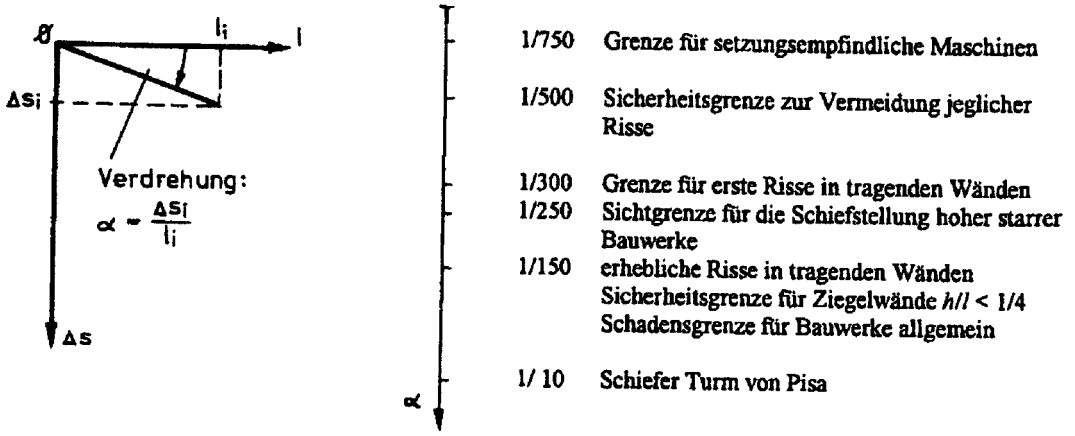

Abbildung 5-8: Grenzwerte für Verformungen bei Ausbildung einer Setzungsmulde

In [DIN 1995] wird die zu betrachtende Lebensdauer von Bauwerken mit 100 Jahren angegeben. Dieser Bezugszeitraum ist auch für die in [DIN 2002] angegebene kürzere Bezugsdauer von 50 Jahren abdeckend. Zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken ist also die Schiefstellungsrate an der Tagesoberfläche pro 100 Jahre für den zu betrachtenden Nachweiszeitraum auszuwerten.

5.4.1.2 Nachweismethoden

Der Nachweis kann rechnerisch geführt werden. Zum Nachweis der Einhaltung der o. g. Kriterien sind die Verformungen an der Tagesoberfläche zu berechnen. Hierzu stehen numerische Berechnungsprogramme, wie z. B. FLAC3D (Finite Differenzen Methode) [ITASCA 1997], JIFE (Finite Elemente Methode) [Heemann 2003] oder ANSYS (Finite Ele-

mente Methode) [ANSYS 1999] zur Verfügung. Die Anwendung dieser Programme im Rahmen geomechanischer Aufgabenstellungen ist Stand der Technik.

Da die Effekte aus der Wärmeentwicklung der Abfälle und ggf. auch aus der (wahrscheinlich vernachlässigbaren) Wärmeentwicklung eines Versatzmaterials berücksichtigt werden müssen, ist eine thermomechanische Berechnung durchzuführen. Das thermomechanische Materialverhalten des Gebirges muss hinreichend genau beschrieben werden können, die Parameter zur Beschreibung des Materialverhaltens müssen bekannt sein bzw. bestimmt werden können.

Zudem muss die zu erwartende Wärmeentwicklung der Abfälle bekannt sein. Mit Kenntnis der geologischen Standortdaten sowie der geplanten Auffahrungen kann dann ein Berechnungsmodell erstellt werden, mit dem die Verformungen an der Tagesoberfläche und somit die Schiefstellungsraten ermittelt werden können.

5.4.1.3 Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes

Die bereits durchgeführten Berechnungen (z. B. [BGR 1988]) im Rahmen der Studien zum Endlagerkonzept Gorleben zeigen, dass für den Referenzstandort ein bezüglich der thermomechanischen Modellparameter ausreichender Kenntnisstand zur Modelllierung und Berechnung der hier zu behandelnden thermomechanischen Aufgabenstellung besteht. Die Auswertung von Schiefstellungsraten an der Tagesoberfläche wurde bisher nicht vorgenommen, stellt aber keine Schwierigkeit dar. Eine grobe Abschätzung aus vorhandenen Berechnungsergebnissen lässt darauf schließen, dass die zulässige Schiefstellungsrate von 1/600 pro 100 Jahre (Grenzwert bei Hebungen) für den zu betrachtenden Nachweiszeitraum eingehalten wird.

Hinsichtlich des Kriteriums einer zulässigen Senkung von 1 m zeigen die bereits vorhandenen Berechnungen , dass die aus den Auffahrungen folgenden Senkungen am Salzspiegel und damit auch an der Tagesoberfläche gering sind und dieses Kriterium eingehalten wird. Aufgrund der sehr geringen Senkung lässt sich abschätzen, dass auch die zulässige Senkungsrate von 1/300 pro 100 Jahre eingehalten wird.

Die zum Nachweis erforderlichen Nachweiskriterien liegen vor. Es sind Programmsysteme vorhanden, mit denen der Nachweis rechnerisch geführt werden kann. Hinsichtlich der Berechnungsannahmen ist jedoch anzumerken, dass, insbesondere in Hinblick auf andere rechnerisch zu führende Nachweise (Standsicherheit und Integrität der Barrieren), ein gebirgsmechanisches Modell vorliegen muss, in dem Materialmodelle sowie Parameter und ihre zu erwartenden Bandbreiten beschrieben sind. Bezüglich der anzusetzenden Wärmeleistung des Inventars wird auf die Ausführungen in [ISIBEL 2007a] verwiesen. Für den Nachweis des Schutzes der Tagesoberfläche ist allerdings eine exakte Kenntnis der Wärmeleistung nicht erforderlich, sondern es kann konservativ eine maximale Wärmeleistung in den Berechnungen angesetzt werden.

5.4.2 Langzeitsicherheitsnachweis zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen

Nach § 34 Abs. 2 Wasserhaushaltsgesetz [WHG 2005] dürfen Stoffe nur so gelagert oder abgelagert werden, dass eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist. Im WHG werden auch „Maßnahmen, die geeignet sind, dauernd oder in einem nicht nur unerheblichen Ausmaß schädliche Veränderungen der physikalischen, chemischen oder biologischen Beschaffenheit des Wassers herbeizuführen“ (§ 3 Abs. 2 Nr. 2 WHG) als Benutzung definiert. In diesem Zusammenhang ist der Nachweis zu führen, dass eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist. Für bestimmte gefährliche Stoffe verdeutlicht und interpretiert die Grundwasserverordnung [GrWV 1997] die wasserrechtlichen Anforderungen zum Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch diese Stoffe. In Bezug auf den Langzeitsicherheitsnachweis für HAW-Endlager im Salzgestein stellt sich die Frage nach der Anwendbarkeit dieser Vorschriften und nach ggf. daraus abzuleitenden Anforderungen an den Nachweis.

5.4.2.1 Vorgaben der Grundwasserverordnung und Bewertungskriterien für Grundwasserverunreinigungen

Nach § 3 Abs. 2 Grundwasserverordnung bedarf das Ablagern von Stoffen der Liste I, das zu einem Eintrag dieser Stoffe in das Grundwasser führen kann, als Gewässerbenutzung im Sinne des § 3 Abs. 2 Nr. 2 WHG der behördlichen Erlaubnis, soweit es nicht einer Planfeststellung oder Genehmigung nach abfallrechtlichen Vorschriften bedarf. Eine Zulassung darf nur erteilt werden, wenn nicht zu besorgen ist, dass Stoffe der Liste I in das Grundwasser gelangen. Nach § 3 Abs. 3 GrWV gilt der Abs. 2 nicht, wenn Stoffe der Liste I nur in so geringen Mengen und Konzentrationen in das Grundwasser gelangen können, dass jede gegenwärtige oder zukünftige Gefahr einer Beeinträchtigung der Grundwasserqualität ausgeschlossen ist.

Nach § 4 Abs. 1 GrWV bedarf das Ablagern von Stoffen der Liste II, das zu deren Eintrag in das Grundwasser führen kann, als Gewässerbenutzung nach § 3 Abs. 2 Nr. 2 WHG der behördlichen Erlaubnis, soweit es nicht einer Planfeststellung oder Genehmigung nach abfallrechtlichen Vorschriften bedarf. Eine Zulassung darf nur erteilt werden, wenn eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften durch Stoffe der Liste II nicht zu besorgen ist.

