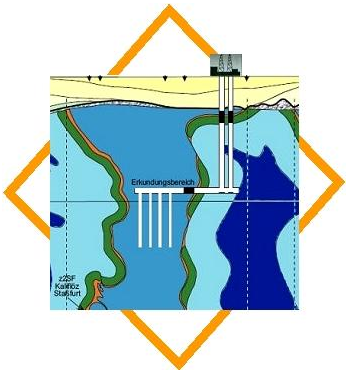

Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW

ISIBEL

Behandlung von Ungewissheiten im Langzeitsicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager im Salzgestein

GRS BGR DBETEC

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

ISIBEL

Behandlung von Ungewissheiten im Langzeitsicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager im Salzgestein

Dokumentkennzeichen XXX-XXX

Rev.	Datum	eigene Nr.	Grund / Beschreibung

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

127 Seiten

Stand April 2010

D. Buhmann
J. Mönig
J. Wolf

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH

S. Keller
S. Mrugalla
J. R. Weber

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

J. Krone
A. Lommerzheim

DBE TECHNOLOGY GmbH

Vorwort

Im Rahmen des Projektes ISIBEL wurde ein Sicherheits- und Nachweiskonzept für die sicherheitliche Bewertung von Endlagern für hochradioaktive Abfälle in der Wirtsformation Salzgestein entwickelt. Dabei wurde untersucht, inwieweit das Instrumentarium für die Bewertung der Betriebs- und Nachbetriebsphase eines solchen Endlagers vorhanden, bzw. ausreichend ist. Das Vorhaben wurde in zwei Projektphasen abgewickelt: Phase I im Zeitraum 01.10.2005 bis 31.12.2007 und Phase II im Zeitraum 01.01.2008 bis 31.03.2010. Die Ergebnisse beider Phasen wurden jeweils zu deren Abschluss in einer Reihe von Berichten veröffentlicht, die nachfolgend aufgeführt sind.

Berichte der Phase I

Zusammenfassender Bericht Phase I

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 zu den verschiedenen Arbeitspaketen

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. Gemeinsamer Bericht von DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS. Peine, Hannover, Braunschweig, April 2008.

Berichte der Phase II

Zusammenfassender Abschlussbericht für die Phasen I und II

Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. Gemeinsamer Abschlussbericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig, April 2010.

Einzelberichte zu den verschiedenen Arbeitspaketen der Phase II

10. FEP-Katalog für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz. Revision 01. Gemeinsamer Bericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig,, April 2010,

11. Erläuterungen zur Revision des FEP-Kataloges. Gemeinsamer Bericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig,, April 2010.

12. Entwicklung und Test einer Methodik zur Ableitung eines Referenzszenarios. Gemeinsamer Bericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig, April 2010.

13. Nachweis und Bewertung des Isolationszustandes „Sicherer Einschluss“. Gemeinsamer Bericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig, April 2010.

14. Behandlung von Ungewissheiten im Langzeitsicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager in Salzgesteinen. Gemeinsamer Bericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig, April 2010.

15. Vorgehensweise bei einem Safety-Case-Konzept für ein HAW-Endlager im Salinar. Gemeinsamer Bericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig, April 2010

Die dieser Studie zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages von der BGR sowie, vertreten durch das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Projektträger Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE), unter den Förderkennzeichen 02E10055 und 02E10065 von der GRS mbH bzw. DBE TECHNOLOGY GmbH durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 13

2 Klassifizierung von Ungewissheiten ... 15

2.1 Klassifizierung nach erkenntnistheoretischem Typ ... 16

2.2 Klassifizierung nach Art der Quelle der Ungewissheiten ... 16

2.2.1 Daten- und Parameterungewissheiten ... 17

2.2.2 Modellungewissheiten ... 19

2.2.3 Szenarienungewissheiten ... 20

3 Ungewissheiten bei den Komponenten des Nachweiskonzeptes ... 22

4 Vermeidung und Reduzierung von Ungewissheiten ... 26

4.1 Standortauswahl ... 26

4.2 Endlagerauslegung ... 27

5 Szenarienanalyse ... 32

5.1 FEP-Katalog ... 33

5.2 Szenarienentwicklung ... 33

5.3 Relevanz der Szenarienanalyse für die Komponenten des Nachweiskonzeptes ... 35

5.4 Beurteilung des vorhandenen Instrumentariums ... 35

6 Identifizierung nicht zu vermeidender Ungewissheiten ... 37

6.1 Ungewissheiten im Integritätsnachweis für die geologische Barriere ... 39

6.1.1 Ungewissheiten im geologischen Standortmodell ... 40

6.1.2 Ungewissheiten weiterer Merkmale der geologischen Standortbeschreibung ... 42

6.2 Ungewissheiten im Bezug auf den Integritätsnachweis für die geotechnischen Barrieren ... 43

6.2.1 Systemkomponente: Strecken- und Schachtverschlüsse ... 44

6.2.2 Systemkomponente: Abfallgebinde ... 50

6.2.3 Systemkomponente: Grubenbaue ... 55

6.3 Ungewissheiten im Bezug auf die Bewertung von Freisetzungsszenarien ... 61

6.4 Zusammenstellung relevanter Phänomene ... 65

7 Behandlung nicht zu vermeidender Ungewissheiten 73
7.1 Behandlung von Ungewissheiten im Integritätsnachweis für die geologische Barriere 73
7.1.1 Quantifizierung der räumlichen Ungewissheiten im geologischen Standortmodell 74
7.1.2 Berücksichtigung der räumlichen Ungewissheiten des geologischen Standortmodells im Sicherheitsnachweis 76
7.2 Behandlung von Ungewissheiten beim Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren 77
7.3 Behandlung von Ungewissheiten bei der Bewertung von Freisetzungsszenarien 84
7.3.1 Modellvalidierung 85
7.3.2 Analyse der Parameterungewissheiten 86
7.3.3 Sensitivitätsanalyse 90

8 Überprüfung des vorhandenen Instrumentariums 93
8.1 Überprüfung des Instrumentariums für die Behandlung von Ungewissheiten im Integritätsnachweis für die geologische Barriere 93
8.2 Überprüfung des Instrumentariums für die Behandlung von Ungewissheiten beim Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren 94
8.2.1 Beispiel eines generischen Streckenverschlusses im Salinar 94
8.2.2 Schlussfolgerungen 106
8.3 Überprüfung des Instrumentariums für die Behandlung von Ungewissheiten bei der Bewertung von Freisetzungsszenarien 108

9 Zusammenfassung 116

10 Literatur 120

1 Einleitung

Bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen sind auf Grund der hohen Anforderungen an die Sicherheit und wegen der langen zu betrachtenden Zeitskalen beim Umgang mit den benötigten und verwendeten Informationen einige Besonderheiten zu betrachten.

Informationen über einen Standort eines Endlagers liegen immer nur begrenzt vor. Darauf aufbauende Modelle zur Beschreibung des Endlagersystems und seiner zeitlichen Entwicklung können daher nur eine endliche Genauigkeit bei der Abbildung des Gesamtsystems erreichen. Diese endliche Genauigkeit verursacht Ungewissheiten, deren Behandlung eine maßgebliche Rolle für das Vertrauen in einen Langzeitsicherheitsnachweis bzw. in die Abfassung eines Safety Case für ein HAW-Endlager spielt (IAEA 2006, NEA 2004). Gemäß den internationalen Empfehlungen wird ein Safety Case schrittweise entwickelt und mit fortschreitender Entwicklung ausführlicher. Die Beschreibung und Bewertung der bestehenden Ungewissheiten bezüglich des Kenntnisstandes über das Endlagersystem sind für jede Fassung eines Safety Case zu integrieren.

Auswertungen der Berichte von internationalen Projekten und Arbeitsgruppen, z.B. GALSON & KHURSHEED 2007, VIGFUSSON ET AL. 2007 und NEA 2008, zeigen, dass in der Regel keine detaillierten regulatorischen Vorgaben existieren, wie mit Ungewissheiten in einem Langzeitsicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager umzugehen ist. Die Behandlung von Ungewissheiten stellt aber aus Sicht der Aufsichts- und Genehmigungsbehörden einen zentralen Punkt in der Abfassung eines solchen Nachweises dar. So wurde im finnischen Endlagerprogramm von regulatorischer Seite bei der Begutachtung der aktuellen Fassung des Safety Case eine detaillierte quantitative Behandlung der Ungewissheiten gefordert (POSIVA OY 2008).

Zur Entwicklung einer entsprechenden Vorgehensweise für die Behandlung von Ungewissheiten für den Langzeitsicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager im Salinar werden zunächst die internationalen Empfehlungen und Erfahrungen beim Umgang mit Ungewissheiten ausgewertet. Berücksichtigt wurden dabei insbesondere nationale Endlagerprogramme für HAW, zu denen bereits ausführliche Dokumentationen eines Antragstellers vorliegen:

- SAFIR 2 in Belgien (ONDRAF/NIRAS 2001),
- Olkiluoto in Finnland (POSIVA OY 2008, VIETO ET IKONEN 2005),
- Dossier Argile in Frankreich (ANDRA 2005),
- H12 in Japan (JNC 2000),
- SR-Can in Schweden (SKB 2006A, 2006B),

- Projekt Opalinus Ton in der Schweiz (NAGRA 2002A, 2002B, 2002C) und das
- Yucca Mountain Projekt in den USA (DOE 2002).

Neben diesen nationalen Programmen für Endlager für HAW wird noch das bereits laufende Projekt WIPP (Waste Isolation Pilot Plant) berücksichtigt, auch wenn es sich nicht um ein HAW-Endlager handelt. Das WIPP ist dafür ein Endlager im Salinar und es existiert eine detaillierte regulatorische Vorgabe, wie mit Ungewissheiten umgegangen werden soll (EPA 1996).

In Kapitel 2 werden zunächst einige international übliche Klassifizierungen für Ungewissheiten vorgestellt. Diese werden anschließend mit dem im Rahmen des FuE-Vorhabens ISIBEL entwickelten Sicherheits- und Nachweiskonzept (BUHMANN ET AL. 2008A) in Beziehung gesetzt (Kapitel 3).

Die allgemeine, international anerkannte Strategie zum Umgang mit Ungewissheiten lässt sich in den folgenden Schritten zusammenfassen (VIGFUSSON ET AL. 2007):

1. Identifizieren
2. Beurteilen und Quantifizieren
3. Reduzieren und Vermeiden

Diese Vorgehensweise ist dabei als iterativer Prozess zu verstehen, der bei jeder neuen Fassung eines Safety Case wiederholt werden muss. Dabei werden nicht alle Ungewissheiten zu reduzieren oder zu vermeiden sein. Die Behandlung von Ungewissheiten muss dann letztendlich mit einer

4. Bewertung der Berücksichtigung (Behandlung) der nicht vermeidbaren Ungewissheiten in der Nachweisführung

abgeschlossen werden.

In einem frühen Stadium eines Safety Case gilt es vor allem, die Erkundung und Auswahl eines Standortes sowie die Auslegung des Endlagers zu steuern. Dieser frühen Phase kommt eine große Bedeutung bei der Behandlung von Ungewissheiten zu, liefern doch sowohl die Erkundung und Auswahl eines Standortes als auch die anschließende Auslegung des Endlagers an diesem Standort sehr viele Möglichkeiten, im Vorfeld erkannte Ungewissheiten zu reduzieren und zum Teil sogar zu eliminieren (Kapitel 4).

In der frühen Phase eines Safety Case sind Planungsungewissheiten eine bedeutende Quelle von Ungewissheiten. Sie treten dadurch auf, dass z.B. wichtige Entscheidungen hinsichtlich des Endlagerkonzeptes noch nicht getroffen worden sind (z.B. Behälterkonzept). Im Laufe eines Verfahrens werden diese Ungewissheiten allerdings eliminiert

und spielen letztendlich bei der Bewertung der Sicherheit des Endlagers keine Rolle mehr. Sie werden daher in diesem Bericht nicht weiter behandelt.

Ein wesentlicher Bestandteil des Nachweiskonzeptes, der bei der Behandlung von Ungewissheiten eine große Rolle spielt, ist die Szenarienanalyse. Sie hat Einfluss auf alle anderen Komponenten des Nachweiskonzeptes und wird deshalb gesondert behandelt (Kapitel 5).

Auf der Grundlage des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes werden in Kapitel 6 die verschiedenen Arten von nicht vermeidbaren Ungewissheiten identifiziert und hinsichtlich ihrer Relevanz für diese Konzepte beurteilt. Die identifizierten Ungewissheiten betreffen einerseits die Nachweise der Integrität der einschlusswirksamen geologischen und geotechnischen Barrieren und andererseits die Szenarienanalyse und die Ermittlung und Bewertung nicht auszuschließender Freisetzungsszenarien.

Unter Berücksichtigung der internationalen Empfehlungen und Erfahrungen werden Vorschläge zur Behandlung der ermittelten nicht vermeidbaren Ungewissheiten erarbeitet (Kapitel 7). Dabei werden neben den Methoden der klassischen Monte-Carlo-Analyse auch Konzepte, die sich in der Ingenieurpraxis bewährt haben, berücksichtigt.

Letztlich werden das in Kapitel 7 diskutierte Instrumentarium für die Behandlung von Ungewissheiten analysiert und noch bestehende Defizite ausgewiesen (Kapitel 8).

2 Klassifizierung von Ungewissheiten

Da der Begriff „Ungewissheit“ im Deutschen sehr vielfältig eingesetzt und dabei unterschiedlich ausgelegt wird, ist es zunächst notwendig, den Begriff im Kontext dieses Berichtes zu definieren.

Der Begriff Ungewissheit wird hier im Zusammenhang mit Informationslagen verwendet, in denen die Eigenschaften oder Zustände von (Umwelt-)Systemen nur mit endlicher Genauigkeit bekannt sind oder nicht exakt vorhergesagt werden können. Er bezeichnet diejenigen Teile der Eigenschaften oder Zustände, die nicht bekannt oder nicht vorhersagbar sind.

Die im Rahmen dieses Berichtes behandelten Ungewissheiten stammen aus unterschiedlichen Fachgebieten mit den dort verwendeten Informationen, so dass der Begriff bewusst sehr allgemein gehalten wird. Auf den Begriff „Unsicherheit“, der teilweise synonym mit dem Begriff „Ungewissheit“ verwendet wird, wird in diesem Bericht verzichtet, da er mit der Unsicherheit im Sinne einer möglichen Gefährdung verwechselt werden kann. (Im Englischen ist solch eine Verwechslung nicht möglich, da mit „uncertainty“ und „unsafety“ zwei Begriffe zur Verfügung stehen, um diese Sachverhal-

te zu unterscheiden.) Bei dem Begriff der Unsicherheitsanalyse (engl. uncertainty analysis) handelt es sich um einen im Deutschen feststehenden Fachterminus, der eine quantitative numerische Methode beschreibt. In diesem Bericht wird dafür der Begriff „Analyse der Ungewissheiten“ verwendet.

2.1 Klassifizierung nach erkenntnistheoretischem Typ

Eine mögliche Klassifizierung von Ungewissheiten ist eine Unterscheidung nach dem erkenntnistheoretischen Typ der Ungewissheit: Sind die Ungewissheiten auf natürlich zufällige bzw. äußerst variable Eigenschaften, Ereignisse oder Prozesse zurückzuführen oder auf fehlendes Wissen bzw. fehlende Beschreibungsmöglichkeiten des natürlichen Systems? Die erste Art der Ungewissheiten wird in der Literatur als aleatorisch oder stochastisch bezeichnet, international wird auch der Begriff Typ A verwendet (IAEA 1989). Die zweite Art bezeichnet man als epistemische oder gelegentlich auch als subjektive Ungewissheiten (Typ B).

Diese Art der Unterscheidung spielt bei der Behandlung von Ungewissheiten dahingehend eine Rolle, dass epistemische Ungewissheiten prinzipiell durch zusätzliche Untersuchungen reduziert werden können, wohingegen das bei aleatorischen Ungewissheiten nicht möglich ist. Allerdings ist eine solche Unterscheidung je nach Fragestellung und Wissensstand Änderungen unterworfen, da viele als aleatorisch angesehene Prozesse und Ereignisse theoretisch auf epistemische Ungewissheiten zurückgeführt werden können. So ist das Würfeln ein stochastischer Prozess, da es durch zu viele (teilweise sich chaotisch verhaltende) Einflussgrößen beeinflusst wird. Nach heutigem Stand der Wissenschaft ist das Ergebnis nicht zu prognostizieren, theoretisch ausgeschlossen ist eine exakte Vorhersage aber nicht. Im Langzeitsicherheitsnachweis sind es vor allem Klimaphänomene und das Eintreten bestimmter geologischer Ereignisse, die mit aleatorischen Ungewissheiten behaftet sind.

2.2 Klassifizierung nach Art der Quelle der Ungewissheiten

International am weitesten verbreitet ist eine Klassifizierung, die Ungewissheiten dahingehend unterscheidet, auf welche Quelle sie sich beziehen (GALSON & KHURSHEED 2007, NEA 2008). Man unterscheidet zwischen

1. Daten- und Parameterungewissheiten: Ungewissheiten bezüglich vorhandener „natürlicher“ Informationen (Zustand des natürlichen Systems)

2. Modellungewissheiten: Ungewissheiten in der Beschreibung der ablaufenden Prozesse eines natürlichen Systems und deren Umsetzung in ein mathematisches oder numerisches Modell

3. Szenarienungewissheiten: Ungewissheiten über die zukünftige Entwicklung des Systems, insbesondere über das Auftreten episodischer und periodischer Ereignisse

Neben dieser Einteilung werden noch weitere ähnliche Einteilungen verwendet, die etwas von diesem Schema abweichen, z.B. verwendet (SKB 2006A) neben Datenungewissheiten und konzeptionellen Ungewissheiten noch den Begriff „Systemungewissheiten“. Die konzeptionellen Ungewissheiten gehen dabei in den Modellungewissheiten auf, die Systemungewissheiten beschreiben die Ungewissheiten hinsichtlich der Vollständigkeit der betrachteten Prozesse in den Modellen (und Szenarien). Die Beschreibung der Systemungewissheiten spielt eine sehr wichtige Rolle in einem Langzeitsicherheitsnachweis und betrifft sowohl Daten und Prozesse in Modellen als auch Prognosen zukünftiger Entwicklungen. Der Begriff der Systemungewissheiten eignet sich deshalb nicht für eine Klassifizierung von Ungewissheiten.

In internationalen Projekten und Berichten, die den Schwerpunkt auf die quantitative Sicherheitsbewertung eines Endlagersystems legen, wird häufig statt der Klasse „Datenungewissheiten“ die Klasse Parameterungewissheiten (engl. parameter uncertainty) geführt (GALSON & KHURSHEED 2007). Da dieser Bericht versucht, möglichst vollständig alle Ungewissheiten im Langzeitsicherheitsnachweis zu berücksichtigen, wird an dieser Stelle aber zwischen den Begriffen „Daten“ und „Parametern“ wie folgt unterschieden:

- Daten bezeichnen jegliche Art von gesammelter und gespeicherter Information
- Parameter sind Platzhalter in einer mathematischen Formel oder deren numerischer Umsetzung, die im Gegensatz zu anderen Variablen der Gleichung für den untersuchten Fall festgelegt (aber nicht unbedingt konstant) sind.

Es ist zu beachten, dass Parameterungewissheiten sowohl mit den Modellungewissheiten eng verknüpft sind aber auch sehr stark von den Ungewissheiten in den zugrundeliegenden Daten abhängen. Im Sinne einer überschaubaren Klassifizierung, die auch mit dem internationalen Sprachgebrauch vergleichbar ist, werden in diesem Bericht Parameterungewissheiten meist zusammen mit den Datenungewissheiten behandelt.

International ist die Gliederung der Ungewissheiten nach Art der Quelle der Ungewissheiten die üblichen Einteilung, auch wenn dieser Ansatz des Öfteren als nicht ausreichende Klassifizierung kritisiert wird (RÖHLIG 1998).

2.2.1 Daten- und Parameterungewissheiten

Die Datengrundlage für einen Endlagerstandort kann immer nur in einem begrenzten Rahmen geschaffen werden. Der Hauptgrund ist die große zeitliche und räumliche Va-

riabilität der meisten zu erhebenden Daten, die ein originalgetreues Abbild des Standortes erschwert. Dies gilt insbesondere für Daten, die mit erheblichem Aufwand in großen Tiefen gewonnen werden müssen. Für alle erhobenen Daten ist zu prüfen, welche weiteren Faktoren die Messungen beeinflusst haben, z.B. Auflösungsgrenzen der Messverfahren oder systematische Fehler in der Messaparatur.

Neben diesen bei allen natürlichen Systemen auftretenden Schwierigkeiten, kommt bei einem Endlager erschwerend hinzu, dass direkte Erkundungsmethoden, z.B. Erkundungsbohrungen, einen negativen Einfluss auf seine Sicherheit haben können.

Die Informationslage bezüglich der Daten ist demnach zwangsläufig mit einigen Ungewissheiten behaftet. Auch wenn sie in der Regel epistemischer Natur sind, lassen sie sich auf Grund der natürlichen Heterogenität in der Regel nur in sehr begrenztem Umfang reduzieren. Die Behandlung von Datenungewissheiten im Rahmen des Sicherheitsnachweises ist allerdings relativ weit fortgeschritten. Einen sehr ausführlich dokumentierten Bericht zu erhobenen Daten und zur Behandlung der Ungewissheiten bietet (SKB 2006B). Dort werden zu allen erhobenen Daten die folgenden Fragen angesprochen:

- Gibt es Informationen zur Ungewissheit bezüglich der räumlichen Variabilität? Wie werden diese Informationen berücksichtigt?
- Gibt es Informationen zur Ungewissheit bezüglich der zeitlichen Variabilität? Wie werden diese Informationen berücksichtigt?
- Sind die Daten allgemeiner Natur oder am Endlagerstandort erhoben?
- Basieren die Daten auf Messungen im Gelände oder auf Laborexperimenten? Was ist über Messfehler bzw. Störeinflüsse bekannt? Werden sie berücksichtigt?
- Gibt es einen besten Schätzwert?
- Gibt es Korrelationen zu anderen erhobenen Daten?

Wie in Kapitel 2.1 dargelegt, werden in diesem Bericht Datenungewissheiten und Parameterungewissheiten zusammen behandelt. Bei der Behandlung von Parameterungewissheiten geht man der wichtigen Frage nach, wie aus den gemessenen Daten (effektive) Parameter für die Modelle abgeleitet werden. Folgende Fragen werden in SKB 2006B bezüglich Parameterungewissheiten gestellt:

- Beruhen die Parameterwerte auf gemessenen Daten (Gelände/Labor) oder sind sie ihrerseits Ergebnis von Modellrechnungen?
- Wie sind aus den gegebenen/gemessenen Daten die Parameterwerte ermittelt worden (Diskretisierung, effektive Parameter)? Welche Methoden werden eingesetzt? Sind Ungewissheiten in den Daten berücksichtigt worden?

Andere Organisationen haben ähnliche Berichte, z.B. NAGRA 2002B, oder planen eine solche Aufstellung von Daten und Parametern und der dazugehörigen Ungewissheiten (POSIVA OY 2008). Dies wird als eine wesentliche Komponente des Langzeitsicherheitsnachweises bei der Behandlung von Ungewissheiten gesehen.

2.2.2 Modellungewissheiten

Die Beschreibung der Modellungewissheiten ist vor allem für die beim Langzeitsicherheitsnachweis eingesetzten numerischen Modelle von Bedeutung. Bei Modellen, die nicht numerisch umgesetzt werden, sind Ungewissheiten in den Modellen verbal-argumentativ zu behandeln. Im Langzeitsicherheitsnachweis gilt dies insbesondere für das geologische Standortmodell (Kapitel 7.1). Eine verbal-argumentative Behandlung hat den Vorteil, gut vermittelbar zu sein. Dafür stellen entsprechende Begründungen in der Regel subjektive Entscheidungen in den Mittelpunkt.

Numerische Modelle zur Beschreibung eines Endlagersystems und seiner zeitlichen Entwicklung können die Prozesse, die an einem Standort ablaufen, nur mit einer begrenzten Genauigkeit abbilden. Modellungewissheiten ergeben sich

- bei der Erstellung des konzeptionellen Modells,
- bei der Umsetzung des konzeptionellen Modells in ein mathematisches Modell und
- letztlich bei der Erstellung eines numerischen Modells aus dem mathematischen Modell.

Beispielsweise wäre die mathematische Umsetzung der konzeptionellen Vorstellung einer gleichförmigen Strömung in einem porösen Medium mit Hilfe der Darcy-Gleichung möglich. Eine mögliche numerische Umsetzung wäre dann die Anwendung dieser Gleichung auf einem zweidimensionalen Finite-Differenzen-Raster. Es ist offensichtlich, dass die Ungewissheiten mit jedem Schritt größer werden.

Analog zu der Aufstellung der Daten und der entsprechenden Daten- und Parameterungewissheiten ist eine Identifizierung der Ungewissheiten auch für die im Langzeitsicherheitsnachweis eingesetzten Modelle und deren zugrundeliegende Konzepte notwendig. Auch hier existieren international bereits einige Veröffentlichungen (NAGRA 2002B, SKB 2008).

Die folgenden Fragen hinsichtlich der Modellungewissheiten sollten für jedes eingesetzte Modell beantwortet werden:

- Wie sieht das Modellkonzept aus? Welche grundlegenden Vereinfachungen sind gegenüber dem natürlichen System vorgenommen worden? Gibt es alternative Modellkonzepte?

- Welche Vereinfachungen sind bei der Umsetzung in das numerische Modell vorgenommen worden?
- Welche Informationen liegen zum numerischen Modell vor? Handelt es sich um qualifizierte Modelle?

Analog zu den Daten- und Parameterungewissheiten werden diese Fragen für die Modelle, die für einen Langzeitsicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager in Salzgestein benötigt werden, auch in diesem Bericht angesprochen (Kapiteln 6 und 7).

2.2.3 Szenarienungewissheiten

Die aus der eingeschränkten Prognostizierbarkeit erwachsende große Menge an möglichen Entwicklungen eines Endlagersystems macht es notwendig, auf Basis einer systematischen Analyse relevanter Einflussfaktoren eine begrenzte Anzahl schlüssiger, alternativer Zukunftsbilder zu entwerfen (Szenarienanalyse).

Die Szenarienanalyse hat sich bei der Behandlung von Ungewissheiten hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen von Endlagersystemen so etabliert, dass sie als fester Bestandteil des Langzeitsicherheitsnachweises aufgefasst wird (Kapitel 3). Die Ungewissheiten bezüglich der möglichen Entwicklung eines Endlagerstandortes werden dementsprechend als Szenarienungewissheiten bezeichnet. Szenarienungewissheiten sind Prognoseungewissheiten, die die Beschreibung der Entwicklung eines Endlagersystems betreffen. Der Begriff „Prognoseungewissheit“ wird in diesem Bericht als Oberbegriff für alle Ungewissheiten verwendet, die die Vorhersage eines Prozesses, Ereignisses oder eben eines Szenarios betreffen. Insofern wäre der Begriff eigentlich besser für eine Klassifizierung geeignet. Um aber näher am internationalen Sprachgebrauch zu bleiben, wird auch in diesem Bericht an dem Begriff Szenarienungewissheit festgehalten.

Die Ungewissheiten bezüglich der Entwicklung des Endlagersystems sind sehr unterschiedlich zu bewerten. Während z.B. die Vorhersage der Anpassung des Systems an die Auffahrung des Endlagers oder die Temperaturerhöhung im Wirtsgestein durch die eingebrachten Abfälle auf vielen physikalisch basierten gut abzuleitenden Annahmen und Modellen beruht, spielen mit zunehmendem Betrachtungszeitraum immer mehr klimatische und geologische Prozesse eine Rolle, deren Eintreten und Ausprägung wesentlich schwieriger vorherzusagen sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass viele dieser Prozesse mit aleatorischen Ungewissheiten behaftet sind, wie z.B. das Auftreten magmatischer oder tektonischer Ereignisse.