Hinsichtlich des Nachweises des Grundwasserschutzes sind daher die in der Anlage der GrWV benannten Stoffe der Listen I und II zu betrachten. Hierzu können die von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) abgeleiteten Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS-Werte) [LAWA 2004] als Bewertungskriterien von Grundwasserverunreinigungen herangezogen werden. Diese Schwellenwerte dienen als Maßstab, bis zu welchen Stoffkonzentrationen Änderungen der chemischen Beschaffenheit des Grundwassers als geringfügig einzustufen sind und ab welcher Konzentration eine Grundwasserverunreinigung

(= Grundwasserschaden) vorliegt. Die GFS bilden die Grenze zwischen einer geringfügigen Veränderung der chemischen Beschaffenheit des Grundwassers und einer schädlichen Verunreinigung.

Der Nachweis der Einhaltung der GFS-Werte erfolgt grundsätzlich durch Vergleich der ermittelten oder prognostizierten Stoffkonzentrationen mit den GFS-Werten, muss jedoch für jeden Anwendungsfall spezifisch erfolgen. Überschreiten die regionalen geogenen Hintergrundwerte im Grundwasser die GFS-Werte, können von den zuständigen Behörden unter Berücksichtigung der in [LAWA 2004] aufgestellten Ableitungskriterien für den Einzelfall Werte festgelegt werden.

Von der LAWA wurden GFS-Werte für anorganische Stoffe, für organische Stoffe und für Pflanzenschutzmittel, biozide Wirkstoffe und sprengstofftypische Verbindungen abgeleitet. Bei der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle werden insbesondere anorganische Stoffe in das Salzgestein eingebracht. Organische Verbindungen spielen eine untergeordnete Rolle und Pflanzenschutzmittel, biozide Wirkstoffe und sprengstofftypische Verbindungen spielen keine Rolle. Daher wird vorgeschlagen, die GFS-Werte für anorganische und organische Parameter (s. Tabelle 5-1 und 5-2) als Grenz- und Prüfwerte für den Langzeitsicherheitsnachweis für chemotoxische Stoffe eines HAW-Endlagers im Wirtsgestein Salz heranzuziehen.

Tabelle 5-1: Geringfügigkeitsschwellenwerte für anorganische Parameter

Substanzname	Geringfügigkeitsschwellenwert [µg/l]
Antimon (Sb)	5
Arsen (As)	10
Barium (Ba)	340
Blei (Pb)	7
Bor (B)	740
Cadmium (Cd)	0,5
Chrom (Cr III)	7
Kobalt (Co)	8
Kupfer (Cu)	14
Molybdän (Mo)	35
Nickel (Ni)	14
Quecksilber (Hg)	0,2
Selen (Se)	7
Thallium (Tl)	0,8
Vanadium (V)[1)]	4
Zink (Zn)	58
Chlorid (Cl^-)	250.000
Cyanid (CN^-)	5 (50)
Fluorid (F^-)	750
Sulfat (SO_4^{2-})	240.000

1. Die Anwendung des GFS-Wertes für Vanadium ist bis zum 31.12.2007 ausgesetzt. Diese GFS entspricht zwar dem aktuellen Wissen über die Humantoxizität von Vanadium und dem lebenslangen Schutz vor möglichen Wirkungen. Sie beruht jedoch auf einer unvollständigen und nur strittig zu bewertenden Datenbasis. Durch die Aussetzung soll insbesondere der Industrie die Gelegenheit gegeben werden, die experimentelle Datenbasis zur Human- und Ökotoxizität zu ergänzen. Es wird vermutet, dass auf verbesserter Datenbasis die GFS für Vanadium erhöht werden kann.
2. Der Grenzwert der TrWV für Kupfer ist technisch begründet.

Tabelle 5-2: Geringfügigkeitsschwellenwerte für organische Parameter

Substanzname	Geringfügigkeitsschwellenwert [µg/l]
Σ PAK[1)]	0,2
Anthracen, Benzo[a]pyren, Dibenz(a,h)anthracen	jeweils 0,01
Benzo[b]fluoranthen, Benzo[k]fluoranthen, Benzo[g,h,i]perylen, Fluoranthen, Indeno[1,2,3-cd]pyren	jeweils 0,025
Σ Naphthalin und Methylnaphthaline	1
Σ LHKW[2)]	20
Σ Tri- und Tetrachlorethen	10
1,2 Dichlorethan	2
Chlorethen, (Vinylchlorid)	0,5
Σ PCB[3)]	0,01
Kohlenwasserstoffe[4)]	100
Σ Alkylierte Benzole	20
Benzol	1
MTBE	15
Phenol[5)]	8
Nonylphenol	0,3
Σ Chlorphenole	1
Hexachlorbenzol	0,01
Σ Chlorbenzole	1
Epichlorhydrin	0,1

1. PAK, gesamt: Summe der polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe ohne Naphthalin und Methylnaphthaline, in der Regel Bestimmung über die Summe von 15 Einzelsubstanzen gemäß Liste der US Environmental Protection Agency (EPA) ohne Naphthalin; ggf. unter Berücksichtigung weiterer relevanter PAK (z. B. aromatische Heterocyclen wie Chinoline). Der Grenzwert der TrWV gilt für die Summe der folgenden 4 Einzelstoffe: Benzo[b]fluoranthen, Benzo[k]fluoranthen, Benzo[g,h,i]perylen, Indeno[1,2,3-cd]pyren
2. LHKW, gesamt: Leichtflüchtige Halogenkohlenwasserstoffe, d. h. Summe der halogenierten C1- und C2-Kohlenwasserstoffe; einschließlich Trihalogenmethane. Die GFS zu Tri- und Tetrachlorethen, Dichlorethan und Chlorethen ist zusätzlich einzuhalten.
   Die Grenzwerte der TrWV gelten für 3 Einzelstoffe: 1,2 Dichloethan, Chlorethen (Vinylchlorid), Σ Trihalomethane
3. PCB, gesamt: Summe der polychlorierten Biphenyle; in der Regel Bestimmung über die 6 Kongeneren nach Ballschmiter gemäß AltölV (DIN 51527) multipliziert mit 5; ggf. z. B. bei bekanntem Stoffspektrum einfache Summenbildung aller relevanten Einzelstoffe (DIN 38407-F3), dann allerdings ohne Multiplikation
4. Bestimmung nach DEV H53. Bei höheren Konzentrationen kann die Gravimetrie (nach ISO 9377-1-Entwurf) eingesetzt werden. Bei GC-Analyse bezieht sich der o. a. Wert auf die KW-Summe zwischen C10 und C40.
5. Derzeit steht kein genormtes Verfahren zur Verfügung, dessen untere Anwendungsgrenze niedriger oder gleich dem GFS-Wert ist. Es □ng daher auf nicht genormte Verfahren zurückgegriffen werden, die nach den einschlägigen Regeln für Analysenverfahren zu validieren sind. Üblicherweise wird eine Bestimmung des Phenolindex durchgeführt. Bei positivem Befund ist eine Bestimmung der relevanten Einzelstoffe durchzuführen.

5.4.2.2 Inventar chemischer und chemotoxischer Stoffe eines HAW-Endlagers im Wirtsgestein Salz

Das Inventar chemischer und chemotoxischer Stoffe in einem zukünftigen HAW-Endlager setzt sich zusammen aus

- Abfall-, Konditionierungs- und Behältermaterialien der radioaktiven Abfälle,
- Versatz- und Barrierematerialien aus Verfüll- und Verschlussmaßnahmen sowie
- Materialien für den Ausbau von Schächten.

Mit den vorliegenden Angaben zu Werkstoffen und Materialien der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und der jeweiligen chemischen Zusammensetzung erfolgt die Abschätzung des Inventars der chemotoxischen Stoffe. Die Tabelle 1 3 enthält eine Übersicht der ermittelten Massen chemotoxischer Stoffe je Abfallgebinde. Nicht berücksichtigt wurden einige Stoffe der Listen I und II GrWV, für die keine GFS-Werte festgelegt worden sind. Dazu gehören Phosphor, Titan und Zinn, die in den betrachteten Abfallmaterialien nur als gering prozentuale Bestandteile in Stählen und Aluminium vorhanden sind, sowie Uran, das als Bestandteil der ausgedienten Brennelemente bereits beim radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis Berücksichtigung findet. Die Angaben beschränken sich auf die anorganischen Parameter analog Tabelle 5-1, da bei der Ermittlung der chemotoxischen Stoffe nur anorganische Stoffe und keine organischen Verbindungen (s. Tabelle 5-2) identifiziert wurden.

In der Tabelle 5-3 sind die ermittelten Massen chemotoxischer Stoffe für HAW-Kokillen, CSD-B, CSD-C, POLLUX-Behälter, Brennstabkokillen und CASTOR AVR/THTR aufgeführt. Für diese Abfallgebinde liegt eine sehr gute Datenbasis sowohl für die Behältermaterialien als auch für die konditionierten Abfälle vor.

Für den Versatz von Bohrlöchern, Strecken und anderen untertägigen Hohlräumen und für den Verschluss der Bohrlöcher ist nach heutigen Planungen ausschließlich Salzgrus vorgesehen. Für den Verschluss des Endlagers gegenüber der Geo-/Biosphäre sind zwei Barrieren vorgesehen: eine zwischen Infrastruktur- und Einlagerungsbereich und eine zweite am Schacht. Nach heutigen Planungen kommen folgende Materialien in Betracht: Bentonit, Magnesiabinder, Salzbeton, Baustoffgruppen aus Salzmineralien, Steinsalz-Anhydrit-Baustoffe und Schotter.

Für die Kurzzeitdichtung der Barriere am Schacht kommen nach heutigen Planungen auch Bitumen und Asphalt in Betracht. Da es sich bei Bitumen um einen Naturstoff handelt, und Bitumen oder bitumenhaltige Bindemittel zur Herstellung von Asphalt verwendet werden, wird vorgeschlagen, diese Stoffe hinsichtlich des Nachweises zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen nicht weiter zu berücksichtigen.

Mit den vorliegenden Angaben zur chemischen Zusammensetzung wurden die chemotoxischen Stoffe der für den Verschluss des Endlagers nach heutigen Planungen vorgesehenen Versatz- und Barrierematerialien identifiziert und in der Tabelle 1 4 die anorganischen Parameter zusammenfassend dargestellt. Im Wesentlichen wurden Chlorid (Cl^-) und Sulfat

(SO_4^{2-}) als chemotoxische Stoffe identifiziert. Da es sich hierbei um Bestandteile des Salzstockes selbst handelt, wird vorgeschlagen, diese Stoffe hinsichtlich des Nachweises zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen nicht weiter zu berücksichtigen. Darüber hinaus wurden lediglich im Schotter die chemotoxischen Stoffe Fluorid und Chrom identifiziert.

Tabelle 5-3: Massen chemotoxischer Stoffe je Abfallgebinde

Anorganische Parameter	HAW-Kokillen + CSD-B [kg]	CSD-C [kg]	POLLUX-Behälter [kg]	Brennstab-kokillen [kg]	CASTOR AVR/THTR [kg]
Antimon (Sb)					
Arsen (As)			3		
Barium (Ba)					
Blei (Pb)					
Bor (B)	18				
Cadmium (Cd)					
Chrom (Cr III)	21	40	497	76	22
Kobalt (Co)					
Kupfer (Cu)			363	2	225
Molybdän (Mo)			10	1	
Nickel (Ni)	12	30	450	67	
Quecksilber (Hg)					
Selen (Se)					
Thallium (Tl)					
Vanadium (V)[1)]			4	1	
Zink (Zn)	8				
Chlorid (Cl^-)					
Cyanid (CN^-)					
Fluorid (F^-)					
Sulfat (SO_4^{2-})					
Σ chemotoxische Stoffe	59	70	1.328	147	247

Tabelle 5-4: Chemotoxische Stoffe in Versatz- und Barrierematerialien

Anorganische Parameter	Salzgrus (z2HS) [%]	Bentonit [%]	Magnesia-binder [%]	Salzbeton [%]	Baustoff-gruppe aus Salzmineralien [%]	Steinsalz-Anhydrid-Baustoffe [%]	Schotter [%]
Antimon (Sb)							
Arsen (As)							
Barium (Ba)							
Blei (Pb)							
Bor (B)							
Cadmium (Cd)							
Chrom (Cr III)							(Spuren)
Kobalt (Co)							
Kupfer (Cu)							
Molybdän (Mo)							
Nickel (Ni)							
Quecksilber (Hg)							
Selen (Se)							
Thallium (Tl)							
Vanadium (V)[1)]							
Zink (Zn)							
Chlorid (Cl^-)	57 %		33 %	30 %	4 %	15 %	< 0,01 %
Cyanid (CN^-)							
Fluorid (F^-)							< 0,01 %
Sulfat (SO_4^{2-})	3 %				33 %	53 %	
Σ chemotoxische Stoffe	60 %		33 %	30 %	37 %	68 %	< 0,01 %

Die Schachtausbaumaterialien werden nicht in die Betrachtungen zum Nachweis des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen einbezogen. Auf die Ermittlung der Anteile der chemotoxischen Stoffe in den Materialien/Werkstoffe für den Schachtausbau wird daher an dieser Stelle verzichtet. Der nach Ende der Betriebszeit des Endlagers vorgesehene Schachtverschluss hat die Aufgabe, als hydraulische Barriere das Endlager von der Geo-/Biosphäre zu trennen. Durch den Schachtverschluss, der unterhalb des Salzspiegels angelegt wird, wird die durch bauliche Aktivitäten verletzte Barrierewirkung des Wirtsgesteins wiederhergestellt. Es besteht die Möglichkeit, die oberhalb des Schachtverschlusses für den Schachtausbau verwendeten Bauteile aus Materialien/Werkstoffen mit chemotoxischen Stoffen, vor Verschluss zurückzubauen.

5.4.2.3 Langzeitsicherheitsnachweis für chemotoxische Stoffe - Vorschlag für ein Nachweiskonzept

Bei einem zukünftigen HAW-Endlager im Wirtsgestein Salz wird von einer ungestörten Entwicklung ausgegangen. Im Rahmen des radiologischen Langzeitsicherheitsnachweises erfolgt für diese wahrscheinliche Entwicklung der Nachweis des vollständigen Einschlusses und damit der Nachweis der Einhaltung der radiologischen Schutzziele. Dafür werden in [ISIBEL 2007b] funktionale Anforderungen an die einzelnen technischen Barrieren (Behälter, Versatz sowie Bohrloch-, Strecken- und Schachtverschlüsse) abgeleitet, das Design bzw. die Zusammensetzung der einzelnen technischen Barrieren dargestellt und die jeweilige Barriere und ihre Komponenten beschrieben. Mit dem Nachweis des vollständigen Einschlusses ist auch der Nachweis erbracht, dass es zu keinem Eintrag von chemotoxischen Stoffen in das Grundwasser kommen kann und dem Grundwasserschutz genüge getan ist.

Aufgrund der atomgesetzlich festgelegten Schadensvorsorge nach dem Stand von Wissenschaft und Technik wird im Rahmen des radiologischen Langzeitsicherheitsnachweises auch für gering wahrscheinliche Entwicklungen des Endlagers, d. h. gestörte Entwicklungen, der Nachweis der Einhaltung der radiologischen Schutzziele geführt. Zur Ermittlung und Bewertung der potentiellen Strahlenexposition gering wahrscheinlicher Freisetzungsszenarien werden Modellrechnungen zu Grunde gelegt.

Für UTDs wird aufgrund der abfallrechtlich festgelegten Schadensvorsorge nach dem Stand der Technik der Langzeitsicherheitsnachweis für planbare Ereignisabläufe geführt. Wenn in einer verbalargumentativen Betrachtung plausibel dargelegt wird, ob und wie sich nicht planbare Ereignisse auswirken werden, kann auf Modellrechnungen dazu verzichtet werden (vgl. Anhang 2 Ziff. 2.1 DepV). Dieser Maßstab gilt in gleicher Weise für den Langzeitsicherheitsnachweis für chemotoxische Stoffe in einem HAW-Endlager im Salzgestein.