Andere Prozesse laufen sehr langsam ab und es ist daher schwer, diese Prozesse aus dem kleinen Beobachtungszeitraum, der dem Menschen zur Verfügung steht, in die Zukunft zu extrapolieren. Ein Beispiel ist die Prognose von Subrosionsraten. Trotzdem

sind es gerade die langsamen Prozesse des Endlagersystems, die für den Betrachtungszeitraum von einer Million Jahren vergleichbar geringe Ungewissheiten in ihrer Entwicklung beinhalten, da sie sich über die langen Zeiträume wesentlich robuster verhalten als anthropogen beeinflusste Prozesse.

Für die Bewertung der Ungewissheiten zukünftiger Entwicklungen sind folgende Fragen zu klären:

- Welche Merkmale des Endlagersystems sind zu betrachten?
- Welche Prozesse spielen eine Rolle? Wie laufen diese Prozesse ab?

Auf der Basis der identifizierten relevanten Merkmale und Prozesse des Endlagersystems sind folgende Fragen zu klären:

- Welche zukünftigen Ereignisse sind zu betrachten? Aufgrund welcher Informationen werden bestimmte Ereignisse nicht berücksichtigt?
- Ist das Auftreten zukünftiger Ereignisse zufällig oder handelt es sich um zyklisch auftretende Ereignisse?

Ein spezieller Fall ist die Berücksichtigung und Behandlung zukünftiger menschlicher Handlungen. Insbesondere ist dabei das menschliche Eindringen in ein Endlager von Interesse. Unter menschlichem Eindringen werden alle menschlichen Aktivitäten nach Verschluss des Endlagerbergwerks verstanden, die die Barrieren innerhalb des verfüllten und verschlossenen Grubengebäudes oder den einschlusswirksamen Gebirgsbereich unmittelbar schädigen (AKS 2008).

Von den menschlichen Handlungen, die zu einem Eindringen in das Endlager führen, sind nur solche zu berücksichtigen, die unbeabsichtigt erfolgen. Es gibt aber keine wissenschaftliche Grundlage für eine belastbare Prognose der menschlichen Gesellschaft, ihrer Handlungsweisen und ihrer technologischen Fähigkeiten über einen Zeitraum hinaus, der mehr als ein paar Generationen umfasst. Generell werden daher Verhaltensweisen der Gesellschaft und der Stand von Wissenschaft und Technik entsprechend der heutigen Situation in sogenannten stilisierten Szenarien dargestellt.

Die stilisierten Szenarien spielen eine wichtige Rolle beim Umgang mit den Ungewissheiten, die Entwicklungen betreffen, die kaum oder gar nicht zu prognostizieren sind. Solche Ungewissheiten sind nicht sinnvoll zu quantifizieren und zu bewerten. Durch den Einsatz stilisierter Szenarien wird aber auf nachvollziehbare Weise festgelegt, wie mit diesen Ungewissheiten umgegangen wird.

3 Ungewissheiten bei den Komponenten des Nachweiskonzeptes

Ungewissheiten sind an vielen Stellen bei der Vorbereitung und der Durchführung eines Langzeitsicherheitsnachweises zu berücksichtigen. In diesem Bericht geht es vor allem darum, die Behandlung von Ungewissheiten im Rahmen des im Projekt ISIBEL erarbeiteten Nachweiskonzeptes (BUHMANN ET AL. 2008A) zu betrachten. Deshalb sollen unter Berücksichtigung der beiden international diskutierten Klassifizierungsmöglichkeiten die Ungewissheiten den Komponenten des Nachweiskonzeptes zugeordnet werden (Abb. 3.1):

1. Nachweis des sicheren Einschlusses

   1a. Integritätsnachweis der geologischen Barriere

   1b. Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren

2. Szenarienanalyse

3. Bewertung nicht auszuschließender Freisetzungsszenarien

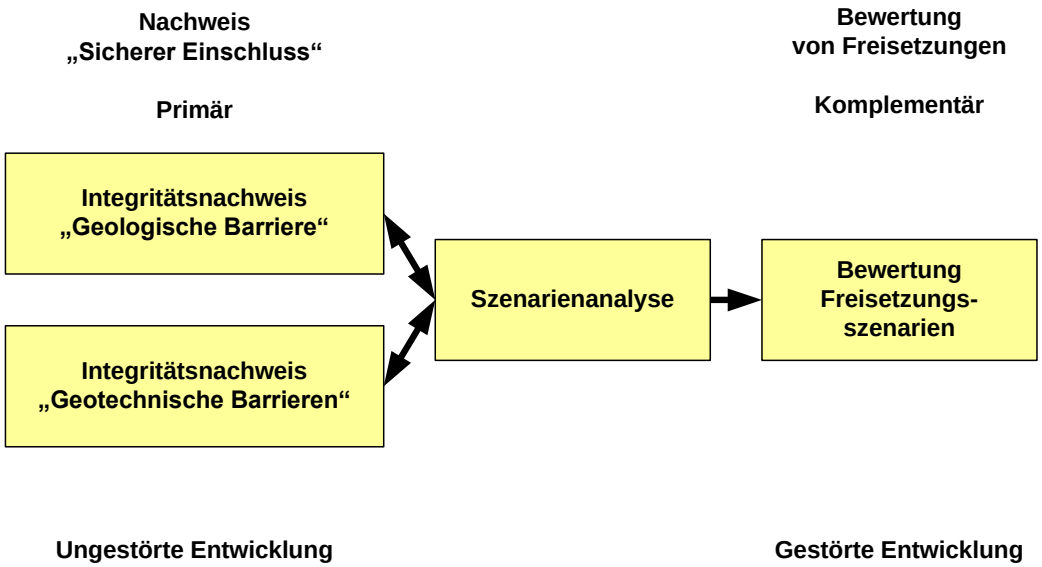

Abb. 3.1: Methodischer Ansatz zum radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis (BUHMANN ET AL. 2008A)

Im Mittelpunkt des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes steht der Nachweis des langfristig sicheren Einschlusses der endgelagerten Abfälle durch den Nachweis der Integrität der geotechnischen Barrieren und der geologischen Barriere (BUHMANN ET AL. 2008A).

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.

Die Szenarienanalyse ist aber nicht nur entscheidende Voraussetzung für die Bewertung von Freisetzungsszenarien. Sie beeinflusst auch die Integritätsnachweise der geologischen und geotechnischen Barriere. Darüberhinaus ist sie das entscheidende Werkzeug bei der Behandlung von Szenarienungewissheiten (Kapitel 2.2.3.). Diese Ungewissheiten lassen sich nur schwer quantifizieren. Der Umgang mit ihnen muss stattdessen durch ein plausibles und transparentes Verfahren dargelegt werden. Auf Grund dieser Sonderstellung der Szenarienungewissheiten und der Szenarienanalyse werden diese Aspekte in Kapitel 5 vor der Behandlung der übrigen Ungewissheiten dargestellt.

In Kapitel 6 werden die Komponenten des Nachweiskonzeptes genutzt, um die Identifizierung der nicht zu vermeidenden relevanten Ungewissheiten zu systematisieren und ihre Einordnung zu erleichtern. Neben den bereits gestellten Fragen zu Art und Herkunft der Ungewissheiten werden dabei folgende Fragen beantwortet

- Für welche Komponente des Nachweiskonzeptes spielt die behandelte Ungewissheit eine Rolle?
- Wird die Ungewissheit im FEP-Katalog (BUHMANN ET AL. 2008C) behandelt?
- Welche Auswirkungen hat die Ungewissheit auf die Sicherheitsaussage?

Insofern erfolgt in Kapitel 6 nicht nur eine Identifizierung, sondern auch eine erste Beurteilung der Ungewissheiten (Abb. 3.2).

Die Behandlung der Ungewissheiten wird in Kapitel 7 weitergeführt. Wiederum an Hand der Komponenten des Nachweiskonzeptes werden wichtige Methoden zur Behandlung von Ungewissheiten angesprochen (Abb. 3.2).

Der in Abb. 3.1 dargestellte methodische Ansatz zum Nachweis des sicheren Einschlusses als Kombination aus Integritätsnachweis der geologischen und geotechnischen Barriere geht davon aus, dass die Integrität der geotechnischen Barrieren erhalten bleibt bis der Versatz in den Strecken (Salzgrus) langsam durch die Konvergenz kompaktiert wird und langfristig die gleichen Barriereeigenschaften wie Steinsalz aufweist. Somit wird auch für die Zeiträume, die über die Lebensdauer der geotechnischen Barrieren hinausgehen, der sichere Einschluss gewährleistet. Hinsichtlich des langfristigen Kompaktionsverhaltens des Salzgruses bestehen in Bezug auf das Nachweiskonzept die größten Ungewissheiten. Daher sind diese Ungewissheiten beim Nachweis für den sicheren Einschluss in besonderem Maße zu berücksichtigen.

Bevor die nicht vermeidbaren Ungewissheiten in Kapitel 6 und 7 identifiziert bzw. behandelt werden, sollen zunächst die Ungewissheiten beschrieben werden, die bei der Erkundung und Auswahl eines Standortes sowie bei Auslegung des Endlagers zu vermeiden oder zumindest zu reduzieren sind.

		Integrität der geologischen Barriere	Integrität der geotechnischen Barrieren	Szenarienanalyse Bewertung Freisetzungsszenarien
Quelle	Klassifizierung	Behandlung	Behandlung	Behandlung
		Vermeidung und Reduzierung (Kapitel 4)		
Daten	Daten- und Parameter	Identifizierung und Beurteilung (Kapitel 6.1 und 6.4) Quantifizierung (Kapitel 7.1)	Identifizierung und Beurteilung (Kapitel 6.2 und 6.4) Quantifizierung (Kapitel 7.2)	Identifizierung und Beurteilung (Kapitel 6.3 und 6.4) Quantifizierung (Kapitel 7.3)
Modelle	Modell			
Szenarien	Szenarien	Szenarienanalyse (Kapitel 5)		
		Überprüfung des Instrumentariums (Kapitel 8.1)	Überprüfung des Instrumentariums (Kapitel 8.2)	Überprüfung des Instrumentariums (Kapitel 8.3)

Abb. 3.2: Klassifizierung und Behandlung von Ungewissheiten an Hand der Komponenten des Nachweiskonzeptes

4 Vermeidung und Reduzierung von Ungewissheiten

Die Vermeidung und Reduzierung von Ungewissheiten lässt sich hauptsächlich bei der Standortauswahl und der Auslegung des Endlagers realisieren. Daher kommt diesen beiden Aspekten des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes eine besondere Bedeutung zu.

4.1 Standortauswahl

Um die zukünftige Entwicklung des Endlagersystems zuverlässig voraussagen zu können, müssen die Randbedingungen, die Einfluss auf die ablaufenden Prozesse haben, bekannt sein. Zu diesen Randbedingungen gehören die geologischen Gegebenheiten des Standortes. Zu den geologischen Gegebenheiten des Standortes zählen die den Untergrund des Standortes aufbauenden Gesteinsschichten mit ihren Merkmalen wie der mineralogischen Zusammensetzung, der Porenraumstruktur, den mechanischen Eigenschaften oder der räumlichen Verteilung von Bereichen mit erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit. Ebenfalls zu den geologischen Gegebenheiten des Standortes gehören die hydrogeologischen Merkmale wie die vorliegenden hydraulischen Gradienten, die hydrochemischen Merkmale wie pH- und Eh-Werte und die geomechanischen Merkmale wie das Spannungsfeld. Schließlich ist den geologischen Gegebenheiten des Standortes die Konstanz der Merkmale über die Zeit bzw. die Neigung der Merkmale zu zeitlicher Veränderlichkeit zuzurechnen. Insgesamt gilt für alle vorgenannten Arten von geologischen Gegebenheiten, dass ihre jeweilige Ausprägung immer nur mit endlicher Genauigkeit angegeben werden kann.

Die standortspezifischen geologischen Gegebenheiten und die Genauigkeit, mit der bei einem bestimmten Erkundungsaufwand ihre jeweilige standortspezifische Ausprägung angegeben werden kann, ergeben sich mit der Auswahl des Standortes. Insofern wird das standortspezifische Ausmaß der Ungewissheiten in den Angaben zu den geologischen Gegebenheiten entscheidend durch die Standortauswahl beeinflusst.

Eine wichtige Rolle spielt dabei zunächst die Auswahl des Wirtsgesteins bzw. der Gesteinsschichten, die als geologische Barriere wirken sollen. Die Barrierewirksamkeit der Gesteine kann auf unterschiedlichen Gesteinseigenschaften beruhen, beispielsweise einer geringen hydraulischen Durchlässigkeit oder einem großen Sorptionsvermögen. Die Möglichkeiten, das Vorliegen solcher Gesteinseigenschaften über bestimmte räumliche Distanzen oder für bestimmte Zeiträume festzustellen bzw. zu prognostizieren, variieren für die verschiedenen als Wirtsgesteine betrachteten Gesteinsarten. Diesbezüglich weisen Salzgesteine Vorteile auf, da aufgrund ihrer Entstehungsgeschichte und ihren Eigenschaften die standortspezifisch vorliegenden Merkmale aus wenigen Aufschlüssen über große Distanzen zuverlässig extrapoliert werden können.

In gleicher Weise, wie durch die Auswahl des Wirtsgesteins die Ungewissheiten in der geologischen Standortbeschreibung bzw. der zur Erreichung einer bestimmen Zuverlässigkeit erforderliche Erkundungsaufwand beeinflusst werden, ist die Auswahl des konkreten Standortes von Bedeutung, da die Homogenität eines Gesteinskörpers nicht nur von der Gesteinsart, sondern beispielsweise auch von den am Standort vorliegenden tektonischen Gegebenheiten abhängt.

Schließlich spielt für die Bedeutung der Ungewissheiten in den Angaben zu den geologischen Gegebenheiten die Auslegung des Endlagers eine Rolle. Die Bedeutung der Ungewissheiten kann reduziert werden, indem für die Anlage von Grubenbauen diejenigen Gebirgsbereiche des Wirtsgesteinskörpers ausgewählt werden, die besonders einfach und zuverlässig charakterisiert werden können. Zu Bereichen, deren Charakterisierung mehr Aufwand erfordert, müssen große Abstände eingehalten werden.

4.2 Endlagerauslegung

Die Anforderungen an die Endlagerauslegung leiten sich unter Berücksichtigung der geologischen Gegebenheiten des betrachteten Standortes aus dem Sicherheitskonzept für das Endlager und, in einem iterativen Prozess, aus den Ergebnissen der Modellrechnungen zum Langzeitsicherheitsnachweis ab. Ziel ist es dabei auch, durch planerische und konstruktive Maßnahmen sicherheitsrelevante Auswirkungen von Ungewissheiten zu vermeiden oder wenigstens zu reduzieren. Im Folgenden werden exemplarisch verschiedene sicherheitsrelevante Ungewissheiten und ihre Berücksichtigung bei der Endlagerauslegung dargestellt.

Prognoseungewissheiten der zukünftigen geologischen Entwicklung

Viele Grundlagen der Auslegung des Grubengebäudes und der geotechnischen Barrieren leiten sich aus der geowissenschaftlichen Langzeitprognose ab. Die dort angegebenen Prognosen für die Entwicklung der Geosphäre und der Biosphäre sind bezüglich Zeitpunkt, Art und Umfang der Entwicklungen mit Ungewissheiten behaftet.

So kann z.B. eine Kaltzeit je nach Ausprägung (mit oder ohne Gletscherüberdeckung, Permafrost) zu tiefreichender Erosion und intensiver Subrosion führen. Während eines Permafrostes können im Salzgestein durch die Abkühlung Kontraktionsrisse entstehen. Insofern können diese Entwicklungen sowohl die Integrität der geologischen Barriere beeinträchtigen als auch die geotechnischen Barrieren in diesen Tiefenbeeinflussen.

Um zu verhindern, dass derartige Entwicklungen den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle beeinträchtigen, wird das Endlager in einer solchen Tiefe angeordnet, dass eine ausreichend mächtige geologische Barriere zwischen Abfällen und durch Subrosion betroffene Bereiche verbleibt.

Vom Grubengebäude können nur die oberen Teile der Schächte und die Schachtverschlüsse von derartigen Entwicklungen betroffen werden. Entsprechend dem Sicherheitskonzept basiert der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle – selbst zum frühestmöglichen Zeitpunkt einer zukünftigen Kaltzeit – nicht mehr auf der Funktion der Schachtverschlüsse, sondern auf dem praktisch vollständig durch kompaktierten Salzgrus verschlossenen Grubengebäude.

Ungewissheiten bezüglich der Geologie des Wirtsgesteins

Das geologische Standortmodell ist aus den Ergebnissen der geologischen Aufnahme im Grubengebäude und in Explorationsbohrungen sowie aus den Ergebnissen geophysikalischer Untersuchungen abgeleitet, wobei zwischen den Aufschlüssen auf der Grundlage von Erfahrungen in anderen ähnlichen Salzstrukturen und entsprechend Plausibilitätsbetrachtungen interpoliert wird. Hierdurch ergeben sich Ungewissheiten in Fragestellungen, die für die Langzeitentwicklung des Endlagers relevant sind, so z.B. bezüglich

- der Lage, Größe und Erstreckung von Anhydritschollen sowie der Volumina und des genauen Chemismus der in ihrer Umgebung auftretenden Lösungseinschlüsse,
- Ort, Volumina und Chemismus von Lösungseinschlüssen an der Grenze z2/z3 sowie
- das Auftreten und die Ausbildung (offen/geschlossen, fluidführend) von Klüften und Störungen in verschiedenen Salzgesteinen

Bei der Endlagerauslegung werden zum Umgang mit diesen Ungewissheiten Sicherheitsabstände des Grubengebäudes und insbesondere der Einlagerungsbereiche zu potentiell lösungsführenden Salinargesteinen vorgesehen. Bei der späteren Errichtung des Grubengebäudes wird die Einhaltung dieser Abstände durch eine vorlaufende Erkundung durch Bohrungen und geophysikalische Messungen sichergestellt. Angetroffene Klüfte und Störungen können bei Bedarf durch Zementinjektionen abgedichtet werden. Werden in Einlagerungsbohrlöchern Klüfte, Störungen oder Lösungseinschlüsse angetroffen, so wird das Bohrloch verfüllt und aufgegeben.

Die geotechnischen Barrieren werden mit Sicherheitszuschlag gegen den maximal zu erwartenden Fluiddruck ausgelegt und so angeordnet, dass sie die Einlagerungsbereiche von den potentiell wasserführenden Salinargesteinen abgrenzen. Im Infrastrukturbereich können Schotterbereiche eingerichtet werden, deren Hohlraumvolumina zum Auffangen des maximal zu erwartenden Lösungsvolumens ausreicht.

Ungewissheiten bezüglich der thermischen Einwirkung der radioaktiven Abfälle auf das Wirtsgestein

Die Einlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle führt zu einer Aufheizung des umgebenden Wirtsgesteins. Während die meisten Salzminerale erst bei deutlich über 200°C instabil werden, zersetzt sich Carnallitit unter den am Referenzstandort herrschenden Druckverhältnissen bereits bei Temperaturen ab 80°C und setzt dabei Kristallwasser frei (KERN & FRANKE 1980).

Für die Abfallgebinde wurde die Oberflächentemperatur auf 200°C begrenzt, um die Stabilität der Glasmatrix der Wiederaufarbeitungsabfälle sicherzustellen. Durch diese Temperaturbegrenzung ist gleichzeitig sichergestellt, dass außer beim Carnallitit kein Kristallwasser aus den anderen Salzmineralen freigesetzt werden kann.

Die Einlagerung von Abfallgebinden erfolgt im Hauptsalz, das aus Steinsalz besteht. Durch die Sicherheitsabstände zwischen den Einlagerungsbohrlöchern und den Carnallitit-Ablagerungen werden einerseits die Aufheizung dieser thermisch instabilen Minerale begrenzt und andererseits soll, falls es doch zur Freisetzung von Kristallwasser kommt, ein Zutritt der Lösungen zu den Einlagerungsbereichen ausgeschlossen werden. Bei den thermischen Auslegungsrechnungen werden einerseits ungünstige Wirtsgesteinsparameter und andererseits eine hohe Wärmefreisetzung zugrunde gelegt.

Ungewissheiten bezüglich unplanmäßiger Ereignisse in der Betriebsphase

Unplanmäßige Ereignisse in der Betriebsphase wie Schachtunfälle und Unfälle bei der Einlagerung in Strecken und Bohrlöchern sind zwar auf die Betriebsphase beschränkt, allerdings können Auswirkungen einen Einfluss auf die Nachbetriebsphase haben. Daher sieht die Endlagerplanung Vorsorgemaßnahmen vor, um die Eintrittswahrscheinlichkeit derartiger Ereignisse bzw. deren Auswirkungen zu minimieren. Diese Maßnahmen umfassen z.B. eine Auslegung der Schachtförderanlage mit Sicherheitszuschlägen sowie einer hochwertigen Bremsanlage (SELDA-Anlage) zur Begrenzung der Auswirkungen eines Förderkorbabsturzes, eine Auslegung der Transferbehälter unter Berücksichtigung wichtiger Störfallszenarien, Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Behälterfertigung, eine Auslegung gemäß kerntechnischen Anforderungen (KTA) aller Transport- und Handhabungsgeräte, Brandschutzmaßnahmen und betriebliche Regelungen für den Umgang mit betrieblichen Störungen (z.B. Kokillensticking und -absturz).

Ungewissheiten bezüglich der Gasbildung

Die Gasbildung kann neben der Konvergenz wesentlich den Fluiddruck im Endlagersystem während der Nachbetriebsphase bestimmen. Sie beruht vor allem auf der Korrosion der Endlagerbehälter in einem anaeroben Milieu und dem Verdampfen von Lösungen auf Grund der hohen Behältertemperaturen. Diese Prozesse hängen wesent-

lich von den zur Verfügung stehenden Feuchtigkeitsmengen ab. Bei einer ungestörten Standortentwicklung wird es sich in erster Linie um Versatzfeuchte sowie geringe Mengen aus Lösungseinschlüssen im Salzgestein handeln.

Um einen unerwünschten Druckaufbau in den Bohrlöchern durch Gasbildung zu vermeiden, werden die Bohrlochverschlüsse in der frühen Nachbetriebsphase eine erhöhte Gasdurchlässigkeit aufweisen, so dass das Gas abfließen kann.

Ungewissheiten bezüglich der Entwicklung des geochemischen Milieus und der Langzeitstabilität der Barrieren

Die auf dem Chemismus möglicherweise zutretender Lösungen basierende Entwicklung des geochemischen Milieus hängt von der Herkunft der Lösungen (Deckgebirgslösungen, Lösungseinschlüsse im Wirtsgestein), dem Zeitpunkt des Lösungszutritts (hydrogeologische Verhältnisse im Deckgebirge ändern sich in Abhängigkeit von klimatischen Verhältnissen (Kaltzeit)) und der Menge der zutretenden Lösungen (Aufsättigung der Lösungen) ab. In der geowissenschaftlichen Langzeitprognose ist die wahrscheinliche zukünftige Entwicklung abgeleitet, wobei vor allem quantitative Abschätzungen der Entwicklungen des Wasserchemismus mit Ungewissheiten behaftet sind.

Die Auslegung der geotechnischen Barrieren und die Auswahl geeigneter Baustoffrezepturen basiert auf der erwarteten Standortentwicklung und stellt für diese Rahmenbedingungen die Langzeitstabilität sicher. Ungewissheiten bezüglich der Langzeitentwicklung des geochemischen Milieus werden durch diversitäre Barrieren abdeckt, die für unterschiedliche geochemische Milieus auslegt werden können. Alternativ kann durch eine entsprechende Dimensionierung der Barrieren sichergestellt werden, dass eine Barriere auch bei ungünstigen geochemischen Verhältnissen über einen hinreichend langen Zeitraum ihre Funktion erfüllt, indem z.B. eine ausreichende Opferschicht vorgesehen ist.

Ungewissheiten bezüglich der Errichtung der Barrieren

Planungs- und Ausführungsfehler können zur Beeinträchtigung der Funktion von Schacht- und Streckenverschlüssen führen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit derartiger Beeinträchtigungen oder eines vorzeitigen Versagens kann dadurch minimiert werden, dass vor Beginn der Baumaßnahmen am Barrierenstandort die Auflockerungszone entfernt und eine umfassende geologische Aufnahme durchgeführt wird. Möglicherweise vorhandene Klüfte oder Störungen können durch Zementinjektionen abgedichtet werden.

Die Auslegung und der geforderte Standsicherheitsnachweis für die Barrieren basiert auf der Anwendung von Sicherheitsbeiwerten für die Einwirkungen, statistisch abgeleiteten Zahlenwerten für die Materialkennwerte, Vorkehrungen beim Qualitätsmanagement, Maßnahmen zur Reduzierung von Fehlerquellen im Entwurf, ein robustes Trag-

werk, die Anwendung qualifizierter Rechenverfahren und die Langzeitstabilität der verwendeten Baustoffe. Bei der Herstellung der Baustoffe und bei der Errichtung der Barrieren stellen Qualitätssicherungsmaßnahmen eine fehlerfreie Errichtung sicher. Die diversitär errichteten Barrieren sollen den sicheren Einschluss der Abfälle auch bei Versagen einer einzelnen Barriere gewährleisten.

Ungewissheiten bezüglich der Rissbildungen im Barrierenkörper

In Betonbarrieren können durch Volumenänderungen beim Abbinden des Baustoffs Zugspannungen auftreten, die zur Rissbildung führen können. Außerdem können später Risse im Betonkörper auftreten, wenn die Druckfestigkeit überschritten wird.

Die Rissbildung in Barrieren wird durch entsprechende Baustoffrezepturen sowie Einbringtechniken begrenzt. Außerdem wird die Größe der einzelnen Barrierenelemente begrenzt und diese durch Dehnungsfugen oder Sollbruchstellen getrennt. Die Barrierenelemente werden gegen den Gebirgsdruck sowie einen Fluiddruck ausgelegt.

Ungewissheiten bezüglich der Funktion von Bentonitdichtelementen

Bentonit wird in Schachtverschlüssen als Baumaterial für das Dichtelement eingesetzt. Die Barriereneigenschaften des Bentonits hängen einerseits stark von der raschen und gleichmäßigen Wiederaufsättigung des Bentonits mit Wasser und andererseits vom Chemismus der zutretenden Wässer ab, der sich im Verlauf der Standortentwicklung ändern kann. Bei ungleichmäßiger Aufsättigung des Bentonits können Strömungskanäle (Piping) entstehen, die die Funktion des Dichtelements beeinträchtigen. Der Chemismus der Wässer beeinflusst die Diffusivität und das Sorptionsvermögen des Bentonits.

Um die anforderungsgerechte Funktion von Bentonitdichtelementen zu gewährleisten, sind Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Herstellung und ihrem Einbau vorgesehen. Die rasche und gleichmäßige Aufsättigung des Bentonits mit Wasser wird durch die Verwendung hochkompaktierter, teilgesättigter Bentonitelemente sowie einen Einbau mit zusätzlicher Randverdichtung und Zonen mit verringerter Dichte oben und unten im Dichtelement sichergestellt. Als Baumaterial wird die Bentonit-Varietät ausgewählt, die im Bezug auf den für den Auslegungszeitraum der Barriere erwarteten Grundwasserchemismus die günstigsten Eigenschaften aufweist.

5 Szenarienanalyse

Die Szenarienanalyse ist das zentrale Werkzeug zur Behandlung von Ungewissheiten bei der Bewertung von möglichen Entwicklungen des Endlagersystems. Sie ist auch fester Bestandteil des Nachweiskonzeptes (Kapitel 3).

Grundlage der Szenarienanalyse ist die Zusammenstellung von Merkmalen, Ereignissen und Prozessen (features, events and processes, FEPs), die für das Endlagersystem von Bedeutung sein können. Keines der untersuchten Endlagerprogramme verzichtet auf dieses Werkzeug. Umfangreiche FEP-Zusammenstellungen liefern bereits (NAGRA 2002C, SKB 2006C). In der ersten Phase des Projektes ISIBEL wurden ebenfalls FEPs in einem FEP-Katalog zusammengestellt (BUHMANN ET AL. 2008C).