Ungeachtet dieser rechtlichen Vorgaben für den Langzeitsicherheitsnachweis für chemotoxische Stoffe werden von verschiedenen Fachkreisen auch Ansätze vertreten, die darüber hinaus Modellrechnungen zur Ausbreitung von chemotoxischen Stoffen bei nicht planbaren Ereignissen vorsehen. Solche Rechnungen finden aber keine Grundlage in den gesetzlichen Bestimmungen für chemotoxische Stoffe und sind deshalb abzulehnen.

Über die gesetzlichen Anforderungen der DepV hinausgehenden Maßnahmen zum Langzeitsicherheitsnachweis für chemotoxische Stoffe, beispielweise in Form eines What-If-Szenarios, lassen sich nur insoweit rechtfertigen, als dass sie der Untermauerung der verbalargumentativen Betrachtung und damit der Vertrauensbildung dienen, ohne jedoch die gesetzlichen Anforderungen an den Langzeitsicherheitsnachweis auszudehnen.

5.4.2.4 Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes

Inventar chemotoxischer Stoffe eines HAW-Endlagers im Wirtsgestein Salz

Für den Hauptteil der Abfallgebinde liegt eine gute Datenbasis sowohl für die Behältermaterialien als auch für die konditionierten Abfälle vor. Dazu zählen HAW-Kokillen, CSD-B und CSD-C, POLLUX-Behälter und Brennstabkokillen sowie CASTOR AVR/THTR. Wünschenswert wären allerdings detaillierte Massenangaben der Behältermaterialien von POLLUX-Behältern und CASTOR AVR/THTR, die sich derzeit auf die wesentlichen Komponenten beschränken. Darüber hinaus fehlen bei CASTOR MTR 2 Angaben zur Aufteilung der Behältermasse auf Behältergrundkörper sowie Primär- und Sekundärdeckel und bei CASTOR KNK die Angabe der Behältermasse. Für die Brennstäbe des KNK sind die Angaben zur chemischen Zusammensetzung unvollständig und konnten daher nicht berücksichtigt werden.

Für die betrachteten Versatz- und Barrierematerialien (Salzgrus, Bentonit, Magnesiabinder, Salzbeton, Baustoffgruppen aus Salzmineralien, Steinsalz-Anhydrit-Baustoffe und Schotter) liegt ebenfalls eine sehr gute Datenbasis vor. Die noch fehlenden Daten/Informationen zur Ermittlung chemotoxischer Stoffe in diesen Materialien können durch Recherche ermittelt werden und die damit bereits vorliegende Datenbasis ergänzen bzw. vervollständigen.

Langzeitsicherheitsnachweis für chemotoxische Stoffe

Für UTDs wird aufgrund der abfallrechtlich festgelegten Schadensvorsorge nach dem Stand der Technik der Langzeitsicherheitsnachweis für planbare Ereignisabläufe geführt. Wenn in einer verbalargumentativen Betrachtung plausibel dargelegt wird, ob und wie sich nicht planbare Ereignisse auswirken werden, kann auf Modellrechnungen dazu verzichtet werden (vgl. Anhang 2 Ziff. 2.1 DepV). Damit ist dem Besorgnisgrundsatz zum Grundwasserschutz genüge getan und dieser Maßstab kann in gleicher Weise für den Langzeitsicherheitsnachweis für chemotoxische Stoffe in einem HAW-Endlager im Salzgestein herangezogen werden.

Falls seitens des Antragstellers über die gesetzlichen Anforderungen der DepV hinaus ein What-If-Szenario betrachtet wird, um die Robustheit des Endlagersystems hinsichtlich des Grundwasserschutzes vor chemotoxischen Stoffen zu veranschaulichen, lässt sich daraus kein gesonderter FuE-Bedarf ableiten.

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

6.1 Bewertung des erreichten Arbeits- und Entwicklungsstandes

Hauptziel des vorliegenden FuE-Vorhabens war es, auf der Grundlage des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik eine systematische Bestandsaufnahme zur HAW-Endlagerung in Salzformationen vorzunehmen, um insbesondere zu untersuchen, inwieweit die Nachweise zur technischen Realisierbarkeit sowie zur Endlagersicherheit auf der Grundlage des erreichten Kenntnis- und Entwicklungsstandes geführt werden können und worin die Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten zur Beseitigung noch bestehender Unsicherheiten und Lücken bestehen.

Erstmals wurde dabei durchgängig ein Sicherheitsnachweiskonzept erarbeitet und angewendet, das den Vorzügen der HAW-Endlagerung im Steinsalz und damit dem Konzept des sicheren Einschlusses voll Rechnung trägt:

- Im Mittelpunkt des Langzeitsicherheitsnachweises steht der systematische Nachweis des langfristig sicheren Einschlusses der endgelagerten Abfälle durch den Nachweis der Integrität der geotechnischen Barrieren und der geologischen Hauptbarriere.

- Die Bewertung von Freisetzungen erfolgt komplementär für diejenigen Entwicklungen des Endlagers, für die eine Beeinträchtigung der Integrität des Barrierensystems und damit eine Ausbildung eines durchgängigen Transportpfades nicht ausgeschlossen werden kann. Ob diese Entwicklungen wahrscheinlich, gering wahrscheinlich, äußerst gering wahrscheinlich oder auszuschließen sind, ist Ergebnis der Szenarienanalyse.

Dieses Nachweiskonzept steht im vollen Einklang mit dem in jüngster Zeit von der Fachwelt positiv aufgenommenen Vorschlag zum Nachweis der Isolation als zentralem Punkt des Langzeitsicherheitsnachweises für eine HAW-Endlager.

Das hier vorgestellte Nachweiskonzept fußt einerseits auf einem Referenzstandortmodell, das die jüngsten Erkenntnisse aus der seit Oktober 2000 unterbrochenen Erkundung des Salzstockes Gorleben berücksichtigt, und andererseits auf der Weiterentwicklung des technischen Endlagerkonzeptes für ein HAW-Endlager im Steinsalz.

Die für eine Langzeitsicherheitsanalyse relevanten und wesentlichen Inhalte aus dem vorliegenden Referenzstandortmodell sind:

1. Am Referenzstandort steht ein Einlagerungsmedium (Hauptsalz) in der geforderten großen Tiefe von ca. 800 bis 1000 m für die Einlagerung von hochradioaktiven, Wärme erzeugenden Abfällen in ausreichender Menge und unverritzt zur Verfügung.

2. Die Verteilung natürlicher Klüfte im Salzstock und der damit verbundenen Fluidvorkommen folgt bekannten Gesetzmäßigkeiten.

3. Der Hauptanhydrit ist in Schollen zerbrochen, die hydraulisch voneinander isoliert sind. Fluidmigrationen zwischen Einlagerungsbereichen und Deck- und Nebengebirge über den Hauptanhydrit sind daher nicht möglich.

4. Die Art, Genese und das Alter von Salzlösungsvorkommen innerhalb des Salzstocks sind bekannt und ihre Lage relativ zu einer möglichen Auffahrung der Einlagerungsbereiche vorhersehbar. Der Bereich des Hauptsalzes ist nahezu frei von Lösungsvorkommen. Sie sind untereinander nicht vernetzt. Dies gilt ebenfalls für die im zentralen Teil des Hauptsalzsattels auftretenden Kohlenwasserstoffvorkommen.

5. Das Wirtsgestein befindet sich im chemischen Gleichgewicht mit darin enthaltenen Fluiden. Im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sind keine von außerhalb des Salzstocks eingedrungenen Gebirgswässer vorhanden.

6. Die Entwicklung des Salzstocks ist abgeschlossen, so dass mit keinen hohen Aufstiegsraten innerhalb des Nachweiszeitraumes von einer Million Jahre gerechnet werden □ng.

7. Die Integrität der Salzbarriere ist aus geologischer Sicht gewährleistet, da sich der Referenzstandort in einer tektonisch ruhigen Zone befindet und sich nur geringe Subrosionsraten im langfristigen geologischen Mittel herleiten lassen.