Die Szenarienanalyse hat entscheidenden Einfluss auf alle anderen Komponenten des Nachweiskonzeptes (Abbildung 3.1). Sie wird daher in diesem Bericht als Komponente des Nachweises gesehen und nicht bei den Methoden und Werkzeugen zur Behandlung nicht vermeidbarer Ungewissheiten beschrieben. Daher wird die Szenarienanalyse auf Grund ihrer Bedeutung vorab in diesem Kapitel behandelt, bevor in den nachfolgenden Kapiteln, die nicht zu vermeidenden Ungewissheiten identifiziert und Methoden zur Behandlung dieser Ungewissheiten bewertet werden.

Die Szenarienanalyse wird in der Regel in vier Schritten durchgeführt:

1. Zusammenstellung einer Universalliste von Eigenschaften, Prozessen und Ereignissen (FEPs), die an einem Endlagerstandort vorkommen, siehe z.B. den ISIBEL-FEP-Katalog (BUHMANN ET AL. 2008C)
2. Identifizierung relevanter FEPs zur Beschreibung möglicher Entwicklungen des Endlagersystems
3. Ableitung von Szenarien aus den relevanten FEPs
4. Zuweisung von Eintrittswahrscheinlichkeiten bzw. Zuordnung der Szenarien in verschiedene Klassen (z.B. „wahrscheinlich“, „wenig wahrscheinlich“ oder „nicht zu betrachten“)

Die Punkte 2, 3 und 4 werden im Folgenden unter dem Begriff „Szenarienentwicklung“ zusammengefasst.

Die entscheidenden Schritte der Szenarienanalyse sind die Erstellung eines Kataloges von Eigenschaften, Prozessen und Ereignissen (FEPs), die an einem Endlagerstandort vorkommen, und die Entwicklung von Szenarien aus diesen zusammengestellten FEPs.

5.1 FEP-Katalog

Mit der Zusammenstellung der FEPs im ISIBEL-FEP-Katalog werden mehrere wichtige Ziele verfolgt (BUHMANN ET AL. 2008C):

- Der Katalog stellt die Voraussetzung für die vorher genannte Szenarienentwicklung dar. Die Zusammenstellung von Szenarien, die bezüglich der Langzeitsicherheit untersucht und bewertet werden, erfolgt auf Basis der FEPs, die im FEP-Katalog zusammengestellt sind.
- Die Grundlagen der Modellierung der Systemabläufe im Rahmen des Sicherheitsnachweises sollen zusammenfassend dargestellt werden, d.h. eine Darstellung der wesentlichen Aspekte zu den Ereignissen und Prozessen, die in einem derartigen Endlagersystem ablaufen können,
- Der Katalog soll einen erheblichen Beitrag zur Transparenz und Nachvollziehbarkeit wichtiger Grundlagen des Nachweisverfahrens für die zuständigen Behörden und die interessierte Öffentlichkeit leisten. Er ist damit auch ein unerlässliches Werkzeug für die Vertrauensbildung in die Sicherheitsaussage.

Weitere Aspekte bei der Erstellung des ISIBEL-FEP-Katalogs sind in BUHMANN ET AL. 2008C beschrieben.

Es ist offensichtlich, dass der FEP-Katalog neben seiner Bedeutung für die Szenarienentwicklung auch bei der Identifizierung von Ungewissheiten eine große Rolle spielt. In Kapitel 6 wird daher der FEP-Katalog bei der Identifizierung von Ungewissheiten eingesetzt.

5.2 Szenarienentwicklung

Die Szenarienentwicklung beinhaltet die Identifizierung, ausführliche Beschreibung und Auswahl von möglichen Szenarien des Endlagersystems, die für eine verlässliche Beurteilung der Sicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle relevant sind (AKS 2008). Ziel der Szenarienentwicklung ist es, aus der Vielzahl der denkbaren Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems in der Nachbetriebsphase diejenigen auszuwählen, welche die wahrscheinlichen Entwicklungen und die Bandbreite der weniger wahrscheinlichen Entwicklungen repräsentieren (BRASSER ET AL. 2008).

Dafür werden zunächst aus dem FEP-Katalog diejenigen FEPs ausgewählt, die für die jeweilige Fragestellung als relevant angesehen werden. Je nach Standorteigenschaften und Endlagerkonzept lassen sich bestimmte FEPs ausschließen. Der Ausschluss einzelner FEPs muss begründet werden (FEP-Screening).

Anschließend werden die ausgewählten FEPs zu Szenarien zusammengefasst und der Ablauf der Szenarien untersucht. Für die Kombination der FEPs zu Szenarien werden international verschiedene Methoden angewendet, wobei sich derzeit noch keine einheitliche Methodik durchgesetzt hat (NEA 2001). Für die Ableitung von Szenarien aus den zusammengestellten FEPs wird im Projekt ISIBEL eine Vorgehensweise erarbeitet.

Die Szenarienentwicklung ist um einen zentralen Basisfall aufgebaut, das Referenzszenario. Die weiteren alternativen Szenarien werden vom Basisfall ausgehend durch die Berücksichtigung möglicher abweichender Entwicklungen gebildet.

Insgesamt führt eine derartige Vorgehensweise im Fall eines Endlagers im Steinsalz zu einer Reihe geotechnischer, hydrogeologischer, klimatischer und geologischer FEPs und aus diesen abgeleiteten Szenarien, deren relative Bedeutung für die Langzeitsicherheit sich im Verlauf der Nachbetriebsphase ändert. So dominieren zu Beginn wegen der großen Wärmeentwicklung der Abfälle und der daraus resultierenden mechanischen und hydraulischen Beanspruchung des Wirtsgesteins die FEPs, die durch geotechnische (z.B. die Versatzkompaktion) und hydraulische (z.B. die Wiederaufsättigung von Bentonit in Abdichtungen) Ereignisse oder Entwicklungen geprägt sind. Die Gruppe der Szenarien, die durch die klimatischen FEPs (z.B. Kaltzeiten mit Gletscherüberdeckung, Warmzeiten nach etwa 10.000 bis 100.000 Jahren) bestimmt werden, gewinnt erst später an Bedeutung. Danach dominieren die Szenarien mit geologischen FEPs, z.B. Diapirismus oder Subrosion (BRASSER ET AL. 2008).

Da grundsätzlich jede sinnvolle Kombination von FEPs ein einzelnes Szenario liefert, ergibt eine umfassende Szenarienentwicklung für ein Endlagersystem eine große Zahl von Szenarien, die nicht einzeln untersucht werden können. Es ist aber auch nicht zwingend erforderlich, die Konsequenzen für jedes individuelle Szenario zu ermitteln. Stattdessen können mehrere Szenarien durch ein einzelnes Szenario abgedeckt werden. Für diese abdeckenden Szenarien muss jeweils argumentativ gezeigt werden, dass die Konsequenzen der abgedeckten Einzelszenarien niemals schwerwiegender sind.

Es können auch so genannte „stilisierte Szenarien“ erstellt werden. Diese sind durch (z.B. regulatorisch) vorgegebene festgelegte Bedingungen oder Entwicklungsmöglichkeiten des gesamten Endlagersystems oder eines Teilsystems charakterisiert, bei denen die realen Ereignisabläufe am betrachteten Standort nicht bekannt sind oder nicht detailliert berücksichtigt werden können. Ein typischer Fall für eine Vorgabe stilisierter Szenarien sind z.B. die Szenarien, die anthropogene Einwirkungen („unbeabsichtigtes menschliches Eindringen“) beinhalten. Ein Beispiel für eine regulatorische Vorgabe zu einem Teilsystem ist die Forderung, die aus der Grundwasserkontamination resultierende Strahlenexposition in der Biosphäre mit den nach der Strahlenschutzverordnung zugrunde zu legenden Verzehrgewohnheiten in Verbindung mit festgelegten Daten und Modellen aus bestimmten Verwaltungsvorschriften („Dosiskonversionsfaktoren“) zu be-

rechnen. Dies ersetzt eine standortbezogene Modellierung der Vorgänge in der Biosphäre (BRASSER ET AL. 2008).

Als extreme Varianten können auch What-If-Szenarien betrachtet werden, bei denen z.B. die Radionuklide nach dem Austritt aus den Nahfeldbarrieren ohne weitere Verzögerung direkt in einen oberflächennahen Grundwasserstrom eintreten. Diese hypothetischen Szenarien dienen vor allem zur Beurteilung der Robustheit des Systems und des Nachweises.

5.3 Relevanz der Szenarienanalyse für die Komponenten des Nachweiskonzeptes

Die Szenarienanalyse hat Auswirkungen auf alle Komponenten des Nachweiskonzeptes:

1. Für den Integritätsnachweis der geologischen Barriere entscheiden die als wahrscheinlich oder wenig wahrscheinlich eingestuften Entwicklungen, welche Einwirkungen mit welcher Ausprägung zu betrachten sind, z.B. Salzaufstieg, Erdbeben, Vulkanismus und die Kalt- und Warmzeiten. Daraus ergibt sich unter anderem, für welche Bereiche der geologischen Barriere der Integritätsnachweis geführt werden kann und für welche nicht.

2. Beim Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren ist die Szenarienanalyse vor allem bei der Festlegung der Auslegungsanforderungen von Bedeutung. Sowohl aus den aus der Szenarienanlyse resultierende Anfangs- und Randbedingungen (z.B. Dauer der Kompaktion des Versatzes) als auch den zu erwartenden Einwirkungen auf die Barrieren (z.B. Fluiddrücke) ergeben sich die Anforderungen an die geotechnischen Barrieren (z.B. Durchlässigkeit und Lebensdauer).

3. Aus der Szenarienanalyse ergeben sich die Szenarien, für die Konsequenzen, d.h. die Freisetzung von Radionukliden aus dem Endlager oder dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich, bewertet werden müssen und die hierbei zu berücksichtigenden Bedingungen. Bei Entwicklungen, bei denen es nicht zu einer Freisetzung aus dem ewG kommt, ist der sichere Einschluss der Abfälle gegeben.

5.4 Beurteilung des vorhandenen Instrumentariums

Ein geeignetes Werkzeug für eine umfassende Szenarienanalyse ist zurzeit für ein HAW-Endlager im Salzgestein nicht verfügbar. Mit dem im Projekt ISIBEL entwickelten FEP-Katalog existiert aber bereits ein wichtiges Werkzeug für die Identifizierung von Ungewissheiten. Des Weiteren bietet dieser Katalog eine gute Grundlage für die Entwicklung einer Methodik zur Ableitung von Szenarien und für eine Zuordnung dieser Szenarien zu unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten. Das liegt vor allem daran,

dass der FEP-Katalog über eine reine Beschreibung der FEPs und deren Relevanz für den gegebenen Standort hinausgeht und zusätzlich Aspekte aufgreift, die beim weiteren Ablauf einer Szenarienanalyse von entscheidender Bedeutung sind. Dies sind vor allem

- die Relevanz der FEPs für die entscheidenden Komponenten des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes (einschlusswirksame Barrieren),
- die Zuweisung von bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten für die einzelnen FEPs und
- die Abhängigkeiten der FEPs untereinander.

Es ist Aufgabe der zweiten Phase des Projektes ISIBEL und des Nachfolgeprojektes ISIBEL-II, eine Vorgehensweise zur Ableitung eines Referenzszenarios und alternativer Szenarien zu entwickeln. Diese Arbeiten sind zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichtes noch nicht abgeschlossen. Eine detailliertere Bewertung des Instrumentariums hinsichtlich der Szenarienentwicklung soll daher in diesem Bericht nicht erfolgen. Es ist vorgesehen, nach Abschluss der Arbeiten diesen Punkt im entsprechenden Bericht im Nachfolgeprojekt ISIBEL-II wieder aufzugreifen.

6 Identifizierung nicht zu vermeidender Ungewissheiten

Über die Standortauswahl und die Auslegung des Endlagers hinaus ist es in der Regel schwierig, Ungewissheiten zu vermeiden. Es geht dann meist darum, die verbleibenden Ungewissheiten zu beschreiben und gegebenenfalls zu quantifizieren.

In diesem Kapitel werden die nicht zu vermeidenden Ungewissheiten der zu erhebenden Daten, Parameter und Modelle für ein HAW-Endlager in Salz zunächst identifiziert. Eine umfassende Zusammenstellung der Ungewissheiten wird erst im Verlauf eines Safety Case entwickelt werden können. Ziel in diesem Bericht ist es daher, die relevanten Phänomene in einem Endlagersystem anzusprechen und aufzuzeigen, wie solche Informationen zusammengestellt werden können. Dies wird an Hand der Komponenten des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes durchgeführt: Kapitel 6.1 und 6.2 beschreiben die wesentlichen zu berücksichtigenden Aspekte für die Ungewissheiten im Zusammenhang mit dem Integritätsnachweis der geologischen bzw. der geotechnischen Barrieren, Kapitel 6.3 die entsprechenden Ungewissheiten bei der Bewertung von Freisetzungsszenarien. Da nicht alle relevanten Phänomene zum gegenwärtigen Zeitpunkt in detaillierter Form aufgeschlüsselt werden können, sind sie in Kapitel 6.4 in einer Tabelle zusammengefasst.

Bei der Zusammenstellung der relevanten Phänomene fokussiert sich die Tabelle vor allem auf deren Relevanz für das Sicherheitskonzept und seine wesentlichen Komponenten: Integritätsnachweis der geologischen Barriere, Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren und die Bewertung nicht auszuschließender Freisetzungsszenarien (Abb. 3.1). Da zum gegenwärtigen Zeitpunkt das Verhalten der Salzgruskompaktion nicht ausreichend genau beschrieben werden kann, sind für den Nachweis des sicheren Einschlusses neben dem Integritätsnachweis für die geologische und die geotechnischen Barrieren gegebenenfalls auch Freisetzungsrechnungen durchzuführen. Der Nachweis des sicheren Einschlusses wurde daher als eigene Kategorie in der Tabelle eingeführt.

Ziel der Identifizierung von Ungewissheiten ist es, möglichst umfassend die Ungewissheiten der wichtigsten Phänomene im Endlagersystem anzusprechen. Unter Phänomen wird im Prinzip ein Synonym für FEPs verstanden, da aber bei der Identifizierung von Ungewissheiten teilweise eine detaillierte Darstellung notwendig ist, sind die hier betrachteten Phänomene nicht unbedingt gleichlautend mit den Einträgen im FEP-Katalog. Phänomene, die auf FEPs beruhen, die im FEP-Katalog ausgeschlossen oder als nicht zu berücksichtigen eingestuft wurden, werden nicht berücksichtigt (z.B. Prozesse in der Biosphäre, Magmatismus (BUHMANN ET AL. 2008C)).

Bei den numerischen Modellen sowie deren zugrundeliegenden Parametern und Daten sollten für eine aussagekräftige Beschreibung der Ungewissheiten zu jedem Phänomen folgende Punkte (gemäß den Fragen aus Kapitel 2) angesprochen werden:

1. Allgemeine Beschreibung
   Einleitend erfolgt eine kurze Beschreibung des Phänomens mit Bezug auf den FEP-Katalog, in dem weiterführende Angaben zu dem Phänomen zu finden sind.

2. Relevanz
   Das vorliegende Phänomen wird im Hinblick auf seine Relevanz für einen Langzeitsicherheitsnachweis im Allgemeinen und für das Sicherheitskonzept und seine wesentlichen Komponenten im Speziellen auf dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik bewertet, z.B. durch bereits vorhandene Ergebnisse von Sensitivitätsstudien.

3. Datengrundlage
   Darlegung der Informationsquellen, auf denen die Beschreibung (und Modellierung) des beschriebenen Phänomens erfolgt.

4. Datenungewissheiten
   Beschreibung der Ungewissheiten, die mit der existierenden Datengrundlage verbunden sind.

5. Modellierungsstrategie
   Die Modellierungsstrategie gibt einen Überblick, wie das beschriebene Phänomen im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises modelliert wird.

6. Modellungewissheiten
   In diesem Abschnitt werden die Ungewissheiten, die der Modellierungsstrategie zugrundeliegen, beschrieben.

7. Parameterungewissheiten
   Die zugrundeliegenden Modellvorstellungen benötigen eine bestimmte Anzahl von Parametern, die auf den gegebenen Daten oder anderen Modellergebnissen beruhen. Handelt es sich bei den Parametern selbst um Phänomene, werden die Ungewissheiten hier nicht weiter aufgeführt. Sie werden unterstrichen und in eigenen Einträgen (Tab. 6.1) beschrieben.

8. Szenarienungewissheiten
   Beschreibung der Ungewissheiten, die sich bei der Extrapolation der Datengrundlage, wichtiger Einflussgrößen und der Modellierung des Phänomens auf lange Zeiträume ergeben.

9. Abschließende Beurteilung
   Zusammenfassend soll unter diesem Punkt eine Beurteilung des vorliegenden Phänomens erfolgen. Dabei steht die Frage der Relevanz des behandelten Phänomens für die Sicherheitsaussage im Mittelpunkt.

Diese Art der Zusammenstellung ist bei den Modellen im Langzeitsicherheitsnachweis sinnvoll, die numerisch umgesetzt werden. Bei Modellen, die nicht numerisch umgesetzt werden und bei denen im wesentlich verbal-argumentativ mit den Parameter- und

Modellungewissheiten umgegangen wird, ist eine Beschreibung, die sich an dieser Struktur orientiert, nicht zielführend. Dies gilt vor allem für die Identifizierung der Ungewissheiten beim geologischen Standortmodell.

6.1 Ungewissheiten im Integritätsnachweis für die geologische Barriere

Grundlage des Integritätsnachweises für die geologische Barriere ist die Tatsache, dass Steinsalz in einem Salzdom außerhalb fluidführender oder aufgelockerter Gebirgsbereiche für Flüssigkeiten und Gase nicht durchströmbar ist. Diese Eigenschaft wird als Integrität bezeichnet. Das Salz verliert diese Eigenschaft nur dann, wenn sich durch Spannungszustände oberhalb der Dilatanzgrenze Wegsamkeiten im Salz bilden oder wenn bei bestimmten Randbedingungen ein Fluiddruck oberhalb der kleinsten wirksamen Hauptnormalspannung auf das Salz einwirkt. Aufgrund dieser Abhängigkeit der Integrität von den wirksamen Spannungen muss für den Integritätsnachweis für die geologische Barriere der Spannungszustand im Salz in seiner örtlichen und zeitlichen Veränderlichkeit ermittelt werden.

Zur Ermittlung des Spannungszustandes werden numerische Modellrechnungen durchgeführt. In diesen Modellrechnungen werden die aufgrund der Auffahrung der Hohlräume des Endlagers und aufgrund des Wärmeeintrags bewirkten Spannungsänderungen im Gebirge berechnet. Dazu muss ein Finite-Elemente-Modell erstellt werden, dass die Salzstruktur mit dem Deck- und Nebengebirge abbildet. Grundlage dafür ist die geologische Standortbeschreibung mit dem geologischen Standortmodell, das die räumliche Ausdehnung der unterschiedlichen das Gebirge am Standort aufbauenden Gesteine darstellt.

Bei der Beschreibung der Ungewissheiten im Integritätsnachweis für die geologische Barriere ist daher zu prüfen, welche Ungewissheiten in der geologischen Standortbeschreibung vorhanden sind und welche Auswirkungen sie auf Ungewissheiten im Integritätsnachweis für die geologische Barriere haben.

Neben der geologischen Standortbeschreibung müssen verschiedene Parameter, Modellvorstellungen und Vorgehensweisen als mögliche Quellen von Ungewissheiten im Integritätsnachweis für die geologische Barriere betrachtet werden, zum Beispiel der zeitliche Verlauf des Wärmeeintrags, die mathematische Formulierung des Kriechgesetzes oder die numerische Umsetzung von Deformationen im Dilatanzbereich. Im vorliegenden Bericht werden als ein Beispiel für Ungewissheiten im Integritätsnachweis für die geologische Barriere lediglich die Ungewissheiten im geologischen Standortmodell beschrieben. Die darauf bezogenen Aussagen zum Umgang mit den Ungewissheiten und zur Bewertung des dafür vorhandenen Instrumentariums sind folglich nur für diese Ungewissheiten im geologischen Standortmodell, nicht aber für die anderen Ungewissheiten im Integritätsnachweis für die geologische Barriere gültig.

6.1.1 Ungewissheiten im geologischen Standortmodell

Bei der Erkundung des Referenzstandortes werden unterschiedliche Erkundungsmethoden wie geologische Kartierungen, Probenahmen an Aufschlüssen, Bohrlochmessungen oder seismische Verfahren angewendet. Das Ergebnis der Erkundung ist die geologische Standortbeschreibung mit dem geologischen Standortmodell. Im geologischen Standortmodell ist für das Modellgebiet an jedem Ort die vorliegende Gesteinsart ausgewiesen. Zusätzlich können in der geologischen Standortbeschreibung Parameter wie der Spannungszustand, petrophysikalische Eigenschaften, hydraulische Potenziale oder der Verlauf von Störungen angegeben sein. Ebenfalls zur geologischen Standortbeschreibung gehören Informationen über die geologische Entwicklung des Modellgebietes sowie über den Status von aktuell ablaufenden geologischen Prozessen am Standort.

Entsprechend der Verschiedenartigkeit der Informationen in der geologischen Standortbeschreibung kommen verschiedene Arten von Ungewissheiten vor. Je nach Art der Ungewissheit muss ihre zweckmäßige Charakterisierung auf jeweils angemessene Weise erfolgen. Dabei ist eine Quantifizierung der Ungewissheit nur in bestimmten Fällen geeignet, beispielsweise für Parameterverteilungen. Andere Informationen in der geologischen Standortbeschreibung wie beispielsweise die strukturgeologische Entwicklung des Modellgebietes entziehen sich dagegen einer Quantifizierung der darin vorhandenen Ungewissheit. Gleichwohl muss auch für solche Informationen eine Aussage zu der damit verbundenen Ungewissheit getroffen werden.

Beispielhaft für den Umgang mit Ungewissheiten aus der geologischen Standortbeschreibung werden im Folgenden die Ungewissheiten bezüglich der Lage von Schichtgrenzen im geologischen Standortmodell charakterisiert, die Möglichkeiten ihrer Quantifizierung angegeben (Kapitel 7.1.1) und ihre Berücksichtigung im Sicherheitsnachweis dargestellt (Kapitel 7.1.2).

Das Modellgebiet des Referenzstandortes im Wirtsgestein Salz umfasst die Salzstruktur selbst, das darunter liegende Grundgebirge, das darüber lagernde Deckgebirge bis zur Tagesoberfläche und das Nebengebirge bis in eine Entfernung von der Salzstruktur im Kilometerbereich.

6.1.1.1 Detaillierungsgrad des geologischen Standortmodells

Die Geologie des Referenzstandortes wird durch das dreidimensionale geologisch-tektonische Standortmodell abgebildet. Anders als bei zweidimensionalen Modellkonstruktionen auf Schnittebenen ist bei der dreidimensionalen Konstruktion die räumliche Widerspruchsfreiheit garantiert.

Der Detaillierungsgrad des Standortmodells kann örtlich variieren. Das großräumige geologische Lagerstättenmodell löst in der Regel keine Details im Meterbereich und feiner auf. Es dient als Grundlage für die numerischen Modelle für thermomechanische oder hydraulische Berechnungen im Sicherheitsnachweis. Bei der Diskretisierung solcher Gitternetze sind ebenfalls nur begrenzte Detaillierungen möglich, so dass die begrenzte Auflösung der lithologischen Abfolge im geologischen Standortmodell kein Informationsdefizit für die numerischen Berechnungen bedeutet.

Für technische Planungen können dagegen Kenntnisse über den Gebirgsaufbau im Meterbereich relevant sein, so dass für solche Planungen die Anfertigung hochaufgelöster Modellbereiche auf der Grundlage von Detailerkundungen notwendig sein kann. Ein geologischer Schnitt, der für einen Standortbereich auf der Grundlage einer Detailerkundung angefertigt wurde, kann daher Details über den Verlauf von Schichtgrenzen ausweisen, die in einem Schnitt desselben Bereichs, der aus dem großräumigen geologischen Lagerstättenmodell erzeugt wurde, nicht ausgewiesen sind. Solche Unterschiede zwischen zwei Schnittdarstellungen desselben Standortbereichs sind in der unterschiedlichen Auflösung begründet und bedeuten keinen Widerspruch im Standortmodell.

6.1.1.2 Genauigkeit des geologischen Standortmodells

Der im geologischen Standortmodell angegebene Verlauf der Schichtgrenzen stimmt an Aufschlüssen mit der Realität genau überein. Zwar ist auch die Genauigkeit der räumlichen Koordinaten von Aufschlüssen endlich und ließe sich in Abhängigkeit von den eingesetzten markscheiderischen Verfahren quantifizieren. Jedoch sind die technisch bedingten Ungenauigkeiten um Größenordnungen kleiner als relevante Abstände, beispielsweise zwischen Einlagerungshohlräumen und lösungsführenden Bereichen. Eine Variation beispielsweise der Lage einer Anhydritscholle im dm-Bereich würde den möglicherweise sicherheitsrelevanten Abstand zu einem Einlagerungshohlraum im einstelligen Prozentbereich oder weniger verändern und ist damit irrelevant. Die gleiche Aussage gilt für Ungenauigkeiten aufgrund von Interpretationsspielräumen bei der Gesteinsansprache. Die Annahme einer exakten Übereinstimmung zwischen Modell und Realität am Ort der Aufschlüsse ist daher angemessen.

Anders verhält es sich mit dem Verlauf der Schichtgrenzen zwischen den Aufschlüssen. Hier gilt die Randbedingung, dass das geologische Modell in sich widerspruchsfrei sein muss. Außerdem sollen bei der Konstruktion des Modells die Erfahrungen über den Aufbau ähnlicher Strukturen einfließen. Es ist davon auszugehen, dass unter diesen Prämissen verschiedene Geologen aus identischen Aufschlussdaten verschiedene geologische Modelle konstruieren würden. Es hängt von den vorliegenden Gesteinsarten, vom Verständnis der spezifischen Standortgegebenheiten der zu modellierenden geologischen Struktur, von der vorhandenen Aufschlussdichte sowie der Art und dem

Umfang der sonstigen vorliegenden Informationen ab, wie stark ein konstruiertes geologisches Modell von der Realität abweicht.

Bezüglich des Einflusses der Gesteinsart auf die Genauigkeit eines geologischen Standortmodells gilt, dass der Verlauf von Schichtgrenzen und sonstigen die Struktur bestimmenden Elementen im Wirtsgestein Salz besonders zuverlässig vorauszusagen ist. In einer Salzstruktur kann der interne Faltenbau aus dem Verständnis der strukturbildenden Prozesse über große Distanzen zwischen zwei Aufschlüssen extrapoliert werden, während beispielsweise Aussagen über das Vorliegen oder Fehlen von Störungen in einem Granitkörper zwischen zwei Aufschlüssen kaum möglich ist, da das Vorkommen und der Verlauf von Störungen im Granit nicht in charakteristischer Weise mit der geologischen Gesamtsituation und der Gesteinsabfolge verknüpft sind wie der Faltenbau einer Salzstruktur. Am Referenzstandort fördert die Form der Salzstruktur als langgezogener Salinarkörper eine Vorzugsrichtung für die Verfaltung des Salinars. Auf Grund dessen kann der Internbau selbst bei geringer Aufschlussdichte schlüssig vorhergesagt werden. Am Referenzstandort wurde auf der Grundlage von vier Tiefbohrungen in die Salzstruktur sowie ca. 40 Bohrungen, die wenige Meter unter dem Salzspiegel endeten, eine Tiefenprojektion abgeleitet, die durch die nachfolgende untertägige Erkundung immer wieder bestätigt wurde und deren Gültigkeit somit weiterhin Bestand hat.

6.1.2 Ungewissheiten weiterer Merkmale der geologischen Standortbeschreibung

Neben der Lage von Schichtgrenzen gehen weitere zur geologischen Standortbeschreibung gehörende Informationen in den Integritätsnachweis für die geologische Barriere ein. Als sicherheitsrelevant werden die folgenden Merkmale eingeschätzt:

- Chemische Auflösung von Salzgesteinen insbesondere im Bereich des Salzspiegels (Subrosionsrate)
- Mechanische Abtragung von Salzgesteinen im Bereich des Salzspiegels
- Salzaufstiegsrate
- Kompressionstektonik
- Kriechrate von Salz, Kompaktionsrate von Salzgrus
- Potentielle Migrationspfade für Radionuklide im Bereich des Salzspiegels
- Aufbau des Deck- und Nebengebirges
- Klimatische Entwicklung

Eine unterstellte Erhöhung der festgestellten Salzaufstiegsrate um eine Größenordnung würde eine Hebung des Endlagers um mehrere hundert Meter in 1 Million Jahren bedeuten und ist folglich als sicherheitsrelevant einzustufen. Ebenso könnte eine tief reichende Subrosion oder mechanische Abtragung der Salzbarriere eine Reduzierung der Barrierenmächtigkeit bewirken. Die tektonischen Verhältnisse sind sicherheitsrelevant, da eine Kompressionstektonik die Salzaufstiegsrate erhöhen könnte. Dem Kompaktionsprozess des als Versatzmaterial verwendeten Salzgruses ist eine besondere Sicherheitsrelevanz zuzuschreiben, da erst nach Erreichen einer genügend kleinen Permeabilität des kompaktierten Salzgruses ein sicherer Einschluss der eingelagerten Abfälle erreicht wird. Schließlich wird der Aufbau des Deck- und Nebengebirges wegen etwaiger Rückhalteeffekte als sicherheitsrelevant eingestuft. Weil die Veränderungen des Aufbaus des Deck- und Nebengebirges auch von der Anzahl zukünftiger Kaltzeiten abhängen, ist auch die klimatische Entwicklung als sicherheitsrelevant zu betrachten.

Die genannten für den Integritätsnachweis für die geologische Barriere relevanten und zur geologischen Standortbeschreibung gehörigen Merkmale und Prozesse sind in Kapitel 6.4 zusammengestellt. Zu diesen Merkmalen und Prozessen sind im Sicherheitsnachweis alle verfügbaren Informationen zusammenzustellen, daraus die vorhandenen Ungewissheiten abzuleiten und der Einfluss entsprechender Variationen auf die Sicherheit durch Berechnungen oder logische Ableitungen zu bewerten.

6.2 Ungewissheiten im Bezug auf den Integritätsnachweis für die geotechnischen Barrieren

Wie in Kapitel 4 dargestellt, werden bei der Endlagerauslegung eine Vielzahl von planerischen und konstruktiven Maßnahmen vorgesehen, um Ungewissheiten zu reduzieren oder zu vermeiden. Im folgenden werden nicht zu vermeidende Ungewissheiten dargestellt, die für den Integritätsnachweis für die geotechnischen Barrieren relevant sind. Gemäß Tabelle 6.1 werden die Ungewissheiten dabei nach Systemkomponenten gruppiert, in denen sie ihren Ursprung haben, und innerhalb dieser Systemkomponenten die verschiedenen, für die Systementwicklung relevanten Phänomene dargestellt. Die Darstellung gliedert sich in die verschiedenen in der Einleitung zu Kapitel 6 genannten Aspekte. Bei der Beschreibung der Aspekte wird nur dann zwischen den verschiedenen Phänomenen differenziert, wenn unterschiedliche Phänomen-spezifische Sachverhalte darzustellen sind. Falls die Aussagen (z.B. für die Modellierung) für verschiedene Phänomene zutreffen, wird bei der Beschreibung nicht zwischen den Phänomenen getrennt.

6.2.1 Systemkomponente: Strecken- und Schachtverschlüsse

Strecken- und Schachtverschlüsse sollen während der frühen Nachbetriebsphase, in der die Salzgruskompaktion noch nicht abgeschlossen ist, einen Lösungszutritt zu den Abfällen verhindern. Im Hinblick auf die Integrität der geotechnischen Barrieren sind vor allem folgende Phänomene relevant: Baustoffeigenschaften, Errichtung von Barrieren, Geologie am Barrierenstandort sowie die geologische Entwicklung.

Allgemeine Beschreibung

Phänomen: Baustoffeigenschaften

Die wesentlichen Anforderungen an die Baumaterialien für die Verschlussbauwerke umfassen eine geringe hydraulische Leitfähigkeit, die mechanische Festigkeit, und die Langzeitstabilität.

Die für die Streckenverschlüsse vorgesehenen Betone werden an die standortspezifischen Anforderungen bezüglich der Chemie/Mineralogie, der rheologischen und mechanischen Eigenschaften sowie der Porosität und Permeabilität angepasst.

Da die oberen Teile der Schachtverschlüsse in direktem Kontakt mit dem Grundwasser stehen, werden sie aus diversitären Baumaterialien aufgebaut, die sich in ihrer Funktion ergänzen. Der als Material für die Dichtelemente in Schachtverschlüssen geeignete Bentonit-Typ wird gemäß dem Chemismus der prognostizierten Grundwässer ausgewählt. Die Einspannung des Dichtelementes in den Schacht ergibt sich durch das Quellen des Bentonits bei Lösungszutritt. Durch die Beimengung von Quarz zum Bentonit kann der Quelldruck so begrenzt werden, dass es nicht zum Fracen des Gebirges kommt. Möglicherweise werden die Bentonitelemente mit Asphalt und Bitumina kombiniert, die zum Abdichten der Dichtungsschlitze in den Dichtelementen und/oder als Gleitmittel zwischen Dichtung und Gebirge verwendet werden können. Da Asphalt und Bitumina einer mikrobiellen Degradation unterliegen können, werden diese Materialien in erster Linie als Kurzzeitdichtungen betrachtet.

Die Widerlager des Schachtverschlusses bestehen aus Beton, wobei die Wahl des Baustoffs entsprechend dem chemischen Milieu des Grundwassers erfolgt. Für das setzungsarme Schachtfundament wird langzeitstabiler Schotter (z.B. Basalt) eingesetzt.

Phänomen: Errichtung von Barrieren

Da Strecken- und Schachtverschlüsse zu Beginn der Nachbetriebsphase den Zutritt von Lösungen zu den eingelagerten Abfällen verhindern sollen, ist die anforderungsgerechte Funktion dieser Barrieren von großer sicherheitstechnischer Bedeutung. Wie in

Kap. 4.2 dargestellt, wird die Eintrittswahrscheinlichkeit für das Auftreten von Defiziten bei der Herstellung von Baumaterialien und der Errichtung der Barrieren durch entsprechende Vorsorgemaßnahmen (Qualitätssicherungsmaßnahmen bei Entwurf, Planung und Ausführung, Sicherheitsnachweis gemäß EUROCODES 0 und 7 in Verbindung mit DIN EN 1990 und DIN 1055/1 nach dem Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte, Auslegung der Barrieren mit Sicherheitszuschlägen, in-situ-Versuche mit Baumaterialien) minimiert.

Phänomen: Geologie am Barrierenstandort

Die Geologie am Barrierenstandort beeinflusst die Funktionalität der Barriere maßgeblich. Durch vorlaufende Erkundung mittels Bohrungen und Geophysik wird geprüft, ob Störungen oder Lösungsreservoire im Nahbereich der vorgesehenen Grubenräume auftreten. Sollten sich bei der Auffahrung trotzdem Abweichungen von der erwarteten Geologie auftreten, so kann z.B. klüftiges Gebirge nachträglich durch Injektionsmaßnahmen stabilisiert und abgedichtet werden. Wenn der Einbauort auch durch Ertüchtigungsmaßnahmen nicht die Anforderungen eines Barrierenstandortes erfüllt, so ist die Barriere in günstigere Bereiche zu verlegen.

Phänomen: Geologische Entwicklung

Ausgehend von einer Rekonstruktion der geologischen Standortentwicklung in der Vergangenheit wird die zukünftige Entwicklung im Zuge der geowissenschaftlichen Langzeitprognose abgeschätzt. Dabei wird zwischen kontinuierlichen Langzeitentwicklungen (z.B. Diapirismus, Subrosion), zyklischen Entwicklungen (Warm-/Kaltzeiten) und spontanen Ereignissen (z.B. Lösungszutritte aus dem Wirtsgestein oder dem Deckgebirge, Erdbeben) unterschieden, die sich überlagern und gegenseitig beeinflussen können. Während qualitative Aussagen über das Eintreten bestimmter Ereignisse mit großer Wahrscheinlichkeit möglich sind, ist die Präzisierung der erwarteten Entwicklungen bezüglich des Zeitpunktes und der konkreten Ausprägung aufgrund der Komplexität des Systems mit Ungewissheiten behaftet. Die geologischen Entwicklungen können die Integrität der geologischen Barriere und über Wechselwirkungen auch die Integrität der geotechnischen Barrieren beeinflussen. So kann z.B. eine tief reichende kaltzeitliche Erosion auch die Integrität der Schachtverschlüsse beeinträchtigen, wodurch es zu Lösungszutritten über die Schächte zum Grubengebäude kommt und dann auch die Streckenverschlüsse betroffen sein können. Allerdings bestehen zu diesen späten Zeiten keine Integritätsanforderungen mehr an die geotechnischen Barrieren, da zu diesem Zeitpunkt aufgrund des kompaktierten Salzgrus-Versatzes keine Lösungen bis in die Einlagerungsbereiche vordringen können.

Relevanz

Phänomene: Baustoffeigenschaften und Errichtung von Barrieren

Die Baustoffeigenschaften sowie die anforderungsgerechte Errichtung der Barrieren bestimmen die Funktionalität und Langzeitstabilität der geotechnischen Barrieren. Eine wesentliche Voraussetzung für die Effektivität und Langzeitstabilität der Barrieren ist die geeignete Geologie des Barrierenstandortes. Die Eintrittswahrscheinlichkeit von Fehlern bei den Baustoffrezepturen oder bei der Errichtung wird durch Qualitätssicherungsmaßnahmen minimiert (vgl. Kap. 4.2).

Phänomene: Geologie am Barrierenstandort und Geologische Entwicklung

Die Geologie der Barrierenstandorte wird vor der Errichtung umfassend erkundet und so die Wahrscheinlichkeit einer Beeinträchtigung der Barrierenfunktion durch ungünstige geologischen Verhältnisse minimiert. Sicherheitsrelevante Auswirkungen vieler Ungewissheiten der geowissenschaftlichen Langzeitprognose werden durch Maßnahmen der Endlagerauslegung reduziert oder vermieden (vgl. Kap. 4.2). Zu den verbleibenden Ungewissheiten zählen Prognosen bezüglich möglicher Lösungszutritte. Diese sind von großer Bedeutung, da sie auch in die hydraulischen oder Transportberechnungen eingehen, die die Grundlage für die Ableitung der Auslegungsanforderungen an die Barrieren bilden.

Datengrundlage

Phänomene: Baustoffeigenschaften und Errichtung von Barrieren

Daten über die Erstellung und Wirkungsweise von Verschlussbauwerken aus Salz- und Sorelbetonen liegen aus dem Kali- und Steinsalzbergbau, von der Schließung des Endlagers Morsleben und des Forschungsbergwerks Asse sowie aus verschiedenen Forschungsprojekten vor (KREIENMEYER ET AL. 2008). Dabei wurden Daten über den Bauprozess sowie die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften der Barriere, der Kontaktzone und der Auflockerungszone gesammelt.

Umfangreiche Daten zur Verwendung von Bentonit als Dichtmaterial in geotechnischen Barrieren für Endlagerkonzepte in Granit und Ton liegen aus Belgien, Frankreich, Schweiz, Schweden und Finnland vor (EBERTH & MÜLLER-HÖPPE 2009). In Deutschland wurde ein Technikumsversuch im Zuge des FuE-Projektes „Schachtverschluss Salzdetfurth“ durchgeführt (BREIDUNG 2002).

Bezüglich der Stabilität von Asphalt und Bitumina im geologischen Milieu kann auf natürliche Analoga zurückgegriffen werden.

Phänomene: Geologie am Barrierenstandort und Geologische Entwicklung

Geologische Daten des Referenzstandortes Gorleben werden im Zuge der Erkundung sowie später während der Auffahrung des Grubengebäudes gesammelt. Bezüglich der geologischen Entwicklung Norddeutschlands liegt zudem eine Vielzahl weiterer Daten aus dem Salzbergbau sowie aus Explorationsbohrungen vor.

Datenungewissheiten

Phänomene: Baustoffeigenschaften und Errichtung von Barrieren

Bei Salz- und Sorelbetonen bestehen Ungewissheiten bezüglich möglicher Wechselwirkungen zwischen dem Baustoff und zutretenden Lösungen. Es können chemisch-mineralogische Wechselwirkungen, Quellen, Schwinden und Kriechen des Baustoffs sowie Änderungen der mechanisch hydraulischen Eigenschaften auftreten. Da Chemismus und Zeitpunkt des Lösungszutritts ungewiss sind, kann der Baustoff nicht optimal an den Lösungschemismus angepasst werden.

Die Datenungewissheiten bezüglich der Verwendung des Barrierenmaterials Bentonit betreffen einerseits das Materialverhalten nach dem Einbau (Wiederaufsättigung mit Wasser) und andererseits die Barriereneigenschaften (Diffusivität und Sorption).

Trotz umfassender Qualitätssicherungsmaßnahmen sind Abweichungen des Baumaterials bzw. der errichteten Barriere von der Auslegung, abweichendes Verhalten von Baumaterialien beim untertägigen Einsatz sowie abweichende Geologie am Einbauort der Barriere zwar wenig wahrscheinlich, aber u.a. wegen natürlicher Streuungen nicht auszuschließen.

Weitere Ungewissheiten bestehen im Hinblick auf die chemische und mechanische Langzeitstabilität der Bau-/Dichtmaterialien. Da die Langzeitstabilität der Materialien im Fall eines Lösungszutritts vom Chemismus der Lösungen abhängt und dieser ungewiss ist, können die entsprechenden Nachweise für die Baumaterialien nur auf Abschätzungen beruhen.

Die Funktionalität der Barriere hängt davon ab, dass die Barriere und das angrenzende Gebirge über den Auslegungszeitraum eine niedrige hydraulische Leitfähigkeit aufweist. Ungewissheiten bestehen bezüglich des Zeitpunktes der kompletten Anbindung der Barriere an die unebene Kontur und des vollständigen Verschließens der Auflockerungszone, Klüfte oder Störungen, die zu einem Umfließen der Barrieren führen könnten.

Phänomene: Geologie am Barrierenstandort und Geologische Entwicklung

Der wesentliche Aspekt der Datenungewissheit bezüglich des Wirtsgesteins umfasst das Vorhandensein nicht erkannter Lösungseinschlüsse. Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines derartigen Features und daraus resultierender Szenarien wird durch eine umfassende geologische Erkundung minimiert, kann aber nicht völlig ausgeschlossen werden. Wird eine derartige Entwicklung in Alternativszenarien unterstellt, so bestehen Ungewissheiten bezüglich des Orts und des Zeitpunktes des Lösungszutritts sowie des zu unterstellenden Lösungsvolumens und des Lösungschemismus.

Ein Lösungszutritt wäre auch über unzureichend abgedichtete Tiefbohrungen, die von der Oberfläche gestoßen wurden und Verbindung zum Grundwasser haben, oder durch untertägige Erkundungsbohrungen, die begrenzte Reservoire in Lösungseinschlüssen oder Anhydritschollen erschlossen haben, möglich. Alle Erkundungsbohrungen werden nach dem Stand von Wissenschaft und Technik langzeitsicher abgedichtet, aber ein Undichtwerden ist aber zunächst nicht völlig auszuschließen.

Ein Teil der Lastannahmen für die Auslegung der geotechnischen Barrieren leitet sich aus der geowissenschaftlichen Langzeitprognose ab. Die hier angegebenen Prognosen für die Entwicklung der Geosphäre sind bezüglich Zeitpunkt, Art und Umfang der Entwicklungen mit großen Ungewissheiten behaftet.

Modellierungsstrategie

Die Ableitung von Anforderungen an die geotechnischen Barrieren erfolgt mit Hilfe von vorlaufenden hydraulischen und Transportberechnungen (KREIENMEYER ET AL. 2008).

Dabei werden die geotechnischen Barrieren als Strömungswiderstände parametrisiert. Durch parallel geschaltete Strömungswiderstände wird berücksichtigt, dass sich die Wirksamkeit der geotechnischen Barrieren in Realität aus den drei Elementen Abdichtungskörper, der Kontaktzone zum Wirtsgestein und der Auflockerungszone im Wirtsgestein ergibt. Die Permeabilität stellt die aus dem Durchfluss des Streckenquerschnitts zurückgerechnete mittlere Permeabilität der Barriere dar. Der Nachweis des ausreichenden hydraulischen Widerstandes wird für alle drei Elemente geführt (MÜLLER-HÖPPE ET AL. 2007).

Bei den Nachweisrechnungen werden einerseits begrenzte Lösungszutritte aus Lösungseinschlüssen im Fall der ungestörten Referenzentwicklung und andererseits Lösungszutritts über die Schächte im Fall der gestörten Endlagerentwicklung zugrunde gelegt. Die Ungewissheiten der geologischen Prognose werden dabei durch konservative Annahmen (früher Zutritt, maximale Menge) abgedeckt.

Da die Permeabilität der Verschlüsse zunimmt, wenn die Bauwerksintegrität nicht mehr gegeben ist, wird für die Barrieren ein Nachweis der Rissbeschränkung geführt, der in vielen Fällen den Nachweis der Standsicherheit abdeckt. Außerdem wird ein Nachweis der Langzeitstabilität geführt, der belegt, dass sich die Permeabilität in Folge chemischer Einwirkungen, die z.B. zu Materialkorrosion führen, nicht in unzulässiger Weise erhöht. Ungewissheiten bezüglich der Prognose der Entwicklung des geochemischen Milieus werden dabei durch konservative Annahmen abgedeckt.

Bei den ingenieurtechnischen Nachweisen werden die Eigenschaften der verschiedenen Barrierenbaustoffe durch Stoffgesetze abgebildet. Der Entwicklungsstand dieser Stoffgesetze ist im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit auf verschiedene Randbedingungen unterschiedlich weit fortgeschritten und wird im Zuge von Forschungsprojekten weiter entwickelt.

Modellungewissheiten

Modellungewissheiten bestehen hinsichtlich der mathematischen Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen der Auflockerungszone und den standortspezifischen Randbedingungen wie z.B. Gebirgsdruck, Fluiddruck, rheologischen Gebirgseigenschaften, Festigkeitseigenschaften etc. Es gibt z. Z. kein hinreichend abgesichertes Modell für die Strömungs- und Verheilungsprozesse im Bereich der Auflockerungszone.

Die Lastannahmen für die Auslegung der Barrieren werden u.a. auch aus der geowissenschaftlichen Langzeitprognose abgeleitet. Entsprechend den Ungewissheiten bezüglich der geologischen Entwicklung ist unklar, ob die abgeleiteten Lastannahmen „konservativ“ und „abdeckend“ sind.

Parameterungewissheiten

Ungewissheiten bestehen bei den Nachweisen für die Barrieren im Hinblick auf die Parametrisierung (Porosität/Permeabilität) der Kontaktzone Barriere/Gebirge sowie der konturnahen Auflockerungszone.

Da die Entwicklung des geochemischen Milieus nur näherungsweise abgeschätzt werden kann, bestehen Ungewissheiten bezüglich der Langzeitstabilität und Funktionalität einiger Baustoffe. So können Betone bei einem entsprechenden Chemismus der Lösungen korrodieren und die Barriereneigenschaften des Bentonits können eingeschränkt werden.

Die Lastannahmen für die Auslegung der Barrieren basieren z.T. auf geologischen Entwicklungen, die bezüglich ihres Zeitpunktes und der Ausprägung sowie der Wechselwirkungen mit anderen Randbedingungen nur näherungsweise prognostizierbar

sind. Dies betrifft vor allem die Szenarien mit Lösungszutritt, die auch wesentliche Auswirkungen auf die Entwicklung geochemischen Milieus haben.

Szenarienungewissheiten

Im Hinblick auf die geologische Entwicklung besteht eine Vielzahl von Szenarienungewissheiten, die den Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren betreffen.

So ist für die ungestörte Entwicklung (Referenzentwicklung) ungewiss, ob, wann, wo und in welchem Umfang Lösungszutritte aus Lösungseinschlüssen oder Anhydritschollen ins Grubengebäude stattfinden werden. Je nach Zeitpunkt, Menge und Zutrittsort ergeben sich abweichende Entwicklungen für das Endlagersystem.

Große Ungewissheiten bestehen auch im Hinblick auf Zeitpunkt und Ausprägung der nächsten Kaltzeit. Im Fall einer Vergletscherung kann es zu einer tiefgreifenden Erosion kommen, die bis zum Salzspiegel reicht und dann auch die Integrität des Schachtverschlusses beeinträchtigt.

Nicht erkannte geologische Abweichungen und ihre Auswirkungen auf die Funktion der Barrieren werden in Alternativszenarien untersucht. Dabei werden konservative Randbedingungen (z.B. großes Lösungsvolumen und früher Lösungszutritt) unterstellt.

Wird für ein Alternativszenarium ein vorzeitiges Versagen der Schachtverschlüsse und ein Lösungszutritt aus dem Deckgebirge unterstellt, so sind der Zeitpunkt, die Menge und der Chemismus der Lösungen sowie der Kompaktionsgrad des Salzgrus wesentliche Faktoren für die Konsequenzen für das Endlagersystem.

6.2.2 Systemkomponente: Abfallgebinde

Das Abfallgebinde umfasst das Abfallinventar und den Endlagerbehälter. Die wichtigsten an die Systemkomponente geknüpften Phänomene sind die „Gasbildung“ und die „Wärmeproduktion“, die sich mittelbar über andere Prozesse auch auf die geotechnischen Barrieren auswirken.

Allgemeine Beschreibung

<u>Phänomen: Gasbildung</u>

Sobald nach der Einlagerung der Sauerstoff der Restluft durch die Bildung von Eisenoxiden aufgezehrt ist, stellen sich im weiteren Verlauf der Metallkorrosion reduzierende Bedingungen ein. Bei der anaeroben Metallkorrosion wird Wasserstoffgas gebildet. Wie lange und in welchem Ausmaß dieser Prozess abläuft, hängt von der Verfügbar-

keit von Lösungen ab. Bei der ungestörten Entwicklung sind die verfügbaren Flüssigkeitsmengen gering und beschränken sich auf Restfeuchte im Versatz und im Behälter sowie geringe Lösungszutritte aus dem Salzgebirge. Daher wird die Korrosion nach einer gewissen Zeit zum Erliegen kommen. Bei einer gestörten Entwicklung mit Lösungszutritt ist von einer wesentlichen stärkeren Korrosion und Gasbildung auszugehen.

Neben der Metallkorrosion sind zwei weitere Gasbildungsmechanismen zu betrachten: die mikrobielle Gasbildung und die Radiolyse.

Materialien, die für eine mikrobielle Gasbildung zu Verfügung stehen, sind möglicherweise in den CSD-C-Kokillen eingelagerte Betriebsabfälle sowie die Neutronenabschirmungen aus Polyethylen dar, die im POLLUX-Behälter, aber auch im Kopf der BSK3-Kokille integriert sind.

Eine mögliche Radiolyse wirkt sich in einem Umkreis von höchstens 50 cm um das Abfallgebinde aus. Falls im beeinflussten Bereich Lösungen vorhanden sind (z.B. Versatzfeuchte), so kann H2 gebildet werden. Im Vergleich zur Gasbildung durch Korrosion ist die durch Radiolyse gebildete Gasmenge um zwei bis drei Größenordnungen geringer.

Die Gasbildung beeinflusst wesentlich den Fluiddruck im Endlagersystem, der unmittelbar auf das Wirtsgestein und die geotechnischen Barrieren einwirkt.

<u>Phänomen: Wärmeleistung</u>

Die Wärmeproduktion eine Folge des radioaktiven Zerfalls des Inventars. Dieses Inventar ist z.Z. nicht in jedem Fall exakt spezifizierbar. Aufgrund der Weiterentwicklungen im Reaktorbetrieb ist für die Zukunft eine Erhöhung der Brennelement-Abbrände vorgesehen, was zu einer Verschiebung des Radionuklid-Spektrums und zu einer höheren und langsamer abklingenden Wärmeleistung der Brennelemente führen wird.

Für die Kokillen mit verglasten Wiederaufarbeitungsabfälle werden keine behälterspezifischen Inventare angegeben, sondern nur Mittelwerte, Bandbreiten, sowie als Obergrenzen, Garantiewerte. Daher ergeben sich auch Bandbreiten für die Wärmeleistung.

Die Aufheizung des Gebirges durch wärmeentwickelnde Abfälle führt zu Spannungsänderungen im Wirtsgestein. Diese Spannungsänderungen führen zu einer erhöhten Konvergenz, die sich unmittelbar auf die geotechnischen Barrieren sowie auf die Salzgrus-Kompaktion auswirkt. Thermische Expansion oder Kontraktion des Gebirges können einerseits dazu führen, dass sich Risse in der aufgelockerten Hohlraumkontur schließen oder öffnen und somit die Funktion der Barriere beeinflussen. Andererseits kann es in den geotechnisch Barrieren zu thermisch induzierten Spannungen kommen.

Eine thermische Carnallitzersetzung bzw. ein Schmelzen von Salzgesteinen ist durch entsprechende vorsorgliche Berücksichtigung bei der Endlagerauslegung in Form ausreichend großer Abstände bzw. Temperaturbegrenzung an der Behälteroberfläche auszuschließen.

Relevanz

Phänomen: Gasbildung

Die Gasbildung ist aufgrund der Auswirkungen auf den Fluiddruck von großer Bedeutung für Integritätsnachweis für die geotechnischen Barrieren. Das größte Gasbildungspotential im Endlager liegt Bereich der Behälterkorrosion. Im Vergleich dazu sind die mikrobielle Degradation und die Radiolyse aufgrund der relativ geringen gebildeten Gasmengen auch unter Berücksichtigung von Ungewissheiten bzgl. des Abfallinventars und der Entwicklung des geochemischen Milieus nur von untergeordneter Bedeutung. Bei einer raschen und intensiven Gasbildung kann der Gasdruck den Gebirgsdruck überschreiten. Es ist zu prüfen, ob es in diesem Fall zum Fracen des Gebirges bzw. zum Aufreißen von Schwächezonen am Kontakt Barriere/Gebirge und der Auflockerungszone kommen kann.

Phänomen: Wärmeleistung

Die Temperaturgrenzwerte, die der Endlagerauslegung zugrunde gelegt wurden, sind auch bei einer möglicherweise erhöhten Wärmeleistung von zukünftigen Brennelementen z.B. durch längere Zwischenlagerzeiten und eine Verringerung der Einlagerungsdichte einzuhalten. Für die Endlagersicherheit relevante Änderungen können sich aber dadurch ergeben, dass sich bei geändertem Inventar auch das Abklingverhalten ändert, d.h. dass sich der Zeitraum mit hoher Wärmeleistung verlängern kann. Hierdurch ergibt sich eine entsprechend höhere thermische Belastung des Wirtsgesteins und der Barrieren.

Die Aufheizung durch die wärmeentwickelnden Abfälle führt im Wirtsgestein und auch in den geotechnischen Barrieren zu Expansionsprozessen, die von großer sicherheitstechnischer Bedeutung sind. Die Spannungsänderungen im Wirtsgestein erhöhen die Konvergenz, die eine rasche Einspannung der Barrieren, ein Schließen von Rissen in der Auflockerungszone sowie eine beschleunigte Salzgruskompaktion bewirkt. Wenn die Wärmeentwicklung zu späteren Zeiten abklingt, kommt es zur Gebirgskontraktion. Es ist zu prüfen, ob dadurch die Risse in der Auflockerungszone können wieder aufreißen und die Funktion der geotechnischen Barrieren beeinträchtigen könnte.

Die thermische Beanspruchung der Barrieren wird bei der Auslegung berücksichtigt und die Rissbildung wird durch die Wahl geeigneter Baumaterialien sowie durch konstruktive Maßnahmen begrenzt.