8. Die im Deckgebirge vorhandene Hydrodynamik bewirkt, dass das Deckgebirge im Gegensatz zum Hauptsalz als eine Barriere zu betrachten ist, die nur eine geringe Rückhaltefunktion für Radionuklide beinhaltet. Dagegen würde das Deckgebirge aufgrund der Grundwasserbewegungen einen Beitrag zur Verdünnung möglicher Radionuklidkonzentrationen in der Geosphäre liefern.

Von herausragender Bedeutung sind dabei die Erkenntnisse zur geologischen Integrität der Salzbarriere und zur geblockten Struktur des Hauptanhydrit. Damit kann bei der ungestörten Endlagerentwicklung ein Freisetzungspfad über den Hauptanhydrit ausgeschlossen werden. Gleichzeitig wurde die in der Vergangenheit häufig als abdeckendes Referenzszenario betrachtete Radionuklidfreisetzung über den Hauptanhydrit gegenstandslos. Folgerichtig wird der Nachweis des sicheren Einschlusses zum Kern des Sicherheitsnachweises.

Die Weiterentwicklung des technischen Referenzkonzeptes beinhaltet sowohl eine detaillierte Erhebung des endzulagernden Abfallmengengerüstes, dem der gesetzlich festgelegte Ausstieg aus der Kernenergienutzung zugrunde liegt, als auch die Planung des Grubengebäudes und der Einlagerungsabläufe in zwei Varianten hinsichtlich der direkten Endlagerung von ausgedienten Brennelementen. Während die technische Machbarkeit der Endlagerung in selbstabschirmenden POLLUX-Behältern in Strecken bereits in der 1. Hälfte der 90er Jahre nachgewiesen wurde, ist der Abschluss des FuE-Vorhabens DENKMAL zur Demonstration der Endlagerung von Brennstabkokillen in tiefen Bohrlöchern 2008 vorgesehen. Damit werden die maßgeblichen Einlagerungstechniken anwendungsreif zur Verfügung stehen.

Für den Nachweis des sicheren Einschlusses stellt der Nachweis der Integrität der geologischen Hauptbarriere eine grundlegende Voraussetzung dar. Die Analyse der vorliegenden Erkundungsergebnisse zum Salzstock Gorleben hatten gezeigt, dass keine relevanten geogenen Einwirkungen im Nachweiszeitraum von 1 Mio. Jahren zu erwarten sind, die zu einer Beeinträchtigung der Integrität führen könnten. Darüber hinaus wurden mit dem Hydrofrac- und Dilatanzkriterien zwei maßgebliche Kriterien entwickelt, die es gestatten, das Endlagerbergwerk so zu planen, d. h. hinsichtlich der Endlagerteufe und des Abstandes zu den relevanten Schichtgrenzen so auszulegen, dass die Integrität auch unter Berücksichtigung der zu erwartenden geomechanischen Einwirkungen nachgewiesen werden kann. Grundsätzlich neue Erkenntnisse wurden in jüngster Zeit zur Wirkung eines ansteigenden Gasdruckes auf die Barriereintegrität gewonnen. Ohne der noch ausstehenden systematischen Auswertung dieser Forschungsergebnisse vorgreifen zu wollen, kann das ursprünglich unterstellte Fracen der Salzbarriere in Anbetracht des langsamen Anstiegs des Gasdrucks jedoch ausgeschlossen werden.

Die zweite wesentliche Komponente des Nachweises des sicheren Einschlusses ist der Nachweis der Integrität der technischen Barrieren, insbesondere der Schacht- und Streckenverschlüsse.

Das hierzu entwickelte Nachweiskonzept setzt eine fundierte Ermittlung der Auslegungsanforderungen an den hydraulischen Widerstand und die Lebensdauer der Verschlussbauwerke voraus. Unter Berücksichtigung der sich langfristig verringernden Porosität und Permeabilität des eingebrachten Salzgrusversatzes sind beide Anforderungen so zu wählen, dass bei der ungestörten Endlagerentwicklung ein Vordringen von Lösungen über Schächte und Strecken bis zu den Abfällen und das anschließende Auspressen kontaminierter Lösungen über den gleichen Pfad in die Biosphäre nicht zu besorgen sind. Die diversitäre Anordnung von Strecken- und Schachtverschlüssen bietet darüber hinaus die grundsätzliche Möglichkeit, die Auslegungsanforderungen so zu wählen, dass selbst im Fall des Versagens einer dieser beiden technischen Barrieren keine relevanten Freisetzungen zu erwarten sind. Damit lässt sich der Umfang der noch zu betrachtenden Freisetzungsszenarien erheblich einschränken. Das für diese beiden geotechnischen Barrieren entwickelte Nachweiskonzept und die hierzu vorgeschlagenen technischen Lösungen ermöglichen grundsätzlich den ingenieurtechnischen Nachweis, dass die Verschlussbauwerke anforderungsgerecht in Übereinstimmung mit den für sie in der Langzeitsicherheitsanalyse getroffenen Annahmen geplant und errichtet werden können. Während für den Schachtverschluss die wesentlichen Wirkungsmechanismen bereits demonstriert wurden, steht dies für Streckenverschlüsse noch aus.

Eine maßgebliche Voraussetzung für die begründete Ableitung der Auslegungsanforderungen, ist die hinreichende Kenntnis der konvergenzbedingten zeitlichen Abnahme der Porosität und Permeabilität des Salzgrusversatzes in den potentiell durchströmten Grubenbauen, aber auch im mit Salzgrus versetzten Teil eines Einlagerungsbohrlochs. Gegenwärtig ist eine belastbare Prognose bis ca. 10 % Restporosität möglich. Darüber hinaus sind möglichst konservative Annahmen zu treffen.

Die Identifizierung und die anschließende quantitative Analyse und Bewertung von Szenarien, die jeweils eine der zukünftig möglichen Entwicklungen des Endlagersystems darstellen, ist ein wesentlicher Bestandteil eines Langzeitsicherheitsnachweises für ein Endlager. Hierzu wurde zum ersten Mal für ein HAW-Endlager im Wirtsgestein Salz ein systematisch erarbeiteter FEP-Katalog erstellt. Außerdem wurden verschiedene Vorgehensweisen im Hinblick auf ihre Eignung zur Entwicklung von Szenarien untersucht. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse wurden bei der Gestaltung der FEP-Beschreibungen berücksichtigt, um später insbesondere die zu betrachtenden Freisetzungsszenarien systematisch ermitteln zu können, die aufgrund ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit nicht ausgeschlossen werden können.

Hinsichtlich der Bewertung von Freisetzungsszenarien stehen weit entwickelte Verfahren, Modelle und Programme zur numerischen Modellierung zur Verfügung. Sie wurden in einer Vielzahl von Beispielen erfolgreich getestet und gestatten grundsätzlich eine Modellierung der maßgeblichen Prozesse im Nahfeld, Fernfeld und in der Biosphäre im Rahmen der Konsequenzenanalyse. Sie bilden gemeinsam mit dem Nachweis des sicheren Einschlusses die Grundlage für das im vorliegenden FuE-Vorhaben verfolgte Konzept zum Langzeitsicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager in Salzformationen.

Darüber hinaus wurden die Nachweise zur Betriebssicherheit und zur Einhaltung der nicht radiologischen Schutzziele in der Nachbetriebsphase betrachtet.

Für die Gewährleistung der Betriebssicherheit liegt ein umfassendes kerntechnisches, strahlenschutzrechtliches und bergrechtliches Regelwerk vor, das es ermöglicht, durch geeignete technische und organisatorische Maßnahmen die Sicherheitsanforderungen umzusetzen. Seine erfolgreiche Anwendung wurde in einer Vielzahl übertägiger kerntechnischer Anlagen, bzw. im Salzbergbau demonstriert. Die Besonderheit eines HAW-Endlagers besteht darin, dass sowohl kerntechnische und strahlenschutzrechtliche Anforderungen als auch bergrechtliche Vorgaben zu erfüllen sind. Die meisten dabei auftretenden Fragestellungen wurden bereits im Zuge der Demonstrationsversuche zur direkten Endlagerung erfolgreich gelöst und ihre technische Realisierbarkeit nachgewiesen.