Datengrundlage

Über das Korrosionsverhalten verschiedener Metalle im feuchten Milieu liegen umfangreiche Laborergebnisse vor (MÜLLER & THOLEN 2009). Bei Erhitzer-Versuchen im trockenen Milieu des Bergwerks Asse haben eingesetzte POLLUX-Behälter nach 8,5 Jahren keine nennenswerte Korrosion gezeigt.

Zur Restfeuchte von Salzgrusversatz und auch zum geochemischen Milieu liegen In-situ-Messungen aus Salzbergwerken vor (KREIENMEYER ET AL. 2008). Weitere Daten zu Entwicklungen des geochemischen Milieus in salinaren Lösungen wurden bei Laborversuchen gewonnen.

Die Abfallverursacher erstellen für Transport und Zwischenlagerung umfangreiche Abfalldokumentationen, die neben Angaben zum Inventar auch Angaben zur Wärmeleistung umfassen. Für die Wiederaufarbeitungsabfälle werden nur Mittelwerte, Bandbreiten sowie Garantiewerte (die Obergrenzen darstellen) angegeben. Um mögliche Beladeoptionen für CASTOR- und POLLUX-Behälter zu untersuchen, hat die GNS umfangreiche Abbrandrechnungen für verschiedene Brennelementtypen, Anfangsanreicherungen und Zielabbrände durchgeführt.

Datenungewissheiten

Die Prognose der in einem annähernd „trockenen“ Milieu gebildeten Gasmengen ist schwierig, da einerseits die Abfallinventare nicht genau bekannt sind (unklare Beladung der CSD-C-Kokillen) andererseits die Restfeuchte im Versatz variiert und die möglicherweise aus Lösungseinschlüssen im Wirtsgestein zufließende (geringe) Menge unbekannt ist. Es ist davon auszugehen, dass die Versatzfeuchtigkeit in der Nähe der Behälter während der frühen Nachbetriebsphase aufgrund der hohen Behältertemperatur verdampft. Unklar ist, ob der Wasserdampf in der Nähe der Behälter bleibt und hier später wieder kondensiert oder ob er abfließt. Weiterhin ist der Umfang der gasinduzierten Feuchtigkeitsverdrängung im Versatz und ihre Rückwirkung auf die Verfügbarkeit der Feuchtigkeit für die Korrosion ungewiss. Im Labor ermittelte Korosionsdaten sind zudem meist nicht direkt auf die In-situ-Bedingungen übertragbar.

Im Fall eines Lösungszutritts sind sowohl Art, Umfang und Zeitpunkt dieses Ereignisses ungewiss wie auch das sich einstellende geochemische Milieu. Entsprechende Daten wurden z.B. bei der Flutung von Salzbergwerken gewonnen, die aber nicht unmittelbar auf den Referenzstandort übertragbar sind. Da das geochemische Milieu auch die Gasbildung steuert, ergeben sich hieraus auch für dieses Szenario Ungewissheiten bezüglich der gebildeten Gasmengen.

Modellierungsstrategie

Im Integritätsnachweis für die geotechnischen Barrieren werden die oben dargestellten Datenungewissheiten durch „konservative“ Annahmen abgedeckt, wobei bei Datenbandbreiten jeweils die ungünstigen, abdeckenden Grenzwerte unterstellt werden. So können für Brennelemente mit höherem Abbrand durch Modellrechnungen „abdeckende“ Inventare und Wärmekurven ermittelt werden. Im Bezug auf die Wiederaufarbeitungsabfälle können die „abdeckenden“ Garantie- und Nominalwerte der Wiederaufarbeitungsbetriebe für die Abfallinventare verwendet werden. Die Abschätzung der Entwicklung des geochemischen Milieus basiert auf den Ergebnissen von In-situ und Laboruntersuchungen sowie auf Modellrechnungen.

Modellungewissheiten

Die Festlegung „abdeckender“ Annahmen ist schwierig, da dies eine quantitative Abschätzung möglicher Ungewissheiten voraussetzt, die aber nicht in jedem Fall mit hinreichender Sicherheit möglich ist. Auch die Definition „konservativer“ Annahmen ist

nicht immer möglich, da manche Prozesse ambivalent sind, d.h. sie können im Bezug auf den einen Prozess konservativ sein, im Bezug auf einen anderen aber nicht. So führt die Behälterkorrosion zur Gasbildung, doch kann sich z.B. bei dickwandigen POLLUX-Behältern eine Schicht aus Korrosionsprodukten bilden, die einen weiteren Korrosionsfortschritt verhindert. Der Prozess wird im Modell nicht abgebildet.

Weitere Prozesse im Nahfeld der Einlagerungsbereiche, die z. Z. noch nicht modellmäßig abgebildet werden können:

- das Verdampfen der Versatzfeuchte in Behälternähe,
- die Thermomigration, die die Wanderung von Lösungseinschlüssen im Salz zum heißen Behälter beschreibt, und
- die Feuchtigkeitsverdrängung im Versatz durch Gas, durch die die Korrosion bei einer bestimmten Intensität der Gasbildung zum Erliegen kommt, weil die Feuchtigkeit nicht mehr in Kontakt zum Behälter kommt.

Parameterungewissheiten

Die Parameterungewissheiten für die Wärmeproduktion ergeben einerseits aus Ungewissheiten bzgl. der Behälterinventare von Wiederaufarbeitungsabfällen sowie der genauen Spezifikationen künftiger Brennelemente und andererseits aus der Verwendung empirisch definierter Referenz-Brennelemente für zukünftig erwartete BE-Typen.

Bezüglich der Gasbildung ergeben sich Parameterungewissheiten hinsichtlich der Versatzfeuchte, der Korrosion, der Abfallinventare und der Entwicklung des geochemischen Milieus.

Szenarienungewissheiten

Die Gasbildung und die Wärmeentwicklung sind zwei wesentliche Prozesse für die zukünftige Entwicklung des Endlagerstandorts. Die Gasbildung bestimmt den Fluiddruck, der eine wesentliche Lastannahme für die Auslegung der geotechnischen Barrieren darstellt und auch die Konvergenz und die Versatzkompaktion beeinflusst. Durch die Wärmeentwicklung werden die Spannungsverhältnisse im Gebirge beeinflusst, die sich auf die geotechnischen Barrieren auswirken. Durch die Ungewissheiten bezüglich des Ablaufs und der Intensität der Gasbildung und der Wärmeentwicklung ergeben sich auch Ungewissheiten bei der Szenarienentwicklung.

6.2.3 Systemkomponente: Grubenbaue

Im Hinblick auf die Integrität der geotechnischen Barrieren sind vor allem folgernde Phänomene relevant, die die Systemkomponente „Grubenbaue“ beeinflussen: Gebirgsdruck und Konvergenz, Auflockerungszone sowie die Gasfreisetzung.

Allgemeine Beschreibung

<u>Phänomene: Gebirgsdruck und Konvergenz</u>

Der lithostatische Gebirgsdruck leitet sich aus der Teufe und der Gesteinsdichte ab. In Folge der Störung des Primärspannungszustandes durch die Auffahrungen kommt es zu Spannungsumlagerungen im Gebirge und zur Konvergenz an der Hohlraumkontur. Durch dilatante Verformungen kann sich im hohlraumnahen Bereich eine Auflockerungszone ausbilden. In Grubenräumen mit kompaktiertem Versatz oder geotechnischen Barrieren baut sich ein Stützdruck auf, der der Konvergenz entgegen wirkt und zum Verschließen und Verheilen von Rissen führen kann. Die Konvergenz kommt zum Erliegen, wenn die Hohlräume durch die Versatzkompaktion und das Salzkriechen verschlossen sind.

Weitere Einwirkungen auf die Spannungsverhältnisse im Gebirge und auf die geotechnischen Barrieren ergeben sich aus der Aufheizung durch die wärmeproduzierenden Abfälle sowie zu späteren Zeiten durch den Fluiddruck infolge Gasdruck bzw. bei Alternativentwicklungen durch Lösungszutritte.

Phänomen: Auflockerungszone

Nach der Auffahrung von Grubenräumen steigen an der Hohlraumkontur die Axial- und Tangentialspannungen an und das Salz reagiert mit Rissbildungen und der Ausprägung einer Auflockerungszone. Aufgrund der erhöhten Sekundärpermeabilität ist die Auflockerungszone ein potenzieller Transportpfad für Fluide während der Nachbetriebsphase und somit von großer Bedeutung für die Funktionalität der geotechnischen Barrieren und für die Langzeitsicherheit. Die Risse der Auflockerungszone können sich wieder schließen, wenn die Hohlraumkontur auf kompaktierten Versatz oder geotechnische Barrieren konvergiert, die einen Stützdruck aufbauen.

Phänomen: Gasfreisetzung

Durch die Gasbildung und die Konvergenz wird sich der Fluiddruck in den Grubenbauen mit der Zeit erhöhen. Durch diesen Druckanstieg werden Gase aus den Grubenbauen freigesetzt. Dabei werden die Gase, sobald der erforderliche Gaseindringdruck erreicht ist, durch die Strecken- und Schachtverschlüsse freigesetzt. Außerdem kann das Gas auf fein verteilten Rissen in das Wirtsgestein eindringen.

Relevanz

Phänomene: Gebirgsdruck und Konvergenz

Um das anforderungsgerechte Funktionieren der geotechnischen Barrieren zu gewährleisten, ist es erforderlich, dass die Kontaktfläche Barriere/Gebirge sowie die Auflockerungszone verschlossen werden. Dies wird durch die Konvergenz sichergestellt, die zu einem Auflaufen des Gebirges auf die Barriere führt. Dabei werden sich die Kontaktfuge sowie die Risse im Gebirge schließen. Die geotechnischen Barrieren werden gegen den jeweiligen lithostatischen Druck ausgelegt.

Phänomen: Auflockerungszone

Da die Auflockerungszone ein potenzieller Transportpfad für Fluide ist, muss sie im Bereich der Verschlussbauwerke abgedichtet werden. Deshalb wird sie an den Einbaupositionen der Verschlussbauwerke durch besonders schonende Verfahren entfernt. Die dabei entstehende neue Auflockerungszone hat nur eine geringere Mächtigkeit und kann bei Bedarf durch Zementinjektionen abgedichtet werden.

Während der Nachbetriebsphase werden sich die Risse der Auflockerungszone dadurch schließen, dass die Hohlraumkontur auf kompaktierten Versatz oder geotechnische Barrieren, die einen Stützdruck aufbauen, konvergiert. Bei Anwesenheit von Feuchtigkeit ist ein Verheilen der Risse durch Kristallisation möglich. Falls auf den

Rissflächen Fluide eingeschlossen werden, ohne dass sie entweichen können, so kommt der Schließungsprozess zum Erliegen.

Phänomen: Gasfreisetzung

Eine Gasfreisetzung aus den Einlagerungsbereichen durch die geotechnischen Barrieren ist konzeptionell im Endlagerkonzept vorgesehen, um zu vermeiden, dass der Gasdruck den Fracdruck des Gebirges überschreitet. Die Verschlussbauwerke werden gegen den erwarteten Fluiddruck ausgelegt. Die für die Verschlussbauwerke vorgesehenen Baustoffe verfügen über Restporositäten/Restpermeabilitäten, die ein langsames Entweichen der Gase ermöglichen.

Datengrundlage

Phänomene: Gebirgsdruck und Konvergenz

Über die Gebirgsdruck und Konvergenz gibt es umfangreiche Erfahrungen aus dem Kali- und Steinsalzbergbau, die z.T. einen Zeitraum von 100 und mehr Jahren abdecken. Umfangreiche Konvergenzmessungen liegen außerdem aus dem Erkundungsbergwerk Gorleben vor, die sich allerdings auf einen Zeitraum von max. 25 Jahren beschränken. Hier wurde einerseits der Einfluss der geologischen Verhältnisse und andererseits der bergbaulichen Einflüsse auf die Konvergenz analysiert.

Das Auflaufen des Gebirges auf Verschlussbauwerke wurde an zwei Versuchsbarrieren im Bergwerk Asse untersucht (GLÄß ET AL. 2005, MEYER ET AL. 2008). Die Spannungsentwicklung in den Bauwerken wird dabei durch die Materialparameter des Baumaterials, thermische Effekte aus der Abbindereaktion des Betons, das Materialverhalten des umgebenden Salzgesteins insbesondere in der Auflockerungszone und das Konvergenzverhalten des Gebirges beeinflusst. Aufgrund hoher Konvergenzraten erfolgte auf dem Bergwerk Asse die Einspannung der Barrieren in das Gebirge in wenigen 100 Tagen. Der Druckausgleich zwischen dem Gebirge und der Barriere ist beim 18 Jahre alten Asse-Vordamm abgeschlossen, in der sechs Jahre alten Pilotströmungsbarriere auch auf Grund des Versuchsausbaus und des verwendeten, „weicheren“ Baustoffs noch nicht. Gleichwohl werden von beiden Barrieren die integralen Dichtheitsanforderungen an die Bauwerke und das umgebende Gebirge erfüllt.

Phänomen: Auflockerungszone

Neben dem Bergwerk Gorleben liegen auch aus dem Betrieb von Kali- und Steinsalzbergwerken sowie aus verschiedenen Forschungsprojekten zahlreiche Daten zur Beurteilung von Auflockerungszonen vor. Wie oben dargestellt, wurden im Bergwerk Asse zwei Versuchsdämme errichtet (GLÄß ET AL. 2005, MEYER ET AL. 2008), an denen das Verhalten der Barrieren und des angrenzenden Gebirges bei Druckbeaufschlagung un-

tersucht wurde. Die Risse der Auflockerungszone haben sich an beiden Fällen durch die Konvergenz geschlossen, eine Verheilung der Risse hat aber auch bei dem 18 Jahre alten Asse-Vordamm nicht stattgefunden. Daher ist ein erneutes Aufreißen der Risse bei höheren Fluiddrucken nicht ausgeschlossen.

Phänomen: Gasfreisetzung

Die Datenbasis für den Gasfluss stammt aus Laborversuchen. Die In-situ-Permeabilitätstests an den Versuchsbarrieren des Bergwerks Asse erfolgten nur mit Lösungen.

Datenungewissheiten

Phänomene: Gebirgsdruck und Konvergenz

Vor allen in anhydritreicheren Salzgesteinen, wie sie z.B. im ERAM auftreten, bestehen Ungewissheiten bezüglich des Zeitpunkts der Einspannung und der vollen Funktionsfähigkeit der Barrieren. Diese Gesteine erfordern eine längere Prolog-Phase bis die Barrieren voll funktionsfähig sind.

In anderen Bereichen des Grubengebäudes, die mit Salzgrus verfüllt sind, ergeben sich Datenungewissheiten bezüglich des zeitlichen Ablaufs der Konvergenz vor allem zu späten Zeiten. Probleme bereiten hier einerseits die Übertragung von kurzzeitigeren Konvergenzbeobachtungen auf lange Zeiträume und auf unterschiedliche Salzgesteinstypen sowie andererseits Ungewissheiten über den Verlauf der Salzgruskompaktion bei geringen Porositäten.

Phänomen: Auflockerungszone

Bezüglich der Entwicklung der Auflockerungszone bestehen Datenungewissheiten vor allem im Hinblick auf die hydraulische Leitfähigkeit und ihre Änderung über die Zeit (Selbstverheilen).

Phänomen: Gasfreisetzung

Es ungewiss, ob die Labor ermittelten Daten zum Gasfluss unmittelbar auf In-situ-Verhältnisse übertragbar sind.

Modellierungsstrategie

Phänomene: Gebirgsdruck und Konvergenz

Das derzeitige Barrierenkonzept sieht vor, dass die Verschlussbauwerke konturbündig eingebaut werden, damit sie kurzfristig funktionsfähig sind. Das Auflaufen des Gebirges auf die Barrieren erfolgt daher sehr rasch. Der Zeitpunkt des anschließenden Druckausgleichs zwischen Barriere und Gebirge hängt von den rheologischen Eigenschaften des Baumaterials und dem Kompaktionsgrad des Salzgrus in der angrenzenden Strecke ab. Untersuchungen an Versuchsbauwerken im Bergwerk Asse haben gezeigt, dass Dichtheitsanforderungen an Barriere, Kontaktzone und Auflockerungszone bereits nach wenigen 100 Tagen eingehalten werden.

Während die Anbindung der Barriere an das Gebirge im Bereich von Verschlussbauwerken durch die Konvergenz rasch erreicht ist, ist der Konvergenzverlauf im Bereich der mit Salzgrus verfüllten Strecken zu späten Zeiten unklar. Daher wird im Modell die Salzgruskompaktion bei den Werten abgebrochen, die bislang durch Versuche belegt sind (Grenzporosität: 1%, Permeabilität: 10^{-17} m^2).

Phänomen: Auflockerungszone

Der Nachweis der Dichtheit einer geotechnischen Barriere berücksichtigt die Strömungswiderstände der drei Elemente Abdichtkörper, Kontaktzone und Auflockerungszone. Über alle drei Elemente ist ein integrales Dichtheitskriterium einzuhalten. Um beanspruchungsabhängig das dilatante oder kontraktante Verhalten des Materials numerisch simulieren zu können, werden die Schädigungs- und Verheilungsgrenzen der Salzgesteine ermittelt und zusammen mit physikalischen Modellen zur Beschreibung des Schädigungs- und Verheilungsprozesses in die bestehenden Stoffmodelle integriert. Auflockerungszonen mit erhöhten Permeabilitäten können bei entsprechenden Spannungszuständen infolge einer Reduzierung der deviatorischen Gebirgsbeanspruchung durch Rückbildung der Schädigungen in ihrem mechanisch-hydraulischen Zustand wieder verbessert werden, z.B. durch konvergenzbedingten Kontaktspannungsaufbau im Bereich versetzter Grubenbaue oder von Schacht- und Streckenverschlüssen mit entsprechender Spannungsumlagerung.

Phänomen: Gasfreisetzung

Die Gasfreisetzung durch Gasfluss oder – bei Alternativszenarien – durch einen Zweiphasenfluss wird unter Berücksichtigung von Porosität und Permeabilität der Schacht- und Streckenverschlüsse sowie des Salzgrusversatzes durch ein physikalisches Strömungsmodell simuliert.

Modellungewissheiten

Der exakte Zeitpunkt, zu dem die Fuge zwischen Verschlussbauwerk und Gebirge dicht geschlossen ist, hängt von der Mineralogie und Geologie des Gebirges ab. Es ist ungewiss, welche hydraulischen Eigenschaften verschlossene Risse der Auflockerungszone aufweisen und ob es zum Verheilen der Risse kommt. Ungewiss ist außerdem, ob bzw. bei welchen Fluiddrucken die Risse später wieder aufreißen können.

Aufgrund von Modellungewissheiten wird die Versatzkompaktion im Modell bei einer Grenzporosität von 1% und einer Permeabilität von 10^{-17} m^2 abgebrochen. Es ist davon auszugehen, dass diese Werte konservativ sind, da die Porosität und Permeabilität des Salzgebirges noch nicht erreicht sind.

Parameterungewissheiten

Die Konvergenz ist ein wesentlicher Einflussfaktor für die Versatzkompaktion und bewirkt gleichzeitig das Auspressen von Lösungen und Gasen aus den Grubenräumen. Außerdem ist die Einspannung der Barrieren und dabei das Schließen der Kontaktzone und der Auflockerungszone durch die Konvergenz wichtig für die Funktionalität der Verschlussbauwerke. Die Parametrisierung der Langzeitentwicklung der Konvergenz ist aufgrund der geologischen Einflüsse und der Wechselwirkungen mit der Versatzkompaktion mit Ungewissheiten behaftet. Für den Versatz werden bei den Modellrechnungen die Werte zugrunde gelegt, die bislang durch Versuche belegt sind.

Für die Auflockerungszone können zurzeit die Parameter Permeabilität und Porosität in Abhängigkeit vom Schädigungsgrad nicht hinreichend genau quantifiziert werden. Außerdem ist deren zeitliche Entwicklung in Abhängigkeit von den sich ändernden Spannungsrandbedingungen nicht hinreichend bekannt.

Szenarienungewissheiten

Die oben dargestellten Ungewissheiten der Konvergenzprognose wirken sich auf eine Vielzahl von Prozessen im zukünftigen Endlagersystem aus und führen somit zu Szenarienungewissheiten.

In ähnlicher Weise führen die Ungewissheiten bezüglich der Langzeitentwicklung der hydraulischen Eigenschaften der Auflockerungszone zu entsprechenden Ungewissheiten bei der Charakterisierung der Szenarien..

6.3 Ungewissheiten im Bezug auf die Bewertung von Freisetzungsszenarien

Bei allen Phänomenen, die als relevant für die Bewertung von Freisetzungsszenarien eingestuft werden, muss überprüft werden, ob und inwieweit sie mit Ungewissheiten behaftet sind. Dabei sind die eingangs des Kapitels 6 zusammengetragenen Punkte 1 bis 9 abzuarbeiten.

Die Bearbeitung erfolgt beispielhaft für das Phänomen Konvergenz, einen der wesentlichen Prozesse für die Entwicklung eines Endlagersystems in Salz.

Allgemeine Beschreibung

Das plastische Verhalten des Salzgesteins unter Gebirgsdruck verursacht einen Konvergenzprozess, bei dem das Salz in die Hohl- und Porenräume[1] des Endlagers eindringt (→ siehe FEP Konvergenz). Die Konvergenzrate beschreibt die Geschwindigkeit dieses Prozesses.

Relevanz

Bei nahezu wasserfreien Salzformationen führt die Konvergenz durch die Verkleinerung des Volumens der Hohlräume in einem HAW-Endlager in der Regel innerhalb verhältnismäßig kurzer Zeit zu einer Kompaktion des Versatzes und zu einem Verschließen der Resthohlräume. In diesem Fall kommt es nicht zu einem Kontakt von Lösung und den Abfällen.

Unterstellt man dagegen einen Lösungszutritt in das Grubengebäude bis zu den Einlagerungsbereichen, stellt die Konvergenz einen Antriebsmechanismus für eine Schadstofffreisetzung durch Auspressen kontaminierter Lösung aus dem Grubengebäude dar. Die treibende Kraft für den Lösungsstrom innerhalb des Grubengebäudes ist während der Zuflussphase zunächst der hydraulische Gradient. Sobald Hohlräume vollständig mit Lösung gefüllt sind, führt die Konvergenz durch die stetige Verringerung der Hohlraumvolumina zu einem Auspressen der Lösung aus diesen Hohlräumen und damit zu einem advektiven Transport von eventuell mobilisierten Schadstoffen.

Die Konvergenz des Salzgesteins spielt eine bedeutsame Rolle für alle Komponenten des Sicherheitskonzeptes, da davon ausgegangen wird, dass dieser Prozess die Kompaktion des Versatzes soweit führt, dass keine Lösung die Einlagerungsbereiche erreichen kann. Die Auslegung der geotechnischen Barrieren hinsichtlich ihrer hydrauli-

[1] Im Folgenden werden Hohl- und Porenräume unter dem Begriff „Hohlräume“ subsumiert.

schen Eigenschaften und der Langzeitstabilität ist abhängig von dem Verhalten der Kompaktion des Versatzes.

Die Relevanz der Konvergenz für die Konsequenzenanalyse wurde sowohl in generischen Studien als auch in Studien für konkrete Endlagerstandorte nachgewiesen, z.B. (BUHMANN ET AL. 2004).

Datengrundlage

Messungen von Konvergenzraten im Salz erfolgten in der Schachtanlage Asse II, im Endlager Morsleben und am Erkundungsstandort Gorleben sowie in vielen Gewinnungsbergwerken (BLASE ET AL. 1989). Dafür werden in der Regel Querschnitte definiert, in denen einen Reihe von Konvergenzbolzen montiert werden, zwischen denen Längenänderungen bestimmt werden können. Gemessene Konvergenzraten sind dabei je nach Standort, Spannungsverhältnissen im Gebirge, Lithologie des Gesteins und Alter der Hohlräume um mehrere Größenordnungen unterschiedlich, Z.B. BACKHAUS ET AL. 1997, REMPE 2007.

Auf der Erkundungssohle im Salzstock Gorleben wurden vertikale Verformungsraten im Hauptsalz von bis zu 7 mm/(m·a) gemessen (bezogen auf die Länge der Messstrecke). Die hohen Verformungsraten werden vor allem im Knäuelsalz z2HS1 erreicht. In den Schichten des Zechstein 3 treten deutlich kleinere Werte (unter 1 mm/(m·a)) auf. Die horizontalen Verformungsraten sind in der Regel um einen Faktor 1,2 bis 2 kleiner als die vertikalen Verformungsraten (HESSER ET AL. 2008).

Die Datengrundlage (u.a. deren Variabilität) ist letztendlich aber immer nur vor Ort zu erbringen, Verhältnisse an anderen Standorten sind nur wenig aussagekräftig.

Datenungewissheiten

Messungen der Konvergenzraten während der Betriebsphase sind störanfällig, die entsprechenden Einflüsse werden aber bei den Auswertungen berücksichtigt. Die Genauigkeit solcher Konvergenzmessungen liegt bei traditionellen Verfahren bei ungefähr ±0,5 mm, neuere Messgeräte geben Genauigkeiten von bis zu ±0,02 mm an.

Modellierungsstrategie

Für die mathematische Beschreibung der Konvergenz und die entsprechende numerische Umsetzung (HIRSEKORN ET AL. 1999) wird angenommen, dass die Verkleinerung des Volumens eines Hohlraums zu jeder Zeit proportional zu dem zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Volumen des Hohlraums ist

$$\frac{dV}{dt}V(t) = -K \cdot V(t) \tag{3.1}$$

Die (Volumen-)Konvergenzrate K hängt im allgemeinen vom Fluiddruck, von der Porosität des Versatzmaterials und von der Temperatur des umgebenden Gebirges ab. Näherungsweise wird für die Konvergenzrate ein Produktansatz verwendet, bei dem die einzelnen Faktoren jeweils nur vom Fluiddruck *p*, von der Porosität ϕ bzw. von der Temperatur *T* (bei einem HAW-Endlager) abhängen

$$K = K_{ref} \cdot f_p(p) \cdot f_\phi(\phi) \cdot f_T(T) \tag{3.2}$$

Weitere Abhängigkeiten können in diesem Produktansatz berücksichtigt werden, z.B. Abhängigkeiten von lokalen Eigenschaften f_{lok} des umgebenden Salzgesteins oder eine „explizite" Zeitabhängigkeit des Konvergenzprozesses f_t (NOSECK ET AL. 2005)

$$K = K_{ref} \cdot f_p(p) \cdot f_\phi(\phi) \cdot f_T(T) \cdot f_{lok} \cdot f_t \tag{3.3}$$

Diese beiden letztgenannten Abhängigkeiten wurden im Projekt ISIBEL nicht verwendet und werden hier nicht weiter diskutiert.

Die Referenzkonvergenzrate K_{ref} gibt die Konvergenzrate für einen offenen, nicht mit Lösung gefüllten Hohlraum bei Referenztemperatur wieder, der sich in der Referenztiefe (mit entsprechendem Referenzdruck) befindet. Die für die beschriebenen Abhängigkeiten verwendeten Funktionen basieren auf folgenden Parametern (HIRSEKORN ET AL. 1999):

- Die Funktion zur Berücksichtigung des Fluiddrucks hängt vom Gebirgsdruck und dem Fluiddruck in der betrachteten Tiefe ab und basiert auf dem Stoffgesetz für sekundäres Kriechen für Steinsalz und dem entsprechenden Exponenten
- Die Funktion zur Berücksichtigung der Porosität des Versatzmaterials stützt sich ebenfalls auf das Stoffgesetz für sekundäres Kriechen unter Verwendung des Parameters Referenzporosität
- Die Temperaturfunktion basiert auf einem Arrhenius-Term unter Verwendung von Aktivierungsenergien der Kriechprozesse, dem geothermischen Temperaturgradienten und der Gebirgstemperatur

Modellungewissheiten

Die Aufteilung der Konvergenzrate in eine Referenzkonvergenzrate und verschiedene Einflussfunktionen basiert nicht auf einer physikalisch basierten Ableitung allgemein

gültiger Naturgesetze und muss als solches als konzeptionelles Modell gesehen werden, auch wenn die beeinflussenden Funktionen auf physikalischen Gesetzen basieren. Vertrauen in das Modell kann nur mit einem Vergleich gegen gemessene Daten oder Ergebnisse anderer Modellansätze erreicht werden. Hierfür stehen allerdings nur vergleichsweise kurze Zeiträume zur Verfügung.