Die Nachweise zu den nicht radiologischen Schutzzielen betreffen den Schutz der Tagesoberfläche und den Grundwasserschutz vor chemisch-toxischen Stoffen. Die Untersuchungen zum Schutz der Tagesoberfläche haben gezeigt, dass einerseits die geeigneten Instrumentarien zur Bewertung langfristiger Veränderungen an der Tagesoberfläche in Folge von Hebungen und Senkungen zur Verfügung stehen und anderseits bei geeigneter Endlagerplanung keine unzulässigen Auswirkungen, wie z. B. Schiefstellungen von mehr als 1/300 in 100 Jahren, zu erwarten sind.

Hinsichtlich des Grundwasserschutzes vor chemisch-toxischen Stoffen wurde ein Konzept für den Langzeitsicherheitsnachweis erarbeitet und begründet, das der Überlegung folgt, dass grundsätzlich die gleichen Anforderungen gelten wie für Untertagedeponien besonders überwachungsbedürftiger Abfälle. Danach wird dem Besorgnisgrundsatz des Wasserhaushaltsgesetzes entsprochen, wenn der Nachweis des vollständigen (sicheren) Einschlusses für die planmäßige (ungestörte) Endlagerentwicklung erbracht werden kann.

6.2 Empfehlungen für weiterführende FuE-Arbeiten

Auf der Grundlage der durchgängigen Analyse der Umsetzbarkeit des hier erarbeiteten Nachweiskonzeptes zur Gewährleistung der Endlagersicherheit war es möglich noch bestehende Defizite, Lücken und Unsicherheiten zu ermitteln, die Gegenstand weiterführender Untersuchungen sein sollten.

Die sich daraus ergebenden Schwerpunkte für zukünftige FuE-Arbeiten und Untersuchungen zur HAW-Endlagerung im Salzgestein sind nachfolgend zusammengefasst.

Zum geologischen Modell des Referenzstandortes
Die untertägige Erkundung am Referenzstandort ist im Rahmen der Auffahrung von Einlagerungsbereichen entsprechend einem noch festzulegenden Einlagerungskonzept weiterzuführen. Im Falle einer Einlagerung in tiefen Bohrlöchern müsste die Salzstockerkundung in größere Tiefen ausgeweitet werden.

Neben dieser begleitenden Erkundung sollten die im Hauptsalz vorkommenden isolierten Kohlenwasserstoffvorkommen einer eingehenden Bewertung bezüglich ihrer Relevanz für die Langzeitsicherheitsanalyse unterzogen werden.

Weiterführende geochemische Arbeiten sind sinnvoll. Es sollten Isotopenuntersuchungen zur Altersdatierung von Kluftmineralen bzw. zur Genese von interkristallinen Lösungseinschlüssen vorgenommen werden.

Zur konzeptionellen Endlagerplanung
Die thermomechanische Endlagerauslegung beruht gegenwärtig auf einer Reihe von Idealisierungen bzw. Konservativitäten hinsichtlich der angewendeten Modelle und des Wärmeeintrags aus dem endzulagernden Inventar. Zur Ermittlung belastbarer Planungen sind realistische Modelle zugrunde zu legen und ggf. die Grubengebäudeplanung anzupassen.

Zum Nachweis der Integrität der geologischen Barriere
Das derzeit verwendete und allgemein akzeptierte Verfahren zum Nachweis der geomechanischen Integrität geologischer Barrieren beruht auf der Berechnung und Bewertung von Spannungszuständen als Indikator für die Beurteilung der hydraulischen Eigenschaften der Salzbarriere (z. B. hinsichtlich der Barrierendurchlässigkeit). Neuere Entwicklungen im Bereich gesteinsphysikalischer Laboruntersuchungen und von entsprechenden Materialmodellen (z. B. zur Dilatanz von Steinsalz und daraus abgeleiteter Kennwerte wie Porosität und Permeabilität) sowie im Bereich numerischer Methoden (z. B. Entwicklung eines hydromechanischen Rissmodells und Implementierung in einem Finite-Elemente-Programm zur Simulation der Entstehung und Aufweitung einzelner fluidgefüllter Risse) sollen zukünftig zu einer Verbesserung der Prognosemodelle, zu einer Konkretisierung der derzeit bestehenden Integritätskriterien und zu einer Präzisierung der Berechnung der hydromechanischen Eigenschaften und des langfristigen thermo-hydromechanischen Verhaltens der Salzbarriere führen.

Zum Integritätsnachweis der technischen Barrieren
Grundsätzlich lassen sich zwei Schwerpunkte für zukünftige FuE-Arbeiten ableiten.

- Einerseits ist ein besseres Verständnis der Salzgruskompaktion für Porositätsbereiche < 10 % erforderlich, um die Porositäts- und Permeabilitätsabnahme belastbarer zu prognostizieren und daraus die Anforderungen an die geotechnischen Verschlussbauwerk systematisch ableiten zu können.

- Andererseits bestehen bezüglich des ingenieurtechnischen Nachweises noch methodische Defizite im Hinblick auf den Nachweis der Zuverlässigkeit über längere Zeiträume, als die in der Baupraxis üblichen 100 Jahre sowie in Bezug auf die natürliche oder künstliche langzeitstabile Abdichtung der Auflockerungszone.

Zur FEP-Generierung und Szenarienentwicklung
Der vorgelegte Entwurf eines FEP-Kataloges sollte mit dem Ziel der besseren Transparenz und Nachvollziehbarkeit einem externen Review von kompetenten Experten unterzogen und entsprechend revidiert werden. Zur besseren Handhabbarkeit sollten die FEP-Beschreibungen in einer Datenbank abgelegt werden.

Die Arbeiten zur Szenarienentwicklung im FuE-Vorhaben ISIBEL führten noch nicht zu einer Festlegung der Methoden, mit denen aus vorliegenden FEP-Beschreibungen systematisch ein Set von Szenarien entwickelt werden kann, das die zukünftige Entwicklung des Endlagersystems hinsichtlich seiner sicherheitlichen Bewertung abdeckend beschreibt. Auf der Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse zu den Vor- und Nachteilen der Bottom-Up- und Top-Down-Ansätze sollte daher eine geeignete Methodik entwickelt und anhand des FEP-Katalogs getestet werden.

Zur Bewertung nicht auszuschließender Freisetzung
Die gegenwärtig für die Bewertung der radiologischen Konsequenzen aus nicht auszuschließenden Freisetzungsszenarien zur Verfügung stehenden Modelle und Programme beinhalten eine Reihe von Vereinfachungen. In Abhängigkeit von ihrer Relevanz für die Bewertung der Sicherheit des gesamten Endlagersystems ist daher zu prüfen, inwieweit einzelne Modelle und Programme zu verbessern sind.

Zu erwähnen sind hierbei insbesondere:

- Modelle zur Radionuklidmobilisierung aus den verschiedenen Arten ausgedienter Brennelemente und hochradioaktiver Abfälle, die zurzeit einen unterschiedlichen Erkenntnisstand wiederspiegeln,

- Gastransport- und Freisetzungsprozesse im Grubengebäude,

- die Strömungsvorgänge im Fall des Lösungszutritts in verschiedene Teile des Grubengebäudes einschließlich der Einlagerungshohlräume, die in der Regel mit kompaktierendem Salzgrus versetzt sind,

- die zeitliche Änderung des Strömungswiderstandes von Verschlussbauwerken im Fall ihres Versagens,

- die Konvergenz der mit Salzgrus versetzten Hohlräume des Grubengebäudes sowie

- eine realitätsnahe Widerspiegelung von Rückhalteprozessen, wie Matrixdiffussion und Sorption im Fernfeld.

Zum Nachweis der Betriebssicherheit
Hinsichtlich der Betriebssicherheit konzentrieren sich noch offene Fragestellungen und damit verbundener FuE-Bedarf auf:

- die Generierung von Ausfalldaten für probabilistische Sicherheitsanalysen für die entwickelten technischen Lösungen,
- die Bewertung des möglichen Zutritts von Lösungen und natürlichen Gasen,
- die radiologische Bewertung der Sedimentation von Aerosolpartikeln im Grubengebäude, sowie der Freisetzung von gasförmigen Radionukliden im Fall der mechanischen Zerstörung der Einlagerungsbehälter bei der Endlagerung im Bohrloch.