Neben diesen Einflussgrößen spielt noch die Frage eine Rolle, wie sich das Modell unter geänderten Randbedingungen verhält, z.B. bis zu welcher Porosität die Konvergenz (Grenzporosität des Versatzes) andauert.

Parameterungewissheiten

Der Parameter, auf den hier eingegangen werden soll, ist die Referenzkonvergenzrate. Alle anderen Einflussgrößen werden in den Beschreibungen anderer Phänomene wiedergegeben.

Die Referenzkonvergenzrate gibt die Konvergenzrate für einen offenen, nicht mit Lösung gefüllten Hohlraum bei gegebenem Gebirgsdruck und gegebener Temperatur wieder. Sie lässt sich an beliebigen Positionen im Endlager mit markscheiderischen Methoden bestimmen. In der Regel werden daraus horizontale und vertikale Konvergenzraten ermittelt. Dafür werden z.B. über längere Zeiträume konstante Konvergenzen als Mittelwerte angesetzt. Je länger der Zeitraum der Messung, desto zuverlässiger die ermittelten Werte für Langzeitsicherheitsbetrachtungen. Für den hier vorgestellten Modellierungsansatz müssen die ermittelten Konvergenzraten zusätzlich noch in eine volumenbezogene Konvergenzrate überführt werden. Bei der Ermittlung der volumetrischen Konvergenzrate aus den horizontalen und vertikalen Konvergenzraten wird in der Regel vereinfacht davon ausgegangen, dass die horizontale Konvergenzrate in alle Richtungen gleich ist. Diese Annahme ist für komplexe Grubengebäude schwer zu überprüfen.

Diese Transformationen beinhalten demnach ein schwer zu quantifizierendes Maß an Ungewissheiten. Zusätzlich zu den Messungen der Verformungen eines Hohlraums werden auch gebirgsmechanische Modellrechnungen eingesetzt, um die Datengrundlage besser abzusichern. Auf Grund der Tatsache, dass man sich sowohl auf Messungen als auch auf Modellrechnungen stützen kann, ist die Informationsgrundlage dieses Parameters als ausgesprochen gut zu bezeichnen.

Bei der Modellierung mit einem integrierten Modell taucht ein weiteres räumliches Skalierungsproblem auf, da es nicht möglich ist, die kleinräumigen Änderungen auf der Ebene eines integrativen Modells so gut wiederzugeben wie mit den felsmechanischen Rechnungen auf Prozess-Level-Ebene. Im integrativen Modell EMOS (BUHMANN 1999) wird beispielsweise für jedes Grubenbausegment global ein Wert für die Referenzkonvergenzrate vorgegeben. Damit können z.B. lithologische Unterschiede (z.B. Material-

eigenschaften wie unterschiedliche Kriechklassen) auch bei Verwendung der Funktion f_{lok} nur sehr eingeschränkt erfasst werden.

Szenarienungewissheiten

Ein zeitliches Skalierungsproblem taucht bei der Extrapolation der Konvergenzrate auf die in der Sicherheitsanalyse notwendigen langen Zeiträume auf. Es ergeben sich erhebliche Ungewissheiten, da die Ausprägung vieler Einflussgrößen (z.B. Versatzkompaktion) und das komplexe Zusammenspiel dieser Größen nicht mehr vollständig abzubilden ist. Für längere Zeiträume lassen sich zudem die Modellvorstellungen nicht mehr gegen Messungen validieren. Auch die Modellannahme, dass die Konvergenzraten über längere Zeiträume konstant sind, ist nicht mehr nachzuprüfen.

Abschließende Beurteilung

Die Beschreibung und Modellierung der Konvergenzrate ist eine der entscheidenden Aufgaben bei der Beurteilung der Sicherheit eines Endlagersystems in einer Salzformation. Die Behandlung der Ungewissheiten bezüglich der sich ändernden Randbedingungen ist bei einem komplexen Phänomen mit vielen Einflussgrößen wie der Konvergenz vor allem durch die Entwicklung eines möglichst umfassenden Satzes an Szenarien möglich.

Bei der Bewertung nicht auszuschließender Freisetzungsszenarien muss der Einfluss der im Ansatz verwendeten Parameter wie Referenzkonvergenzrate, Grenzporosität, Druck und Temperatur durch Variationsrechnungen untersucht werden. Aufgrund der beschriebenen Ungewissheiten, die sich nur zum Teil durch weitere Untersuchungen beseitigen lassen, ist zusätzlich zu deterministischen Rechnungen die Bestimmung von Bandbreiten dieses Phänomens für probabilistische Rechnungen erforderlich. Der Einsatz von konservativen Werten in deterministischen Rechnungen ist oft nicht möglich, da der Einfluss der Konvergenzrate auf die Sicherheit des Endlagers nicht immer eindeutig ist.

6.4 Zusammenstellung relevanter Phänomene

Da nicht alle Ungewissheiten zum gegenwärtigen Zeitpunkt wie in den detaillierten Beispielen in den vorherigen Kapiteln aufgeschlüsselt werden können, sind sie in einer Tabelle zusammengefasst. In der Tab. 6.1 haben die Spalten folgende Bedeutung:

- Systemkomponente: Diese Spalte dient der Zuordnung der einzelnen Phänomene (2. Spalte) zu den unterschiedlichen Gegebenheiten in Teilsystemen des Endlagersystems. Unterschieden werden: Abfallgebinde, Deck- und Nebengebirge, Grubenbaue, Grundwasser, Lösungen im Grubenbau, Schacht- und Streckenverschlüsse, Versatz und Salzgestein.

- Phänomen: Das Phänomen wird genannt, auf das sich die Ungewissheit bezieht. Um den Bezug zum FEP-Katalog aufzuzeigen, sind zusätzlich die FEPs angegeben, in denen das betrachtete Phänomen beschrieben ist.
- Relevanz für Nachweiskomponenten: Das Phänomen wird hinsichtlich seiner Relevanz für den Sicherheitsnachweis bewertet. Unterschieden werden: Integritätsnachweis der geologischen Barriere, Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren, Nachweis des sicheren Einschlusses und die Bewertung nicht auszuschließender Freisetzungsszenarien (s.o.).

Für jede Abfassung eines Safety Case sollten die Ungewissheiten gemäß den in Kapiteln 6.1 bis 6.3 vorgestellten Beispielen entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik beschrieben werden. Eine zusammenfassende Tabelle kann aber auch in einem Langzeitsicherheitsnachweis als anschauliche Übersicht der Ungewissheiten dienlich sein.

Tab. 6.1: Relevanz identifizierter Ungewissheiten für die Komponenten des Sicherheits- und Nachweiskonzepts

Systemkomponente	Phänomen behandelt in FEP	Relevanz für Nachweiskomponenten			
		Integrität geolog. Barriere	Integrität geotechn. Barriere	Sicherer Einschluss	Bewertung Freisetzung
Abfallgebinde	Inventar Inventar: Radionuklide Inventar: Metalle Inventar: Organika Inventar: Sonstige Stoffe Radionuklid-Mobilisierung			x	x
Abfallgebinde	Temperatur Wärmeproduktion	x	x	x	x
Abfallgebinde	Instant Release Fraction Radionuklid-Mobilisierung				x
Abfallgebinde	Matrixkorrosion Matrixkorrosion				x
Abfallgebinde	Behälterstandzeiten Behälter Metallkorrosion Geochemisches Milieu im Grubenbau Lösungen im Grubenbau Unplanmäßige Ereignisse in der Betriebsphase Materialversprödung durch Strahlung				x
Abfallgebinde	Mechanische Integrität der Behälter Behälter Spannungsänderung und Spannungsumlagerung Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein				x
Abfallgebinde	Gasbildung Gasbildung Gaseindringdruck Gasförmige Radionuklide Gasmenge im Grubenbau Geochemisches Milieu im Grubenbau Gasspeichervolumen	x	x	x	x
Abfallgebinde	Rückhaltung an Korrosionsprodukten Geochemisches Milieu im Grubenbau Matrixkorrosion Metallkorrosion Sorption, Desorption				x
Grubenbaue	Unplanmäßige Ereignisse in der Betriebsphase Kokillensticking und –absturz Unplanmäßige Ereignisse in der Betriebsphase			x	x

Systemkomponente	Phänomen behandelt in FEP	Relevanz für Nachweiskomponenten			
		Integrität geolog. Barriere	Integrität geotechn. Barriere	Sicherer Einschluss	Bewertung Freisetzung
Grubenbaue	Gebirgsdruck Konvergenz Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	x	x	x	x
Grubenbaue	Konvergenz Konvergenz Spannungsänderung und Spannungsumlagerung Porosität	x	x	x	x
Grubenbaue	Gasfreisetzung Gasfreisetzung aus Grubenbau Gasmenge im Grubenbau	x	x	x	x
Lösungen im Grubenbau	Geochemisches Milieu Geochemisches Milieu im Grubenbau			x	x
Lösungen im Grubenbau	Mikrobielle Prozesse Mikrobielle Prozesse im Grubenbau			x	x
Lösungen im Grubenbau	Kolloide Kolloide			x	x
Lösungen im Grubenbau	Löslichkeiten Radionuklid-Mobilisierung Auflösung und Ausfällung			x	x
Lösungen im Grubenbau	Radiolyse Radiolyse			x	x
Lösungen im Grubenbau	C-14 Speziation Radionuklid-Mobilisierung Radioaktive organische Spezies			x	x
Versatz	Grenzporosität Konvergenz Porosität			x	x
Versatz	Referenzporosität Konvergenz Porosität			x	x
Versatz	Permeabilität Permeabilität Porosität			x	x
Versatz	Feuchte Versatz				x
Versatz	Dispersionslängen Mechanische Dispersion Porosität				x
Strecken- und Schachtverschlüsse	Errichtung von Barrieren Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses Versagen eines Strecken- oder Schachtverschlusses		x	x	x
Strecken- und Schachtverschlüsse	Geologie am Barrierenstandort Fehlinterpretierte Erkundungsergebnisse Unerkannte Merkmale		x	x	x

Systemkomponente	Phänomen behandelt in FEP	Relevanz für Nachweiskomponenten			
		Integrität geolog. Barriere	Integrität geotechn. Barriere	Sicherer Einschluss	Bewertung Freisetzung
Strecken- und Schachtverschlüsse	Wiederaufsättigung des Bentonits Verschlussmaterial Durchströmung von geotechn. Barrieren Quellen des Bentonits		x	x	
Strecken- und Schachtverschlüsse	Transportprozesse im Bentonit Radionuklid-Transport in der flüssigen Phase Radionuklidtransport in der Gasphase Diffusion Gaseindringdruck Sorption, Desorption			x	x
Strecken- und Schachtverschlüsse	Baustoffeigenschaften Verschlussmaterial Durchströmung von geotechnischen Barrieren Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien		x	x	x
Strecken- und Schachtverschlüsse	Abdichtung von Barrieren Verschlussmaterial		x	x	x
Strecken- und Schachtverschlüsse	Chemische und mechanische Langzeitstabilität der Bau- / Dichtmaterialien Verschlussmaterial Klüfte im Wirtsgestein Einfluss geologischer Änderungen auf die Hydrogeologie Erdbeben Globale klimatische Veränderungen		x	x	x
Strecken- und Schachtverschlüsse	Lösungstransport durch die Strecken- / Schachtverfüllung und die EDZ Durchströmung von geotechnischen Barrieren Geochemisches Milieu im Grubenbau Auflockerungszone		x	x	x
Strecken- und Schachtverschlüsse	EDZ im Bereich von Barrieren Auflockerungszone Durchströmung von geotechnischen Barrieren		x	x	x
Strecken- und Schachtverschlüsse	Gastransport durch die Strecken- / Schachtverschlüsse Durchströmung von geotechnischen Barrieren Gaseindringdruck Gasfreisetzung aus Grubenbauen		x	x	x

Systemkomponente	Phänomen behandelt in FEP	Relevanz für Nachweiskomponenten			
		Integrität geolog. Barriere	Integrität geotechn. Barriere	Sicherer Einschluss	Bewertung Freisetzung
Strecken- und Schachtverschlüsse	Permeabilität Permeabilität		x	x	x
Strecken- und Schachtverschlüsse	Gaseindringdruck Gaseindringdruck	x		x	x
Salzgestein	Aufstiegsraten Salzgestein und regionale Tektonik Diapirismus	x			x
Salzgestein	Streckenkonvergenz Konvergenz		x	x	x
Salzgestein	Lösungszutritt Lösungszutritt in Grubenbaue			x	x
Salzgestein	Erkundungsbohrungen Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen	x			x
Salzgestein	Sorptionskoeffizienten Sorption, Desorption Geochemisches Milieu im Grubenbau				x
Salzgestein	Gaseindringdruck Gaseindringdruck	x			
Salzgestein	Wärmeleitfähigkeit Wärmeproduktion Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein	x			x
Salzgestein	Kriechen Wirtsgestein Konvergenz		x		x
Salzgestein	Chemische Auflösung von Salzgesteinen (Salzspiegel) Subrosion Inlandvereisung in randlicher Lage	x			x
Salzgestein	Mechanische Abtragung von Salzgesteinen (Salzspiegel) Vollständige Inlandvereisung Erosion	x			x
Salzgestein	Abgrenzung von Homogenbereichen Fluidvorkommen im Wirtsgestein Klüfte im Wirtsgestein Lösungsmigration im Wirtsgestein	x		x	x

Systemkomponente	Phänomen behandelt in FEP	Relevanz für Nachweiskomponenten			
		Integrität geolog. Barriere	Integrität geotechn. Barriere	Sicherer Einschluss	Bewertung Freisetzung
Salzgestein	Potentielle Migrationspfade (Salzspiegel) Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein Permafrost Inlandvereisung in randlicher Lage Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen Klüfte im Wirtsgestein	x			x
Salzgestein	Potentielle Migrationspfade (Hauptanhydrit) Fluidvorkommen im Wirtsgestein Klüfte im Wirtsgestein Lösungsmigration im Wirtsgestein Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein	x			x
Salzgestein	Lösungszutritt aus Lösungseinschlüssen Lösungszutritt in Grubenbaue Fehlinterpretierte Erkundungsergebnisse Auflockerungszone			x	x
Salzgestein	Inhomogenitäten / Störungen Klüfte im Wirtsgestein Unerkannte Merkmale Lösungsmigration im Wirtsgestein	x		x	x
Deck- und Nebengebirge	Aufstiegsraten Salzgestein und regionale Tektonik Diapirismus Transgression/Regression Sedimentation				x
Deck- und Nebengebirge	Auswirkung klimatischer Veränderungen Globale klimatische Veränderungen Inlandvereisung in randlicher Lage Vollständige Inlandvereisung Permafrost Transgression/Regression Erosion Sedimentation				x
Deck- und Nebengebirge	Ausbreitungspfad Deck- und Nebengebirge				x

Systemkomponente	Phänomen behandelt in FEP	Relevanz für Nachweiskomponenten			
		Integrität geolog. Barriere	Integrität geotechn. Barriere	Sicherer Einschluss	Bewertung Freisetzung
Deck- und Nebenge-birge	Sorptions-koeffizienten Sorption, Desorption Hydrochemische Verhält-nisse im Deck- und Ne-bengebirge				x
Deck- und Nebenge-birge	Porosität Porosität				x
Deck- und Nebenge-birge	Permeabilitäten Permeabilität Porosität				x
Deck- und Nebenge-birge	Dispersionslänge Mechanische Dispersion Porosität				x
Deck- und Nebenge-birge	Matrixdiffusion Matrixdiffusion				x
Grundwasser	Geochemisches Milieu Hydrochemische Verhält-nisse im Deck- und Ne-bengebirge				x
Grundwasser	Löslichkeiten Auflösung und Ausfällung				x
Grundwasser	Grundwasserfluss Geosphäre: GW-Strömung				x
Grundwasser	Diffusionskoeffizient Diffusion				x
Grundwasser	Kolloide Kolloide				x
Grundwasser	Mikrobielle Prozesse Mikrobielle Prozesse in der Geosphäre				x

7 Behandlung nicht zu vermeidender Ungewissheiten

Die Behandlung von Ungewissheiten lässt sich in drei übergeordnete Arbeitsschritte einteilen:

1. Vermeidung und Reduzierung von Ungewissheiten bei der Standortauswahl und Endlagerauslegung
2. Identifizierung der relevanten Phänomene und den zugehörigen nicht zu vermeidenden Ungewissheiten
3. Behandlung von nicht zu vermeidenden Ungewissheiten

In diesem Kapitel sollen für die Komponenten des Sicherheitsnachweises die wesentlichen Werkzeuge beschrieben werden.

Gemäß der einleitend beschriebenen allgemeinen Strategie zur Behandlung von Ungewissheiten stellt die Identifizierung der Ungewissheiten bezüglich der Daten, Modelle und Szenarien in Kapitel 6 die grundlegende Voraussetzung dar. Zusätzlich wurden dort die identifizierten Ungewissheiten hinsichtlich ihrer Relevanz für das Sicherheitskonzept bewertet.

In diesem Kapitel werden die Methoden vorgestellt, die im Langzeitsicherheitsnachweis benutzt werden können, um Ungewissheiten detaillierter zu beurteilen und gegebenenfalls zu quantifizieren. In einigen Fällen ist es eventuell möglich, eine Strategie zu entwickeln, die Ungewissheiten zu reduzieren. An diesem Punkt spielt es eine Rolle, ob es sich um aleatorische oder epistemische Ungewissheiten handelt. Aleatorische Ungewissheiten lassen sich mit Hilfe stochastischer Methoden objektiv quantifizieren, dafür kann man sie nicht reduzieren. Anders sieht es aus bei den epistemischen Ungewissheiten: Hier ist die Quantifizierung der Ungewissheiten in der Regel schwieriger, dafür existieren Möglichkeiten zu deren Reduzierung.

7.1 Behandlung von Ungewissheiten im Integritätsnachweis für die geologische Barriere

Zur Berücksichtigung ihrer Ungewissheit werden die sicherheitsrelevanten Merkmale der geologischen Standortbeschreibung im Integritätsnachweis für die geologische Barriere zielgerichtet variiert. Da für die Sicherheit eines Endlagers am Referenzstandort die meisten Ungewissheiten in der geologischen Standortbeschreibung für die Sicherheitsaussage nicht relevant sind, ist eine generelle Variation der im geologischen Standortmodell vorhandenen Informationen innerhalb der quantifizierten Ungewissheiten nicht sachgerecht. Stattdessen sind für eine zielgerichtete und abdeckende Be-

rücksichtigung der Ungewissheiten in der geologischen Standortbeschreibung die folgenden Merkmale und Prozesse im Sicherheitsnachweis zielgerichtet zu variieren:

- Abstand des Einlagerungsbereichs von der Schichtgrenze z2/z3
- Größe von Hauptanhydritschollen
- Abstand zwischen Hauptanhydritschollen
- Chemische Auflösung von Salzgesteinen insbesondere im Bereich des Salzspiegels (Subrosionsrate)
- Mechanische Abtragung von Salzgesteinen im Bereich des Salzspiegels
- Salzaufstiegsrate
- Kompressionstektonik
- Kriechrate von Salz, Kompaktionsrate von Salzgrus
- Potentielle Migrationspfade für Radionuklide im Bereich des Salzspiegels
- Aufbau des Deck- und Nebengebirges
- Klimatische Entwicklung

Ungewissheiten über die Richtigkeit von bei der Konstruktion des geologischen Standortmodells zugrunde gelegten Vorstellungen über den Ablauf geogener Prozesse beim Aufstieg der Salzstruktur oder bei der Anlage von Störungen können im Sicherheitsnachweis nicht durch geeignete Variationen berücksichtigt werden. Fehleinschätzungen in diesem Bereich sind eher als Irrtum und weniger als Ungewissheit zu bezeichnen und müssen durch Maßnahmen zur Qualitätssicherung wie beispielsweise eine breite wissenschaftliche Absicherung durch Diskussion der Modellvorstellungen in Fachkreisen abgefangen werden.

Die zielgerichtete Variation eines Merkmals oder Prozesses im Integritätsnachweis setzt die Kenntnis seiner möglichen Variationsbreite voraus und erfordert daher die Quantifizierung seiner Ungewissheit. Wie schon in Kapitel 6.1 werden im Folgenden beispielhaft für den Integritätsnachweis für die geologische Barriere die Ungewissheiten im geologischen Standortmodell näher beschrieben und hier Möglichkeiten für ihre Quantifizierung beschrieben.

7.1.1 Quantifizierung der räumlichen Ungewissheiten im geologischen Standortmodell

Auch ein Modell, dessen generelle Gültigkeit Bestand hat, kann sich mit jedem weiteren Aufschluss im Detail weiter entwickeln. Der Umfang der Veränderungen, die an ei-

nem geologischen Modell erforderlich werden, um die Konsistenz mit den Erkenntnissen aus einer neuen Erkundungsbohrung zu gewährleisten, bietet einen Anhaltspunkt für die Genauigkeit des geologischen Modells. Im Zuge der bergmännischen Arbeiten im Endlager Morsleben werden seit Jahren immer wieder neue Aufschlüsse hergestellt, die mit dem gültigen geologischen Modell verglichen werden können. Dabei wurden überwiegend gute Übereinstimmungen festgestellt, teilweise aber auch Abweichungen im 10 m-Bereich. Bei einer Übertragung dieser Erfahrung auf den Referenzstandort ist zu beachten, dass es sich bei der Salzstruktur Morsleben um eine tief subrodierte Rumpfstruktur handelt. Der Salzstock am Referenzstandort besitzt dagegen eine andere Genese und befindet sich in einem völlig anderen Entwicklungsstadium, so dass der Internbau wesentlich einfacher zu interpretieren ist. Die Zuverlässigkeit und Genauigkeit des geologischen Modells für den Referenzstandort sind deshalb als besonders hoch einzuschätzen. Diese Einschätzung wurde belegt durch die Bohrung RB194, die am Referenzstandort von der Erkundungssohle aus 200 m in die Tiefe gestoßen wurde. Die Bohrung traf die lithologische Zieleinheit bis auf wenige Meter genau an der Stelle an, an der sie im geologischen Modell auf der Grundlage einer Extrapolation über 200 m platziert worden war.

Eine denkbare Möglichkeit für eine Quantifizierung der verbleibenden Ungewissheiten bezüglich der Lage von Schichtgrenzen im geologischen Standortmodell bestünde darin, einen Stand des geologischen Modells zu einem bestimmten Zeitpunkt mit einem veränderten Stand des Modells nach dem Vorliegen neuer Aufschlussdaten zu vergleichen und die Abweichungen in geeigneter Weise quantitativ zu dokumentieren, um dann die festgestellte Ungenauigkeit der im Modell ausgewiesenen Lage einer Schichtgrenze beispielsweise als Prozentwert bezogen auf die Entfernung zum nächsten Aufschluss anzugeben. Allerdings ist nicht nur diese Entfernung ausschlaggebend für die Genauigkeit, sondern auch die stratigrafische Position und die Güte und Dichte sonstiger Informationen beispielsweise aus elektromagnetischen Messungen. Deshalb ist es nicht möglich, die Genauigkeit des geologischen Modells als pauschalen Wert anzugeben, sondern sie müsste für jeden Bereich des Modells gesondert ermittelt und außerdem im Laufe der Erkundung angesichts des steigenden Informationsumfanges und der sich ändernden Informationsdichte permanent neu bewertet werden.

Eine generelle Quantifizierung der Ungewissheiten bezüglich der Lage von Schichtgrenzen im geologischen Standortmodell in Form statistischer Verteilungen erscheint daher nicht sachgerecht. Neben den Hindernissen bei der Ermittlung zweifelsfreier quantitativer Genauigkeitswerte im geologischen Standortmodell spricht der fehlende Nutzen gegen eine generelle Quantifizierung, da ermittelte Genauigkeitswerte für das geologische Standortmodell nicht als Eingangsgrößen in stochastischen Verfahren verwendet werden können. Angemessen für die Quantifizierung der Ungewissheiten im geologischen Standortmodell ist vielmehr die gezielte Ableitung der Genauigkeit derjenigen Details des geologischen Standortmodells, für die entweder aufgrund genereller Überlegungen oder aufgrund von Berechnungsergebnissen zum Integritätsnachweis eine besonders große Sicherheitsrelevanz erkannt wird.

Die Quantifizierung der Ungewissheit des geologischen Standortmodells für die vorgenannten sicherheitsrelevanten Modelldetails kann anhand der jeweils vorliegenden Aufschlussdichte und anhand des Umfanges der sonstigen vorliegenden Informationen als konservative Abschätzung erfolgen, die durch Vergleiche mit bekannten Genauigkeitswerten in analogen Situationen abgesichert werden können.

7.1.2 Berücksichtigung der räumlichen Ungewissheiten des geologischen Standortmodells im Sicherheitsnachweis

Anders als bei Parameterverteilungen, für deren Berücksichtigung standardisierte stochastische Verfahren etabliert sind, existieren solche Verfahren nicht für Ungewissheiten in einem geologischen Modell. Zwar kann mittels geostatistischer Methoden in Abhängigkeit von Aufschluss- und sonstiger Informationsdichte sowie örtlicher Varianz eines betrachteten Merkmals angegeben werden, mit welcher Zuverlässigkeit das Vorliegen bzw. die Ausprägung dieses Merkmal für einen bestimmten Ort des Modellgebietes benannt werden kann. Die Geostatistik ist also in der Lage, für ein geologisches Modell ähnliche Informationen zu liefern, wie sie für einen eindimensionalen Parameter durch die Angabe einer Verteilungsfunktion ausgedrückt werden kann. Die oben getroffene Feststellung zum Unterschied zwischen Parameterverteilungen und Ungewissheiten in einem geologischen Modell wurde daher nicht auf die Möglichkeiten, die Ungewissheiten zu ermitteln, sondern auf die Möglichkeiten, die Ungewissheiten zu berücksichtigen, bezogen.

Zur Berücksichtigung von Parameterverteilungen können mittels erprobter Techniken unterschiedliche Parametersätze erzeugt und für diese Parametersätze automatisiert eine bestimmte Berechnung, beispielsweise der wirksamen Spannungen, durchgeführt werden. Eine analoge Vorgehensweise zur Berücksichtigung der Ungewissheiten in einem geologischen Modell existiert nicht, da hierzu nach einer Variation von Schichtgrenzen im geologischen Modell eine automatisierte Erstellung des dem numerischen Modell zugrundeliegenden Gitternetzes für die Berechnung der Spannungen erfolgen müsste. Die Instrumente für eine solche automatisierte Erstellung eines Gitternetzes sind jedoch noch nicht ausgereift, insbesondere bei der Verwendung von Finite-Elemente-Modellen.

Eine Berücksichtigung der Ungewissheiten im geologischen Modell kann daher nur auf direktem Wege erfolgen, also dadurch, dass im Langzeitsicherheitsnachweis ein Standortmodell mit Eigenschaften, die im Rahmen der festgestellten Genauigkeiten variiert werden können, zugrunde gelegt wird. Es ist jedoch davon auszugehen, dass viele im Rahmen der Ungewissheiten des Modells mögliche Variationen ohne jeglichen Einfluss auf die Langzeitsicherheit bleiben. Beispielsweise würde eine Reduzierung der Salzbarriere durch eine unterstellte Tieferlegung des Salzspiegels um 10 m angesichts der dann immer noch mehrere 100 m betragenden Barrierenmächtigkeit keinerlei Sicherheitsrelevanz haben.

Deshalb werden zur Berücksichtigung der festgestellten Ungewissheiten im geologischen Standortmodell bezüglich der Lage von Schichtgrenzen zielgerichtet nur diejenigen Merkmale des Modells variiert, für die im Rahmen der möglichen Variationsbreite eine Sicherheitsrelevanz angenommen wird.

Eine solche Sicherheitsrelevanz wird angenommen für die folgenden Merkmale:

- Abstand der Einlagerungsbereiche von der Schichtgrenze z2/z3
- Abstand der Einlagerungsbereiche vom Carnallitit
- Abstand der Einlagerungsbereiche von Hauptanhydritschollen
- Größe von Hauptanhydritschollen
- Abstand zwischen Hauptanhydritschollen

Für Hauptanhydritschollen und die Schichtgrenze z2/z3 ist eine Sicherheitsrelevanz anzunehmen, da sie mögliche Migrationspfade darstellen. Außerdem können sie Lösungen enthalten und daher für die im Bergwerk verfügbare Wassermenge, von der wiederum verschiedene sicherheitsrelevante Prozesse abhängen, relevant sein. Der Abstand zum Carnallitit ist sicherheitsrelevant, da der Carnallitit unter den im Nahfeld maximal auftretenden Temperaturen von 200°C nicht stabil ist.

7.2 Behandlung von Ungewissheiten beim Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren

Eine grundlegende Voraussetzung für die Gewährleistung der Endlagersicherheit ist neben einer geeigneten Standortauswahl die technische Planung des Endlagers und die Auslegung seiner Komponenten in Übereinstimmung mit den Vorgaben des Sicherheitskonzeptes. Unter Berücksichtigung der auftretenden Ungewissheiten ist dabei nachzuweisen, dass diese Vorgaben mit ausreichender Zuverlässigkeit eingehalten werden. Als Maß der Zuverlässigkeit kann dabei die Wahrscheinlichkeit angesetzt werden, dass die Vorgaben des Sicherheitskonzeptes wegen der bestehenden Ungewissheiten nicht eingehalten werden und infolge höhere Konsequenzen eintreten können. Die zu fordernde Zuverlässigkeit steht somit im unmittelbaren Zusammenhang mit dem von einem Endlager ausgehenden akzeptierten Risiko.

Bei dem auf den sicheren Einschluss gerichteten Sicherheitskonzept für ein HAW-Endlager im Salzgestein spielen die Integritätsnachweise für die einschlusswirksamen Barrieren eine herausragende Rolle. Während für die geologische Hauptbarriere deren Integrität über den gesamten Nachweiszeitraum nachzuweisen ist, wobei für nicht aufgelockerte Bereiche des Salzgesteins absolute Dichtheit unterstellt wird, ist für die geotechnischen Barrieren (Schacht- und Streckenverschlüsse) in der Regel die Unter-

schreitung einer Vorgabe für die integrale Permeabilität über die gesamte geforderte Lebensdauer des Bauwerkes nachzuweisen.

Die zu berücksichtigenden Ungewissheiten sind vielfältig und in ihrer Wirkungsweise teilweise unterschiedlich. Sie reichen von Datenungewissheiten bei der Quantifizierung von Materialeigenschaften, geometrischen Abmessungen und Einwirkungsgrößen über Modellungewissheiten bei der Beschreibung integritätsrelevanter Prozesse bis hin zu Ungewissheiten, welche Einwirkungen wann, über welche Zeiträume sowie in welcher Kombination und Ausprägung zu erwarten sind.

Durchaus vergleichbare Problemstellungen gibt es auch bei der Planung und Auslegung sicherheitsrelevanter Einrichtungen in anderen Technikbereichen. Methodisch sind derartige Fragestellungen bisher am weitesten in der Bautechnik und hier insbesondere bei Tragfähigkeitsnachweisen durchdrungen worden. Die daraus abgeleiteten Regeln haben als Methode der Teilsicherheitsbeiwerte ihren Niederschlag in den Eurocodes (CEN 2002) gefunden und werden seit langem erfolgreich angewandt und ständig weiterentwickelt. Darüber hinaus finden sie auch Anwendung bei Bauwerken zum Schutz vor wassergefährdenden Stoffen (DAFSTB 1997).

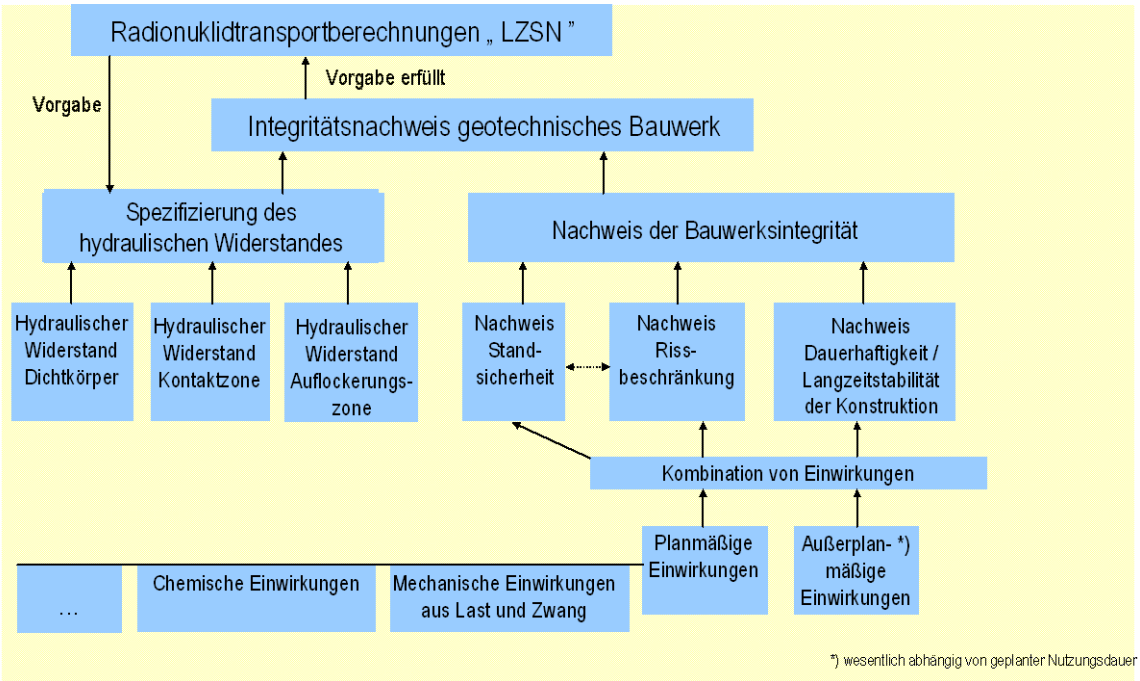

Abb. 7.1: Nachweisstruktur zur Wirksamkeit und Zuverlässigkeit einer geotechnischen Barriere (BUHMANN ET AL. 2008A). LZSN = Langzeitsicherheitsnachweis

Mit Erfolg wurden diese methodischen Ansätze auch auf die Planung und Auslegung sowie beim Nachweis der Wirksamkeit und Zuverlässigkeit der für die Stilllegung des ERAM (BFS 2009) vorgesehenen Abdichtbauwerke angewandt. Der wesentliche Un-

terschied zu einem Nachweis der sicherheitsgerichteten Funktion Tragfähigkeit für übliche Bauwerke besteht darin, das die sicherheitsgerichtete Funktion (Wirksamkeit bzw. Dichtheit) einer geotechnischen Barriere erst dann gewährleistet ist, wenn die Einhaltung mehrerer Anforderungen nachgewiesen ist: diese sind die Standsicherheit, die Rissbeschränkung und die Dauerhaftigkeit einerseits sowie der geforderte hydraulische Widerstande aller hydraulisch wirksamen Komponenten andererseits. Die sich ergebende Nachweisstruktur für eine geotechnische Barriere ist in Abb. 7.1 dargestellt.

Zur Erläuterung der Art und Weise der Berücksichtigung von Ungewissheiten mittels der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte wird diese zunächst grundsätzlich am Beispiel eines Tragsicherheitsnachweises und dann die Vorgehensweise und erzielbaren Ergebnisse für einen generischen Streckenverschluss im Salinar vorgestellt.

Das Sicherheitsnachweiskonzept der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte ist Stand der Technik und ist im Regelwerk der Eurocodes für die Bautechnik auf europäischer Ebene vereinheitlicht. Es gilt in Verbindung mit den nationalen Anwendungsdokumenten in den Ländern der EU. Den Eurocodes liegt ein semiprobabilistisches, zuverlässigkeitsorientiertes Sicherheitsnachweiskonzept zu Grunde, das auf einem Risikoansatz basiert.

Bei vertiefter Betrachtung macht dieses Regelwerk deutlich, dass (bau)technisch nie eine absolute Sicherheit erreicht, sondern das vom Versagen eines Bauwerkes ausgehende Risiko nur hinreichend gering gehalten werden kann. Als Maß für das von einem Bauwerk ausgehende Risiko wird primär der Verlust seiner Sicherheitsfunktion, in der Regel der Tragfähigkeit, herangezogen. In diesem Zusammenhang dient das Risiko als ein Maß, das nicht nur das Ausmaß eines Schadens beschreibt, sondern auch die Wahrscheinlichkeit seines Eintretens.

Klassisch wird zur Ermittlung des Risikos eine Risikoanalyse durchgeführt. Im Bauwesen erfolgt bei der Auslegung nach Eurocode jedoch keine Risikoanalyse. Die Einhaltung der in den Eurocodes beschriebenen Verfahrensweisen gewährleistet, dass das Risiko unterhalb der akzeptierten Schranke für das Versagensrisiko (=Verlust der Sicherheitsfunktion) bleibt (MÜLLER-HÖPPE & KRONE 1999). Aufgrund der Anwendung von Teilsicherheitsbeiwerten ist diese Methode in ihrer Umsetzung den früheren deterministischen Verfahren so ähnlich, dass oftmals gar nicht erkannt wird, dass ein risikobasiertes Sicherheitsnachweiskonzept zur Anwendung kommt.

Die Vorgehensweise bei diesem Sicherheitsnachweiskonzept soll an Hand der Funktion „Tragfähigkeit“ (früher: Standsicherheit) erläutert werden, weil darauf die Regelungen der Eurocodes überwiegend abzielen, ohne auf sie beschränkt zu sein.

Als Grundlage für den Tragfähigkeitsnachweis nach der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte dient die Grenzbedingung (Grenzzustand der Tragfähigkeit), bei der die ordnungsgemäße Funktion gerade noch gegeben ist:

$$E_d \leq R_d \tag{6.1}$$

Sie sagt, dass die Bemessungswerte der Beanspruchungen E_d kleiner oder höchstens gleich dem Bemessungswiderstand R_d des Tragwerks sein dürfen.

Der Bemessungswert der Beanspruchungen E_d ergibt sich aus:

$$E_d = \gamma_{Ed} E(F_{d1}, F_{d2}, ...; a_{d1}, a_{d2}, ...; X_{d1}, X_{d2}, ...) \tag{6.2}$$

mit

γ_{Ed}	Teilsicherheitsbeiwert für die Modellunsicherheit Einwirkungsmodell
F_{d1}, F_{d2}	Bemessungswerte einer Einwirkung
a_{d1}, a_{d2}	Bemessungswerte der geometrischen Größen
X_{d1}, X_{d2}	Bemessungswerte der Baustoffeigenschaften
$E(...)$	Beanspruchung als Funktion obiger Größen

Für die Bemessungswerte der Einwirkungen gilt dabei:

$$F_d = \gamma_f F_{rep} \tag{6.3}$$

mit

F_d	Bemessungswert einer Einwirkung
γ_f	Teilsicherheitsbeiwert der Einwirkung, der unter anderem ungünstige Abweichungen der Einwirkung und Unsicherheiten der Abschätzung der Wirkung der Einwirkung beinhaltet
F_{rep}	repräsentativer Wert der Einwirkung

Für die geometrischen Größen gilt:

$$a_d = a_{nom} + \Delta a \tag{6.4}$$

mit

a_{nom}	Nominalwert der Geometrie
Δa	berücksichtigt ggf. ungünstige Abweichungen vom Nominalwert

Für die Baustoffeigenschaften gilt:

$$X_d = \frac{\eta X_k}{\gamma_m} \tag{6.5}$$

mit

X_d	Bemessungswert der Baustoffeigenschaften
γ_m	Teilsicherheitsbeiwert der Baustoffeigenschaft, der unter anderem ungünstige Abweichungen vom charakteristischen Wert, ungenaue Umrechnungsfaktoren und Unsicherheiten in der Geometrie sowie im Tragwiderstandsmodell beinhaltet
X_k	charakteristischer Wert der Baustoffeigenschaften
η	Umrechnungsfaktor für Lastdauer, Feuchte, Temperatur, etc.

Auf der rechten Seite von (4.1) stellt R_d den Bemessungswiderstand dar. Für R_d gilt:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} R(a_{d1}, a_{d2}, ...; X_{d1}, X_{d2}, ...) \tag{6.6}$$

mit

γ_{Rd}	Teilsicherheitsbeiwert für die Modellunsicherheit Widerstandsmodell
a_{d1}, a_{d2}	Bemessungswerte der geometrischen Größen
X_{d1}, X_{d2}	Bemessungswerte der Baustoffeigenschaften
$R(...)$	Widerstand als Funktion obiger Größen

Auf (4.6) beruhen die Nachweisformen von R_d. Eine häufig bei üblichen Bauwerken anzutreffende Nachweisform unter Berücksichtigung der charakteristischen Baustoffeigenschaften, der Geometrieeinflüsse und der Teilsicherheitsbeiwerte lautet:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} R(\frac{X_k}{\gamma_m} a_{nom}) \tag{6.7}$$

mit

γ_{Rd}	Teilsicherheitsbeiwert für die Modellunsicherheit Widerstandsmodell
X_k	charakteristischer Wert der Baustoffeigenschaften
γ_m	Teilsicherheitsbeiwert der jeweiligen Baustoffeigenschaft, der unter anderem ungünstige Abweichungen vom charakteristischen Wert, ungenaue Umrechnungsfaktoren und Unsicherheiten in der Geometrie sowie im Tragwiderstandsmodell beinhaltet
a_{nom}	Nominalwert der Geometrie

Formal wird der obige Nachweis im Grenzzustand gemäß (4.1) analytisch (und deterministisch) geführt, wobei in die Berechnungen sogenannte Bemessungsgrößen (bzw. -werte) eingehen, die mittels Teilsicherheitsbeiwerten mit Sicherheitsauf- oder Abschlägen versehen sind. In der Regel erfolgen die Abschläge auf charakteristische Werte, die sich als Fraktilenwerte der jeweiligen Größen verstehen. Dabei sind Fraktilen- und Teilsicherheitsbeiwerte so zu wählen, dass die Wahrscheinlichkeit einer Über- oder Unterschreitung in die ungünstige Richtung, die mit dem gewählten Zuverlässigkeitsniveau akzeptierte Versagenswahrscheinlichkeit nicht übersteigt. Sicherheitsfunktionen mit Relevanz für Leib und Leben sollten die Versagenswahrscheinlichkeit 10^{-4}, bezogen auf die Nutzungsdauer, nicht übersteigen.

Der Nachweis im Grenzzustand muss ggf. für unterschiedliche Bemessungssituationen, die ersatzweise die im Betrachtungszeitraum auftretenden tatsächlichen Bedingungen beschreiben, mit Einwirkungen in verschiedenen Kombinationen für verschiedene Versagensmechanismen geführt werden, wobei bei der Kombination der Einwirkungen die Wahrscheinlichkeit ihres gleichzeitigen Auftretens berücksichtigt wird.

Relevante Bemessungssituationen sind z.B.:

- ständige Situationen, die den üblichen Nutzungsbedingungen des Tragwerks entsprechen,
- vorübergehende Situationen, die sich auf zeitlich begrenzte Zustände beziehen, z.B. Bau-zustände,
- außergewöhnliche Situationen, die sich auf außergewöhnliche Bedingungen für das Tragwerk beziehen, z.B. Anprall, Explosionen (siehe DIN 1055-9),
- Situationen bei Erdbeben, die die Bedingungen bei Erdbebeneinwirkungen auf das Tragwerk umfassen.

Im Unterschied zu ständigen Situationen werden für außergewöhnliche Situationen in der Regel andere (meist nur wahrscheinliche) Einwirkungskombinationen und geringere Teilsicherheitsbeiwerte angesetzt. Damit wird in der Praxis die geringe Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens sehr ungünstiger Werte berücksichtigt, ohne dass dabei eine Absenkung des Zuverlässigkeitsniveaus erfolgt.

Prinzipiell können Teilsicherheitsbeiwerte auf folgende Weise bestimmt werden:

- durch Kalibrierung an der bisherigen Erfahrung
- durch statistische Auswertung von Versuchsergebnissen oder Messungen

Auch die Kombination beider o.g. Verfahren ist möglich. Dann ist eine spezielle in (CEN 2002) beschriebene Verfahrensweise anzuwenden. Die Beziehung zwischen den Teilsicherheitsbeiwerten ist in Abb. 7.2 dargestellt.

Abb. 7.2: Beziehung zwischen den einzelnen Teilsicherheitsbeiwerten (CEN 2002)

Die probabilistischen Methoden für die Kalibrierung der Teilsicherheitsbeiwerte können in zwei Hauptgruppen eingeteilt werden

- die vollständig probabilistischen Methoden (Stufe III) und
- die Zuverlässigkeitsmethoden 1. Ordnung (FORM) (Stufe II).

Bei den Stufe-II- und Stufe-III-Methoden wird als Maß für die Zuverlässigkeit die Überlebenswahrscheinlichkeit $p_s = (1–p_f)$ benutzt, wobei p_f die Versagenswahrscheinlichkeit für die betrachtete Versagensart für einen bestimmten Bezugszeitraum ist. Liegt die Versagenswahrscheinlichkeit höher als eine vorgegebene Bezugsgröße p_0, wird das Tragwerk als unsicher betrachtet.

Im Rahmen des Stufe-II-Verfahrens wird der Zuverlässigkeitsindex β als Maß für die Zuverlässigkeit betrachtet. Es gilt $p_f = \Phi(-\beta)$, wobei Φ die kumulative Verteilungsfunktion für die standardisierte Normalverteilung ist. Die Beziehung zwischen p_f und β ist in Tab. 7.1 angegeben.

Tab. 7.1: Beziehung zwischen β und p_f (CEN 2002)

p_f	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
β	1,28	2,32	3,09	3,72	4,27	4,75	5,20

Die Versagenswahrscheinlichkeit p_f kann mit der Grenzzustandsgleichung g (4.1) derart ausgedrückt werden, das für $g > 0$ Überleben und für $g < 0$ Versagen eintritt, d.h. $p_f = \text{Prob}(g < 0)$.

Wenn R der Widerstand und E die Beanspruchung (Auswirkung der Einwirkungen) ist, dann lautet die Grenzzustandsfunktion $g = R – E$ mit R, E und g als Zufallsvariable. Ist g normal verteilt, wird β als $\beta = \mu g/\sigma g$ angenommen, wobei μg der Mittelwert von g und σg die Standardabweichung von g sind. Dann gilt $\mu g - \beta\sigma g = 0$ und $p_f = \text{Prob}(g < 0) = \text{Prob}(g < \mu g - \beta\sigma g)$. Bei anderen Verteilungen als der Normalverteilung kann β als übliches Maß für die Zuverlässigkeit $p_s = (1 – p_f)$ aufgefasst werden.

So beinhaltet der Sicherheitsnachweis mit den Teilsicherheitsbeiwerten der Eurocodes nach (4.1) in der Regel, dass das Bauwerk bei einer vorgegebenen Schranke für die Versagenswahrscheinlichkeit p_f von 10^{-4} bezogen auf die Lebensdauer des Tragwerks, im Hinblick auf die Tragfähigkeit mit einem Zuverlässigkeitsniveau von mindestens $(1\text{-}10^{-4})$ bezogen auf die Lebensdauer nicht versagen wird bzw. dass die Überlebenswahrscheinlichkeit $p_s > (1\text{-}10^{-4})$ bezogen auf die Lebensdauer beträgt. Im Fall der Funktion Tragfähigkeit beträgt also die Schranke für das Versagensrisiko 10^{-4} bezogen auf die Lebensdauer des Bauwerkes.

Wie bereits erwähnt, können die Teilsicherheitsbeiwerte mit statistischen Methoden aus Versuchsdaten unter Einsatz erprobter Baustoffe des Bauwesens ermittelt werden, oder sofern diese Werte in technischen Regelwerken bereits veröffentlicht worden sind, aus diesen übernommen werden. Letzteres gilt in erster Linie für den Bau technischer Barrieren. Die Verwendung von Versuchsdaten ist für geotechnische und geologische Barrieren notwendig, weil die Ermittlung der charakteristischen Werte in der Regel standortbezogen für die geologischen Barrieren und ggf. sogar lokationsbezogen für die geotechnischen Barrieren zu erfolgen hat. Dabei ist zu beachten, dass die aus Versuchsdaten ermittelten Werte denselben Grad der Zuverlässigkeit für die zu betrachtenden Grenzzustände aufweisen, wie die dazugehörigen Teilsicherheitsbeiwerte (MÜLLER-HÖPPE & KRONE 1999).

Bei der Anwendung von Teilsicherheitsbeiwerten sind die langen Standzeiten von Endlagerbauwerken zu berücksichtigen. So ist festzustellen, dass sich der Betrachtungszeitraum der Eurocodes an einer Lebensdauer von Bauwerken orientiert, die üblicherweise 50 bis 100 Jahre beträgt. Dieser Sachverhalt ist insbesondere in Bezug auf die Dauerhaftigkeit/Langzeitstabilität der Barrierenbauwerke zu berücksichtigen, da die Einwirkung der Korrosion, über lange Zeiträume dominant werden kann. Trotzdem dient das Zuverlässigkeitsniveau gemäß Eurocodes als Maßstab für die Barrierenbauwerke, wobei unterstellt wird, dass es bei spezieller Beachtung der Dauerhaftigkeit/Langzeitstabilität auch für endlagerrelevante Lebensdauern gilt.

7.3 Behandlung von Ungewissheiten bei der Bewertung von Freisetzungsszenarien

Die Bewertung von Freisetzungsszenarien wird in der Regel mit numerischen Modellen durchgeführt, d.h. man hat sich vorrangig mit Parameter- und Modellungewissheiten auseinanderzusetzen. Natürlich liegen den Parametern in den Modellen Daten zu Grunde, deren Bestimmung ebenfalls mit Ungewissheiten behaftet ist. Diese müssen bei der Identifizierung der Ungewissheiten dokumentiert werden (Kapitel 6.3). Die Datenungewissheiten werden auf die Parameter übertragen und dann als Parameterungewissheiten behandelt.

Die Methoden zum Umgang mit und zur Quantifizierung von Parameterungewissheiten sind weit fortgeschritten und feste Bestandteile des Langzeitsicherheitsnachweises. Die Behandlung der Ungewissheiten hinsichtlich der Struktur bzw. des Konzepts eines Modells ist hingegen deutlich schwieriger als die Behandlung von Parameterungewissheiten. Eine Validierung der Modelle und der zugrundeliegende Konzepte kann in den meisten Fällen nicht erreicht werden. Es wird deshalb versucht, diese Ungewissheiten auch mit den Methoden, mit denen Parameterungewissheiten analysiert werden können, zu behandeln.

Wesentliches Werkzeug zur Behandlung der Ungewissheiten bei der Bewertung von Freisetzungsszenarien sind Untersuchungen, bei denen in verschiedenen Rechnungen Parameter variiert und die Ergebnisse miteinander verglichen werden. Es können sowohl verschiedene Einzelrechnungen mit jeweils festen Parametersätzen verglichen (deterministische Rechnungen) als auch eine größere Zahl Rechenläufe durchgeführt werden, in denen jeweils den Parametern Zufallswerte zugewiesen werden, die aus statistischen Verteilungen gezogen werden (probabilistische Rechnungen). Die numerischen Resultate der Rechenläufe können anschließend mit statistischen Verfahren analysiert werden.

Bei diesen Rechnungen interessiert einerseits die Streuung der Ergebnisse andererseits aber auch die Identifikation derjenigen Eingangsparameter, die einen hohen Einfluss auf die Streubreite der Ergebnisse haben (Sensitivitätsanalyse). Die Sensitivität des System gegenüber einem Parameter wird danach beurteilt, welche Auswirkungen die Bandbreite des Parameters auf die berechneten Konsequenzen hat. Durch die Identifizierung der sensitiven Parameter kann ermittelt werden, ob und gegebenenfalls inwieweit Parameter und ihre zugrundeliegenden Daten genauer bestimmt werden sollten.

7.3.1 Modellvalidierung

Bei der Modellvalidierung wird untersucht, ob das implementierte Modell das Verhalten des zu untersuchenden Systems befriedigend repräsentiert, d.h. eine genügend genaue Approximation der Realität für die gewünschte Anwendung darstellt. Eine vollständige Übereinstimmung zwischen System und Modell ist nicht möglich, da das Modell über Abstraktion und Idealisierung aus dem realen System hervorgegangen ist. Zusätzlich ist jede Messung am realen System mit Fehlern verbunden. Eine Übereinstimmung zwischen System und Modell ist also nur innerhalb einer vorgegebenen Toleranz möglich.

Die Modelle, die bei der Bewertung von Freisetzungsszenarien eingesetzt werden, müssen validiert werden, um Ungewissheiten bezüglich dieser Modelle quantifizieren und gegebenenfalls reduzieren zu können. Eine Validierung ist aber schwer durchführbar, da bei vielen relevanten Prozessen nicht auf gemessene Datensätze zurückgegriffen werden kann. Deshalb ist es nötig, durch eine Vielzahl von Argumenten, Vertrauen in die Modelle aufzubauen. Dafür können unterschiedliche Ansätze eingesetzt und auch miteinander kombiniert werden:

- Ein Vergleich verschiedener Modelle, die das gleiche Phänomen beschreiben, aber auf alternativen Konzepten und zum Teil auf unterschiedlichen Skalen basieren. Für diesen Vergleich ist es aber notwendig, dass sinnvolle alternative Konzepte existieren. Diese stehen aber nicht immer zur Verfügung.

- Der Einsatz von konservativen oder pessimistischen Annahmen in den Modellen kann helfen, Ungewissheiten zu berücksichtigen. Sie müssen aber gut dargelegt und begründet werden. Ansonsten besteht die Gefahr, mit diesen Annahmen nur ungenügendes Systemverständnis zu verdecken, anstatt Ungewissheiten angemessen zu berücksichtigen.
- Natürliche Analoga können herangezogen werden, um zu zeigen, dass das verwendete Modell zu sinnvollen Ergebnissen kommt.
- Begutachtung durch externe Experten.

Für die Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (BFS 2009) wurden beispielsweise bei der Durchführung der Modellrechnungen zwei verschiedene Rechenprogramme mit unterschiedlichen Modellvorstellungen eingesetzt: das Programmpaket EMOS der GRS und das Programm PROSA der Firma AF-Colenco AG.

Im schwedischen Programm werden in einem speziellen Bericht (SKB 2008) die in den Langzeitsicherheitsnachweis eingehenden relevanten Prozesse dargelegt und bei unterschiedlichen Konzepten miteinander verglichen. Die hinsichtlich der berechneten Konsequenzen ungünstigsten Modellannahmen werden für die weiteren Rechnungen ausgewählt. Bei derartigen Vergleichen können konzeptionelle, mathematische oder numerische Ungewissheiten angesprochen werden.

Ein Großteil der identifizierten Modellungewissheiten wird allerdings nicht durch die Validierung der Modelle behandelt, sondern es wird versucht, diese Ungewissheiten auf die Parameter der Modelle zu übertragen.

7.3.2 Analyse der Parameterungewissheiten

Wie eingangs des Kapitels beschrieben wird bei der Analyse der Parameterungewissheiten untersucht, zu welchen Ungewissheiten in den Modellausgabegrößen die Ungewissheiten der Modelleingabegrößen führen. Zu dieser Analyse zählen sowohl deterministische als auch probabilistische Verfahren. In den vergangenen Jahren hat es sich immer mehr durchgesetzt, sowohl deterministische als auch probabilistische Untersuchungen durchzuführen. International üblich ist heute eine komplementäre Nutzung von beiden Verfahren. Alle untersuchten Endlagerprogramme setzen in unterschiedlichem Maße auf die Methode der Probabilistik zur Analyse von Ungewissheiten oder haben dies zumindest in Planung (GALSON & KHURSHEED 2007, NEA 2008).