Methodik des Sicherheitsnachweises
Das Sicherheitskonzept der geologischen Endlagerung, insbesondere in Salzformationen, beruht auf dem langfristig sicheren Einschluss der endgelagerten Abfälle. Im Rahmen des FuE-Vorhabens ISIBEL wurde erstmals ein Sicherheitsnachweiskonzept entwickelt, das stringent dem methodischen Ansatz des sicheren Einschlusses folgt. Nahezu parallel erfolgte bei der Neufassung der Sicherheitsanforderungen für ein HAW-Endlager in Deutschland ein Umdenken in Richtung Nachweis der Isolation. Eine eindeutige und gleichzeitig realistische Definition des Isolationszustandes „*sicherer Einschluss*“ wurde bisher nicht vorgenommen.

Aufgrund der endlichen Dichtheit und der im Vergleich zum Nachweiszeitraum begrenzten Lebensdauer geotechnischer Barrieren sowie der relativ langsamen und nur mit erheblichen Unsicherheiten prognostizierbaren Kompaktion des Salzgrusversatzes in Strecken und Schächten bis zur Erreichung geringer, mit gewachsenem Steinsalz vergleichbarer Durchlässigkeiten ist eine Definition des Isolationszustandes „Sicherer Einschluss“ als langfristig dichter Einschluss nicht zielführend. Andererseits kann die gewünschte „*Nullemission*“ auch erreicht werden, wenn keine absolute Dichtheit aller Barrieren unterstellt wird.

Unter Berücksichtigung der tatsächlichen Gegebenheiten ist daher eine geeignete Definition für den sicheren Einschluss zu erarbeiten. Außerdem sind geeignete Indikatoren zu entwickeln sowie anhand von Beispielrechnungen zu testen.

Eine maßgebliche Rolle für das Vertrauen in einen Langzeitsicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager spielt die Bewertung unvermeidbarer Unsicherheiten und Ungewissheiten. Dabei ist zwischen Datenunsicherheiten, z. B. bezüglich der Radionuklidinventare, Löslichkeits- und Sorptionsdaten, Permeabilitäten und Gasbildungsraten etc. einerseits, sowie

Ungewissheiten bezüglich der verwendeten Modelle oder Szenarien andererseits zu unterscheiden.

Unter Berücksichtigung der internationalen Empfehlungen und Erfahrungen sollten Vorschläge zur Behandlung der ermittelten Unsicherheiten bzw. Ungewissheiten erarbeitet werden. Dabei ist auch zu prüfen, inwieweit bekannte Methoden anwendbar sind, wie z. B. das in der Ingenieurpraxis bewährte Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte, bei dem Unsicherheiten und Ungewissheiten durch Sicherheitszuschläge berücksichtigt werden.

Im Unterschied zu HAW-Endlagern im Ton und Granit wurde für HAW-Endlager im Salz international noch kein Safety Case vorgestellt. Insbesondere im FuE-Vorhaben ISIBEL wurde jedoch ein fortgeschrittenes Sicherheitsnachweiskonzept für ein HAW-Endlager erarbeitet, das gemeinsam mit den Ergebnissen der vorangehenden Arbeitspakete des vorliegenden FuE-Vorhabens eine wesentliche Grundlage eines Safety Case darstellen könnte. Darüber hinaus nimmt der Safety Case in der aktuellen Diskussion um die Weiterentwicklung der Sicherheitsanforderungen eine zentrale Stellung ein. Es ist daher nahe liegend, ausgehend von internationalen Erfahrungen und Empfehlungen, als nächsten Schritt das Konzept für einen Safety Case zu entwickeln.

7 Abbildungsverzeichnis

Seite

Abbildung 1-1: Methodik zur Führung des Sicherheitsnachweises 12

Abbildung 1-2: Grundzüge der Methodik zur Ermittlung des FuE-Bedarfs 13

Abbildung 1-3: Methodischer Ansatz zum radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis 17

Abbildung 1-4: Sicherheitskonzept „Sicherer Einschluss“ 18

Abbildung 1-5: Bearbeitungskonzept 19

Abbildung 2-1: Vereinfachter, schematischer Schnitt durch den Salzstock des Referenzstandortes [Bornemann 2004]. 29

Abbildung 2-2: Schema des Salzwassertransports aus der Gorlebener Rinne [Klinge 2004] 30

Abbildung 3-1: Brennstabkokille, links, (BSK), HAW-Kokille, Mitte, (CSD-V, entspricht auch CSD-B) und CSD-C, rechts 34

Abbildung 3-2: POLLUX-Behälter 34

Abbildung 3-3: CASTOR AVR/THTR, links, (entspricht im wesentlichen auch CASTOR KNK) und CASTOR MTR 2, rechts 35

Abbildung 3-4: Grubengebäude für gemeinsame Strecken- und Bohrlochlagerung 38

Abbildung 3-5: Zuschnitt des Grubengebäudes für die reine Bohrlochlagerung von BSK 3, HAW- und CDS-C-Kokillen 39

Abbildung 3-6: Erprobung der Transport- und Einlagerungstechnik für POLLUX-Behälter am Versuchsstand Peine 40

Abbildung 3-7: Komponenten des Einlagerungssystems zur Erprobung der Transport- und Einlagerungstechnik für BSK 3-Kokillen 41

Abbildung 5-1: Visualisierung des Dilatanzkriteriums, dilatante Bereiche in der Barriere infolge bergmännischer Eingriffe 53

Abbildung 5-2: Visualisierung des Laugendruckkriteriums, Einwirkung von Laugendruck auf die geologische Barriere 54

Abbildung 5-3: Zusammenhang zwischen Langzeitsicherheitsanalyse und dem ingenieurtechnischen Nachweis technischer Barrieren 56

Abbildung 5-4: Vorschlag für ein Schachtverschlusskonzept für Endlager im Salinar 57

Abbildung 5-5: Entwurf Streckenverschluss ERAM 58

Abbildung 5-6: Bohrlochverschluss aus Salzgrus 60

Abbildung 5-7: Grenzwerte für Verformungen bei Ausbildung einer Setzungsmulde 72

8 Tabellenverzeichnis

Seite

Tabelle 3-1:	Mengengerüst der hochradioaktiven wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle	36
Tabelle 5-1:	Geringfügigkeitsschwellenwerte für anorganische Parameter	75
Tabelle 5-2:	Geringfügigkeitsschwellenwerte für organische Parameter	76
Tabelle 5-3:	Massen chemotoxischer Stoffe je Abfallgebinde	78
Tabelle 5-4:	Chemotoxische Stoffe in Versatz- und Barrierematerialien	79

9 Literaturverzeichnis

[ABBergV 2005] Allgemeine Bundesbergverordnung (ABBergV) vom 23.10.1995 (BGBl. I S. 1466; zuletzt geändert durch Art. 1 der Verordnung vom 10.08.2005 (BGBl. I S. 2452)

[ABVO 1995] Allgemeine Bergverordnung über Untertagebetriebe, Tagebaue und Salinen (ABVO) vom 02.02.1966 (Nds. MBl. S. 337); zuletzt geändert durch Verordnung vom 23.10.1995 (BGBl. I S. 1466)

[ANSYS 1999] ANSYS: ANSYS Manuals, USA, 1999

[AtG 2005] Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz) vom 23. Dezember 1959 (BGBl. I S. 814) in der Fassung der Bekanntmachung vom 15.Juli.1985 (BGBl. I S. 1565) (BGBl. III S. 751-1), zuletzt geändert durch Art. 1 des Gesetzes vom 12.August 2005 (BGBl. I S. 2365)

[BAnz. 1977] Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke, BAnz. 1977, Nr. 206

[BAnz. 1983] Störfall-Leitlinien, BAnz. 1983, Nr. 245a

[BAnz. 2004] Grundlagen für Sicherheitsmanagementsysteme in Kernkraftwerken, BAnz. 2004, Nr. 138, S. 16275

[BbergG 2005] Bundes-Berggesetz (BBergG) vom 13.08.1980 (BGBl. I S. 1310); zuletzt geändert durch Art. 37 des Gesetzes vom 21.06.2005 (BGBl. I S. 1818)

[BGR 1988] BGR, Thermomechanische Berechnungen zum Endlager im Salzstock Gorleben (Berechnungsmodell 1988), Hannover, Mai 1988

[BMI 1983] Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk, Rdschr. D. BMI v. 20.4.1983 –RS – AGK 3 – 515 790/2 -

[BMU 2003] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Projektgruppe Nationaler Entsorgungsplan, RS III 2-13200/1, Arbeitsgrundlage Nationaler Entsorgungsplan für radioaktive Reststoffe, November 2003 (S. 50, 56, 105)

[BMU 2005] Bekanntmachung des Leitfadens zur Durchführung der „Sicherheitsüberprüfung gemäß § 19a des Atomgesetzes –Leitfaden Probabilistische Sicherheitsanalyse-„ für Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland BMU, 30. August 2005

[Bornemann 2004] Bornemann, O.; Behlau, J.; Keller, S.; Mingerzahn, G. & Schramm, M. (2004): Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben - Teil III: Ergebnisse der Erkundung des Salinars. Abschlussbericht zum AP G 412110000.-- BGR, unveröffentl. Ber.: 222 S., 29 Abb., 6 Tab., 4 Anl., 1 Anh.; Hannover.

[BVOS 2005] Bergverordnung für Schacht- und Schrägförderanlagen (BVOS) vom 13.07.2005 (GVBl. LSA S. 352)

[DBE 1996] Systemanalyse Endlagerkonzepte, Abschlussbericht – BMFT FE-Vorhaben FKZ 02E820, Hauptband, DEAB T59, DBE, 1996

[DIN 1995] DIN V ENV 1991-1, Eurocode 1, Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1: Grundlagen der Tragwerksplanung, Deutsche Fassung ENV 1991-1:1994, Dezember 1995

[DIN 2002] DIN EN 1990, Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Teil 1: Deutsche Fassung EN 1990: 2002, Oktober 2002

[ElBergV 2001] Bergverordnung für elektrische Anlagen (Elektro-Bergverordnung – ElBergV) vom 27.11.2001 (GVBl. LSA S476)

[Eurocode 2002] DIN EN 1990, Eurocode: Basis of structural design, Oktober 2002

[Filbert 1998] Filbert, W.; Engelmann, H.-J.: Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben; Abschlussbericht, Rev. 01, Peine, 1998, unveröffentlicht

[GRS 2002a] Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk - Überarbeitete Diskussionsgrundlage - GRS, Januar 2002, Auftrags-Nr.: 85471

[GRS 2002b] Präzisierung und Weiterentwicklung der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk - Entwurf -, GRS, 12.03.02

[GRS 2003] Baltes, B.; Kindt, A.; Röhlig, K.-J.: Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk - Vorschlag der GRS; Juli 2003, GRS-A-3110

[GRS 2005a] „Sicherheitsanforderungen für Kernkraftwerke: Grundlegende Sicherheitsanforderungen“, Revision A ENTWURF, GRS, PHB, Öko-Institut, September 2005, Auftrags-Nr.: 813071, SR 2475, Ergebnisse Team 1

[GRS 2005b] „Sicherheitsanforderungen für Kernkraftwerke: Bei Druck- und Siedewasserreaktoren zu berücksichtigende Ereignisse“, Revision A ENTWURF, GRS, PHB, Öko-Institut, September 2005, Auftrags-Nr.: 813071, SR 2475, Ergebnisse Team 3

[GrWV 1997] Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 80/68/EWG des Rates vom 17.12.1979 über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe (Grundwasserverordnung – GrWV) v. 18.03.1997 (BGBl. I S. 542)

[Heemann 2003] Heemann, U., Sarfeld, W., Faust, B., 3D-calculation of dilatancy and permeability. European Comission CLUSTER Conference on the Impact of EDZ on the Performance of Radioactive Waste Geological Repositories, Nov. 3 –5, 2003 Luxembourg

[Heusermann 2001] Heusermann, S. (2001): Beurteilung der geomechanischen Stabilität und Integrität von Endlagerbergwerken im Salzgebirge auf der Grundlage geologischer und ingenieurgeologischer Untersuchungen. Geologische Beiträge Hannover, 2, 159-174.

[IAEA 1994] Convention on Nuclear Safety, IAEA, INFIRC/449, 5 July 1994

[IAEA 1997] JOINT CONVENTION ON THE SAFETY OF SPENT FUEL MANAGEMENT AND ON THE SAFETY OF RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT, IAEA, INFIRC/546, 24 December 1997

[ISIBEL 2007a] Abschlussbericht für das Vorhaben „Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitstechnische Bewertung von Endlagern für HAW“ ISIBEL, AP 1.2 Konzeptionelle Endlagerplanung, 14. Juni 2007 (Entwurf)

[ISIBEL 2007b] Abschlussbericht für das Vorhaben „Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitstechnische Bewertung von Endlagern für HAW“ ISIBEL, AP 5 Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren (in Bearbeitung)

[ITASCA 1997] Itasca Consultants: FLAC Handbücher, Minnesota, USA, 1997

[KlimaBergV 1983] Bergverordnung zum Schutz der Gesundheit gegen Klimaeinwirkungen (Klima-Bergverordnung – KlimaBergV) vom 09.06.1983 (BGBl. I S. 685)

[Klinge 2004] KLINGE, H., BOEHME, J., GRISSEMANN, C., HOUBEN, G., LUDWIG, R. R., SCHELKES, K. & SCHILDKNECHT, F. (2004): Projekt Gorleben, Standortbeschreibung, Teil II: Deckgebirge Hydrogeologie. Abschlussbericht zum Arbeits-paket 9G3411800000, BGR, unveröffentl. Ber.: 295 S., 95 Abb., 18 Tab., 12 Anh.; Hannover.

[KWA 1984] Systemstudie Andere Entsorgungstechniken, Kurzfassung, KWA Nr. 2190/1, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, De-zember 1984

[KWA 1989] Systemanalyse Mischkonzept, Abschlussbericht Hauptband, KWA Nr. 2190A1, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, 1989

[LAWA 2004] Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser, Düsseldorf, Dezember 2004

[Leitfaden 2005] Sicherheitsüberprüfung gemäß § 19a des Atomgesetzes - Leitfaden Probabilistische Sicherheitsanalyse -, 31. Januar 2005

[NEA 2000] Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste, An International Database 2000

[RSK/SSK 2002] Gemeinsame Stellungnahme der RSK und der SSK betreffend BMU-Fragen zur Fortschreibung der Endlager-Sicherheitskriterien, 5./6.12.2002

[RSK 1996] RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren, Ursprungsfassung, 3. Ausgabe vom 14.10.1981 mit Änderungen vom 15.11.1996

[RSK 2005] RSK-EMPFEHLUNG, GESTAFFELTES SICHERHEITSKONZEPT, 08.09.2005 (386. Sitzung)

[Schneider 1994] Schneider, K.-J., Bautabellen für Ingenieure mit europäischen und nationalen Vorschriften, Werner Verlag, 11. Auflage 1994

[Sitz 2001] Sitz, P.:Langzeitstabile Verschlussbauwerke in Strecken und Schächten, Bergbaukolloquium Freiberg, Bergbau 11/2001

[StrlSchV 2005] Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlung (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV) vom 20.Juli 2001 (BGBl. I S. 1714, ber. 2002 I S. 1459) (BGBl. III 751-1-8), zuletzt geändert durch Art. 2 §3 des Gesetzes vom 1. September 2005 (BGBl. I S. 2618, 2658)

[UVP 1990] Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben (UVP-V Bergbau) vom 13. Juli 1990

[WHG 2005] Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz – WHG) v. 19.08.2002 (BGBl. I S. 3245) zuletzt geändert durch Gesetz v. 25.06.2005 (BGBl. I S. 1746)

[Zirngast 2003] ZIRNGAST, M., ZWIRNER, R., BORNEMANN, O., FLEIG, S., HOFFMANN, N., KÖTHE, A., KRULL, P. & WEISS, W. (2003): Projekt Gorleben. Schichtenfolge und Strukturbau des Deck- u. Nebengebirges. Abschlussbericht, BGR, unveröffentl. Ber.: 570 S., 42 Abb., 32 Tab., 195 Anl., 1 Anh.; Hannover.