Deterministische Untersuchungen

Bei deterministischen Untersuchungen wird jeweils nur ein feststehender Satz von Parametern, Rand- und Anfangsbedingungen für die Berechnung verwendet. Dabei können verschiedene Ansätze für die Auswahl eines festen Wertes gewählt werden:

- Beste Schätzung: Stellt das abzubildende Systeme so realistisch wie möglich dar, d.h. die nach dem gegenwärtigen Informationsstand wahrscheinlichste Parameterkombination, Entwicklung etc.
- Konservativ: Basiert ebenfalls auf realistischen Annahmen, ist aber weniger wahrscheinlich als die beste Schätzung und führt zu höheren Konsequenzen
- Pessimistisch: Basiert nicht zwingend auf realistischen Annahmen, führt zu höheren Konsequenzen als die beste Schätzung
- Abdeckend: Stellt innerhalb eines definierten Bereiches den ungünstigsten Parameterwert dar

Die angegebene Unterscheidung zwischen „konservativ“ und „pessimistisch“ wird z.B. von VIGFUSSON ET AL. 2007 verwendet, NAGRA 2002B definiert die beiden Begriffe genau umgekehrt. ANDRA 2005 benutzt den Begriff „pessimistisch“ als Oberbegriff und unterteilt diesen in verschiedene Unterbegriffe, u.a. „konservativ“. Die beiden Begriffe werden aber oft auch synonym verwendet (SAVAGE 1995). Auf Grund dieser Begriffsverwirrung und der Tatsache, dass diese Unterscheidung für die Behandlung von Ungewissheiten nicht entscheidend ist, wird hier auf eine Abgrenzung verzichtet. Analog zu der Mehrzahl der in Deutschland veröffentlichten Berichte wird im Projekt ISIBEL der Begriff konservativ im oben angegebenen Sinne verwendet. Zusätzlich wird der im deutschen Sprachraum häufig eingesetzte Begriff „abdeckend“ verwendet.

Die Begriffe lassen sich anhand der Abb. 7.3 erklären: Für den Fall, dass die errechnete Konsequenz $G(p)$ eine monoton steigende Funktion im Intervall [a,b] darstellt und μ als beste Schätzung ermittelt wurde, sind alle Werte $p > \mu$, z.B. x oder b, pessimistische Parameterwerte, x ist abdeckend für alle Parameter $p \leq x$ usw. Diese Begriffe sind bei der Behandlung von Ungewissheiten nicht einsetzbar, wenn das Verhalten der Konsequenz in Abhängigkeit von p oder die Abhängigkeit des Parameters von weiteren Parametern nicht ausreichend bekannt ist.

Eine Einordnung der mit den deterministischen Ansätzen erhaltenen Ergebnisse zur Einschätzung des Einflusses der Ungewissheiten ist ein wichtiger Bestandteil der Unsicherheitsanalyse. Vor allem bei einer Analyse zur Einhaltung eines deterministischen Kriteriums ist eine Berechnung mit besten Schätzwerten und konservativen Parametern erforderlich (RÖHLIG 1998).

Eine rein deterministische Analyse bestehender Ungewissheiten wird national wie international für komplexe Systeme mit vielen Parametern und nichtlinearen Abhängigkeiten als nicht ausreichend angesehen (GALSON & KHURSHEED 2007, VIGFUSSON ET AL. 2007, NEA 2008). Um das Verhalten komplexer Endlagersysteme besser beurteilen zu können, werden daher zusätzlich zu den deterministischen Rechnungen probabilistische Rechnungen eingesetzt.

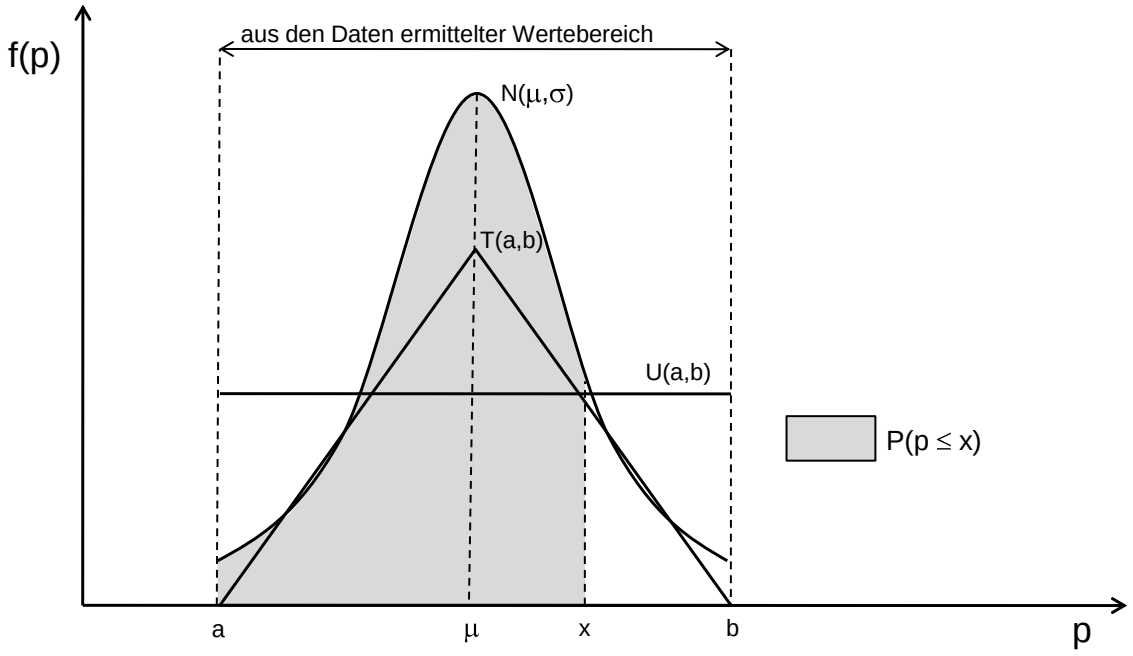

Abb. 7.3: Darstellung von Dichtefunktionen von häufig eingesetzten Verteilungen und Punktschätzern für einen Parameter p (nach NAGRA 2002A).

Probabilistische Untersuchungen (Monte-Carlo-Simulationen)

Bei probabilistischen Untersuchungen wird nicht ein Parameterwert aus dem Intervall [a,b] herangezogen, sondern dieser Parameter über die ganze Bandbreite des Intervalls variiert.

Die Anwendung probabilistischer Untersuchungen in der Langzeitsicherheitsanalyse gliedert sich in drei Phasen:

1. Es müssen die Ungewissheiten der Parameter der eingesetzten Modelle quantifiziert werden.
2. Es muss eine Folge von unabhängigen Zufallszahlen erzeugt werden, deren Folgenglieder möglichst genau die vorgegebene Verteilung besitzen.
3. Aus den Realisierungen der Zufallsgrößen müssen stochastische Kenngrößen für das Ausgangsproblem abgeleitet werden.

Der Parameter wird als Zufallsgröße mit einer vorzugebenden Verteilung interpretiert. Zur Wahl dieser Verteilungsfunktion stehen idealerweise Messwerte zur Verfügung, die statistisch ausgewertet werden können. Besteht diese Möglichkeit nicht, erfolgt die Zuordnung von Verteilungen auf der Basis von Expertenurteilen, die sich möglichst auf physikalische Zusammenhänge stützen. Ist das nicht möglich, müssen die Verteilungen subjektiv abgeleitet werden. Bei der Untersuchung mehrerer Parameter muss untersucht werden, ob die Parameter korreliert sind. Gegebenenfalls müssen entsprechende Korrelationen in geeigneter Weise berücksichtigt werden.

Die Festlegung der Verteilungen (einschließlich möglicher Zusammenhänge zwischen einzelnen Parametern wie z.B. funktionale Abhängigkeiten, Restriktionen durch andere Parameter oder Korrelationen) bilden die Grundlage für die Erzeugung von Stichproben (Schritt 2) für die Eingangsgrößen.

Häufig genutzte Verteilungen sind (Abb. 7.3):

- U(a,b): Gleichverteilung auf dem Intervall [a,b], eventuell stückweise gleichverteilt auf verschiedenen Zwischenintervallen [a,a1), [a1,b), [b1,b]
- T(a,b): Dreiecksverteilung auf dem Intervall [a,b]
- N(μ,σ): im Intervall [a,b] symmetrisch gestutzte Normalverteilung
- Diskrete Verteilungen

Bei großen Intervallen [a,b], die über mehrere Größenordnungen gehen, werden die angenommenen Verteilungen bevorzugt logarithmiert.

Im Projekt PAMINA (BECKER ET AL. 2009B) wurden Methoden zusammengetragen, wie in verschiedenen Ländern der EU mit Parameterungewissheiten umgegangen wird und wie Verteilungen für probabilistische Untersuchungen abgeleitet werden können. Es ist bei der Auswahl von Verteilungsfunktionen wichtig, Richtlinien vorzugeben, da für viele Parameter nicht genügend Daten zur Verfügung stehen, um subjektive Einschätzungen vermeiden zu können. Durch die vorgegebenen Richtlinien wird der Einsatz subjektiver Entscheidungen aber nach außen hin transparent und nachvollziehbar und kann im Zweifelsfall auch revidiert werden.

Für die Ziehung von möglichst repräsentativen Werten aus dem Parameterraum dieser Verteilungen gibt es sehr viele Verfahren, die beiden wichtigsten sind (IAEA 1989):

- Simple Random Sampling (SRS): Aus dem Einheitsintervall [0,1] wird bei Annahme einer Gleichverteilung über dieses Intervall ein Wert r gezogen. Der gezogene Wert r wird dann in den Parameterwert x überführt, indem der kleinste Wert x gewählt wird, für den gilt, dass Prob(x) $\geq$ r.

– Latin Hypercube Sampling (LHS): Bei diesem Verfahren wird für den zu variierenden Parameter das Einheitsintervall in n Abschnitte mit jeweils gleicher Eintrittswahrscheinlichkeit $1/n$ aufgeteilt. Aus jedem dieser Unterintervalle wird wie beim SRS ein Wert r gezogen und in einen Parameterwert x überführt. Für jeden weiteren Parameter des Parametersatzes wird die gleiche Prozedur angewandt, nur dass die bereits verwendeten Subintervalle nicht mehr berücksichtigt werden.

Jeder so erzeugte Parametersatz repräsentiert für sich genommen eine mögliche Realisierung des Modells und dient als Eingangsgröße einer Konsequenzenanalyse (deterministische Rechnung). Das Ergebnis ist eine Menge möglicher Realisierungen der Konsequenz, die als zufällige Größe mit einer zunächst unbekannten Verteilung betrachtet wird. Die Realisierungen der Konsequenz dienen nunmehr der statistischen Schätzung von Eigenschaften dieser Verteilung. Entsprechende Kenngrößen dieser Verteilungen sind die in der Statistik üblichen Lage- und Streuungsmaße, wie z.B. Mittelwert mit Vertrauensintervall und diverse Quantile, unter anderem der Medianwert. In der Konsequenzenanalyse spielt naturgemäß der Maximalwert eine besondere Rolle.

7.3.3 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse untersucht, wie stark der Einfluss der einzelnen Eingabegrößen auf die Ungewissheit der Modellausgaben (Konsequenzen) ist.

Da praktisch alle Parameter, die in eine Modellrechnung einfließen, gewissen Ungewissheiten unterliegen, ist auch deren Ergebnis stets als ungewiss anzusehen. Parameterungewissheiten können durch aleatorische Ungewissheit oder durch epistemische Ungewissheit, häufig aber auch durch eine Kombination von beiden begründet sein. Während bei rein aleatorischen Ungewissheiten eine Analyse der daraus resultierenden Ungewissheit der Modellergebnisse (Unsicherheitsanalyse) im Vordergrund steht, interessiert bei epistemischen Ungewissheiten insbesondere die Frage, bei welchen Parametern der Einfluss ihrer Ungewissheit auf diejenige der Modellergebnisse besonders groß ist. Der Reduktion der Ungewissheit solcher Parameter kann dann besonderes Augenmerk gewidmet werden.

Wie bei der Unsicherheitsanalyse unterscheidet man deterministische und probabilistische Ansätze der Sensitivitätsanalyse. Bei einer deterministischen Analyse werden unter gezielter Variation eines oder mehrerer Parameter einige Einzelrechenläufe durchgeführt, um die Auswirkungen auf die Ergebnisse zu untersuchen. Bei einer probabilistischen Analyse wird dagegen eine große Zahl von Rechenläufen mit Parametersätzen durchgeführt, die in einem mehr oder weniger zufallsbestimmten Verfahren entsprechend ihrer statistischen Verteilung gezogen werden. Die Auswertung erfolgt dann mittels spezieller Methoden und liefert Aussagen über die Sensitivität des Systems gegenüber den Ungewissheiten der verschiedenen Parameter.

Weiter ist nach lokaler und globaler Sensitivitätsanalyse zu unterscheiden. Bei einer lokalen Analyse wird nur die nähere Umgebung eines bestimmten Punktes im Parameterraum oder nur eine Teilmenge des Parametersatzes analysiert. Eine globale Analyse umfasst dagegen den gesamten Parameterraum. Häufig werden deterministische mit lokalen und probabilistische mit globalen Analysen gleichgesetzt. Beides ist jedoch nicht zwingend.

Für globale Sensitivitätsanalysen sind zahlreiche Verfahren entwickelt worden. Diese unterscheiden sich nach der Art der Stichprobenziehung, der Anwendbarkeit auf unterschiedliche Modellsysteme sowie nach der Aussage ihrer Ergebnisse:

- Regressions- und Korrelationsverfahren (z.B. der Spearman-Test) sind vornehmlich für Systeme mit einem annähernd linearen Verhalten geeignet. Mithilfe einer Rangtransformation kann die Aussagekraft der Ergebnisse auch für nichtlineare Systeme in vielen Fällen deutlich verbessert werden, solange sie wenigstens ein monotones Verhalten zeigen.
- Eine weitere Gruppe von Verfahren beruht auf dem Ansatz, die Parameterstichprobe entsprechend dem Modellverhalten in zwei oder mehrere Unterstichproben aufzuteilen und deren Verteilungen zu vergleichen. Daraus kann man Aussagen über die Sensitivität des Modells gegenüber Parametervariationen ableiten. Dies wird als Monte-Carlo Filtering (MCF) bezeichnet. Zu diesen Verfahren gehört z.B. der Smirnov-Test.
- Varianzbasierte Verfahren sind im Gegensatz zu den Regressions- und Korrelationsverfahren in vollem Umfang auf nichtlineare Systeme anwendbar und liefern quantitativ interpretierbare Resultate. Solche Verfahren liefern sogenannte Sensitivitätsindizes, indem die Varianz der Ausgangsgröße in Anteile, die auf die einzelnen Parameter zurückgehen, zerlegt wird. Ein theoretischer Vorteil dieser Methoden ist, dass über Sensitivitätsindizes höherer Ordnung auch Wechselwirkungen zwischen Parametern gezielt untersucht werden können.
- Screening-Verfahren dienen dazu, bei einer großen Anzahl von Parametern zunächst einen groben Überblick über wichtige und weniger wichtige Parameter zu bekommen. Dabei werden keine Verteilungsfunktionen berücksichtigt, sondern es werden für jeden Parameter wenige Werte ausgewählt, die die erwartete Bandbreite abdecken. Ein komplettes Durchrechnen aller möglichen Kombinationen (Factorial Design) ist nur bei sehr wenigen Parametern möglich. Es gibt aber Ansätze, mit denen sich die Anzahl der Simulationen erheblich reduzieren lässt (Morris Screening).
- Graphische Methoden der Sensitivitätsanalyse liefern anschauliche qualitative Aussagen. Hier sind vor allem Scatterplots und Cobweb-Plots zu erwähnen. Solche Darstellungen können außerdem z.B. durch geeignete Farbcodierung wertvolle zusätzliche Informationen über das Systemverhalten liefern.

Weitere Informationen zu den verschiedenen Verfahren der Sensitivitätsanalyse findet man z.B. bei (SALTELLI 2000).

Die Methoden der Sensitivitätsanalyse sind sehr gut geeignet, die Parameter zu identifiziert, die bevorzugt untersucht werden sollten, wenn es darum geht, eine bessere Datenbasis zu schaffen oder Modelle zu verfeinern und damit Ungewissheiten zu reduzieren oder zumindest genauer zu quantifizieren. Sie liefern zudem auch einen wichtigen Beitrag bei der Analyse der Qualität und Robustheit des betrachteten Endlagersystems.

8 Überprüfung des vorhandenen Instrumentariums

8.1 Überprüfung des Instrumentariums für die Behandlung von Ungewissheiten im Integritätsnachweis für die geologische Barriere

Die zielgerichtete Variation von Merkmalen im geologischen Standortmodell wurde in der Vergangenheit nicht praktiziert. Vielmehr ist es üblich, das Finite-Elemente-Modell so aufzubauen, dass es als konservativ angesehen werden kann. Dennoch kann festgestellt werden, dass das Instrumentarium für eine zielgerichtete Variation der sicherheitsrelevanten Merkmale im geologischen Standortmodell vorhanden ist, da diese Variation die wiederholte Durchführung der thermomechanischen Simulationsrechnungen erfordert, die auch bisher schon Bestandteil des Integritätsnachweises sind. Voraussetzung für die Variation ist allerdings, dass jeweils ein neues numerisches Modell mit den veränderten räumlichen Merkmalen erzeugt wird. Die Vorgehensweise ist daher mit einem immensen Modellierungsaufwand verbunden und wird in der Praxis vermutlich solchen Konstellationen vorbehalten sein, in denen zur Abklärung eines Sachverhaltes tatsächlich eine Modellvariation erforderlich ist. Wird dagegen schon aus dem Ergebnis einer einzigen Simulation das Vorhandensein von so großen Sicherheitsreserven ersichtlich, dass eine weitere Relevanz der Ungewissheit eines betrachteten Merkmals nicht zu besorgen ist, kann im Einzelfall möglicherweise der Verzicht auf eine Modellvariation schlüssig begründet werden.

Analog zu den Abschnitten der vorangegangenen Kapitel, in denen die Ungewissheiten im Integritätsnachweis für die geologische Barriere behandelt wurden, wurde auch im vorangestellten Absatz nur das Beispiel der Ungewissheiten im geologischen Standortmodell betrachtet. Aussagen über weitere Ungewissheiten im Integritätsnachweis für die geologische Barriere, über ihre Quantifizierung und über das zu ihrer angemessenen Berücksichtigung vorhandene Instrumentarium erfordern die Erarbeitung anderer Vorgehensweisen.

Im Fall der weiteren Ungewissheiten in der geologischen Standortbeschreibung ist wie für die Ungewissheiten im geologischen Standortmodell ihre zielgerichtete Variation als geeignete Berücksichtigungsmethode naheliegend. Ob die Methode tatsächlich angemessen ist und den Ansprüchen an eine adäquate Berücksichtigung der Ungewissheiten im Sicherheitsnachweis genügen kann, muss in jedem Einzelfall untersucht und dargelegt werden.

Ungewissheiten in der mathematischen Formulierung von physikalischen Zusammenhängen wie zum Beispiel im Kriechgesetz, den Integritätskriterien oder der Umsetzung von Prozessen in Modellrechnungen erfordern eine andere Art der Behandlung. Da solche Arten von Ungewissheiten auch beim Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren oder bei der Bewertung von Freisetzungsszenarien auftreten, können dort

angewendete Vorgehensweisen zur Berücksichtigung der Ungewissheiten möglicherweise auf den Integritätsnachweis für die geologische Barriere adaptiert werden.

8.2 Überprüfung des Instrumentariums für die Behandlung von Ungewissheiten beim Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren

Die in Kapitel 6.2 vorgestellte Methode der Teilsicherheitsbeiwerte zur Behandlung von Ungewissheiten beim Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren wird an Hand eines Beispiels für einen Streckenverschluss getestet.

8.2.1 Beispiel eines generischen Streckenverschlusses im Salinar

Im Rahmen der Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) ist der Bau von Streckenverschlüssen, auch als Abdichtungen bezeichnet, geplant (NEA 2003). Als Material für die Streckenverschlüsse ist Salzbeton vorgesehen. Abb. 8.1 zeigt schematisch einen horizontalen Streckenverschluss im Steinsalz. Der Baukörper aus Salzbeton bindet in das umgebende Steinsalzgebirge ein, da im Bereich des Streckenverschlusses die Auflockerungszone vor Einbau des Baukörpers nachgeschnitten wird. Die Streckenverschlüsse werden im Rückbau errichtet, sie sind durch plastische Fugen vom Versatz und weiteren Abdichtungselementen getrennt, um potentielle Zwangsspannungen gering zu halten. Ein solcher, wegen seiner parallel zu Strecke verlaufenden Außenkontur als Paralleldamm bezeichneter Streckenverschluss dient als Beispiel für die Darstellung der Behandlung von Ungewissheiten beim Nachweis der Zuverlässigkeit eines Streckenverschlusses im Steinsalz.

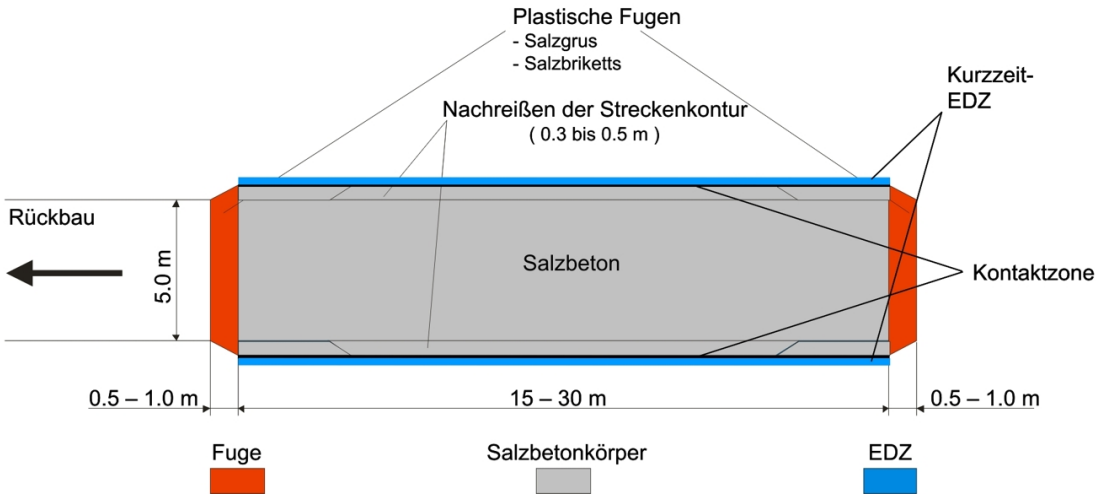

Abb. 8.1: Schematische Darstellung eines Abdichtungssegmentes im Salzgestein

In Bezug auf die für den Streckenverschluss nachzuweisenden Funktionen und Eigenschaften (Abb. 7.1)

- Dichtheit (= hydraulischer Widerstand)
- Hydromechanische Widerstandsfähigkeit (= Integrität)
  - Tragfähigkeit
  - Rissbeschränkung
  - Verformungssicherheit
- Beständigkeit (= Dauerhaftigkeit, Langzeitstabilität)

wird im Folgenden die Funktion seiner Einzelelemente herausgearbeitet. Hinsichtlich der Dichtheit ist nicht nur der eigentliche Baukörper, der hier gleichzeitig die Dichtungs- und die Widerlagerfunktion wahrnimmt, sondern auch die Kontaktzone zum und die Auflockerungszone im umgebenden Salzgestein zu betrachten. Der Streckenverschluss besteht faktisch aus den drei parallel angeordneten Einzelelementen

- Dichtelement,
- Kontaktzone und
- Auflockerungszone,

die unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, deren hydraulischer Widerstand aber integral maßgebend ist.

Als Maßstab für die Funktionsfähigkeit dient eine integrale Permeabilität, hier mit $k = 10^{-18}$ m² angegeben, die im Mittel (zuverlässig) erreicht werden muss. Beim Streckenverschluss sind Trag- und Dichtfunktion miteinander kombiniert. Dementsprechend ist ein tragfähiger Verbund in der Kontaktzone zwischen Baukörper und Salzgebirge zu gewährleisten, so dass die Lagesicherheit gegeben ist.

Der generische Streckenverschluss wird in einer nachgeschnittenen Strecke erstellt. Der zu seiner Herstellung verwendete Salzbeton wird in mehreren Schichten frisch in frisch betoniert. Der Salzbeton entwickelt beim Abbinden Hydratationswärme, d.h. während der Bauzustände treten thermische Einwirkungen aus dem Betonierprozess auf. Während seiner Standzeit (geplante Lebensdauer) ist der Streckenverschluss der mechanischen Einwirkung des aufkriechenden Gebirges ausgesetzt, weiterhin sind (hydro-)mechanische Einwirkungen in Folge eines sich aufbauenden, einseitig anstehenden Lösungsdrucks in Ansatz zu bringen. Der anstehende Lösungsdruck beträgt maximal 6 MPa. Weiterhin wird die Bandbreite möglicher einwirkender Salzlösungen durch gesättigte NaCl-Lösung und IP21-Lösung repräsentiert, wobei letztere Salzbeton korrodiert. Im Sinne von Abb. 7.1 sind also thermische Einwirkungen, mechanische

Einwirkungen, hydraulische Einwirkungen und chemische Einwirkungen zu berücksichtigen.

Für die Streckenverschlüsse aus Salzbeton sind prinzipiell folgende Bemessungssituationen in Bezug auf ihre Funktion Rissbeschränkung (abdeckend für Tragfähigkeit und Verformungsbeschränkung) und Dichtheit zu betrachten.

- Bauzustände
- Transiente Phase
- Stationäre Phase
- Erdbeben

Für den Nachweis der Dichtheit und der Beständigkeit sind die transiente Phase und die stationäre Phase zu untersuchen. Die Bemessungssituation Erdbeben wird hier nicht untersucht, da angenommen wird, dass sie aufgrund des günstigen Verhältnisses zwischen relativ hohen dynamischen Festigkeiten und relativ kleinen dynamischen Einwirkungen nicht auslegungsbestimmend ist.

8.2.1.1 Hydraulischer Widerstand des generischen Streckenverschlusses

In Bezug auf die Bewertung des hydraulischen Widerstandes für den generischen Streckenverschluss wird hier für alle drei Elemente auf die Untersuchungen am Vordamm eines in den 90er Jahren errichteten unvollendeten Versuchsbauwerks zurückgegriffen, der ein vergleichbares Bauwerk darstellt (DAFSTB 2004, MAUKE & SCHMIDT 2003). Zur Untersuchung seiner Kontaktzone wurden Permeabilitätsmessungen, Spannungsmessungen (Hydrofrac) und Ultraschallmessungen durchgeführt. Die Permeabilitätsmessungen beschränkten sich nicht nur auf die Kontaktzone, sondern umfassten auch den Baukörper und die (ehemalige) Auflockerungszone im Salzgestein. Ausgewählte Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen mit Gas sind in Abb. 8.2 dargestellt.

Die Permeabilitätsuntersuchungen zeigen, dass mit Ausnahme der Kontaktzone in der Firste in allen Elementen des Streckenverschlusses an jeder gemessenen Stelle (Stöße, Sohle) die Zielvorgabe der Permeabilität bereits von jedem Einzelwert erfüllt wird, vgl. Abb. 8.2. Die teilweise hohe Permeabilität in der Firste ist ein Ergebnis der Bauausführung, die an dieser Stelle verbessert werden muss. Der in der Firste vorhandene Einzelwert von $6{,}5 \cdot 10^{-19}$ m² zeigt, dass geringe Permeabilitätswerte auch in der Firste prinzipiell erreichbar sind. Die Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen werden im Hinblick auf die Zuverlässigkeitsbewertung detaillierter ausgewertet.

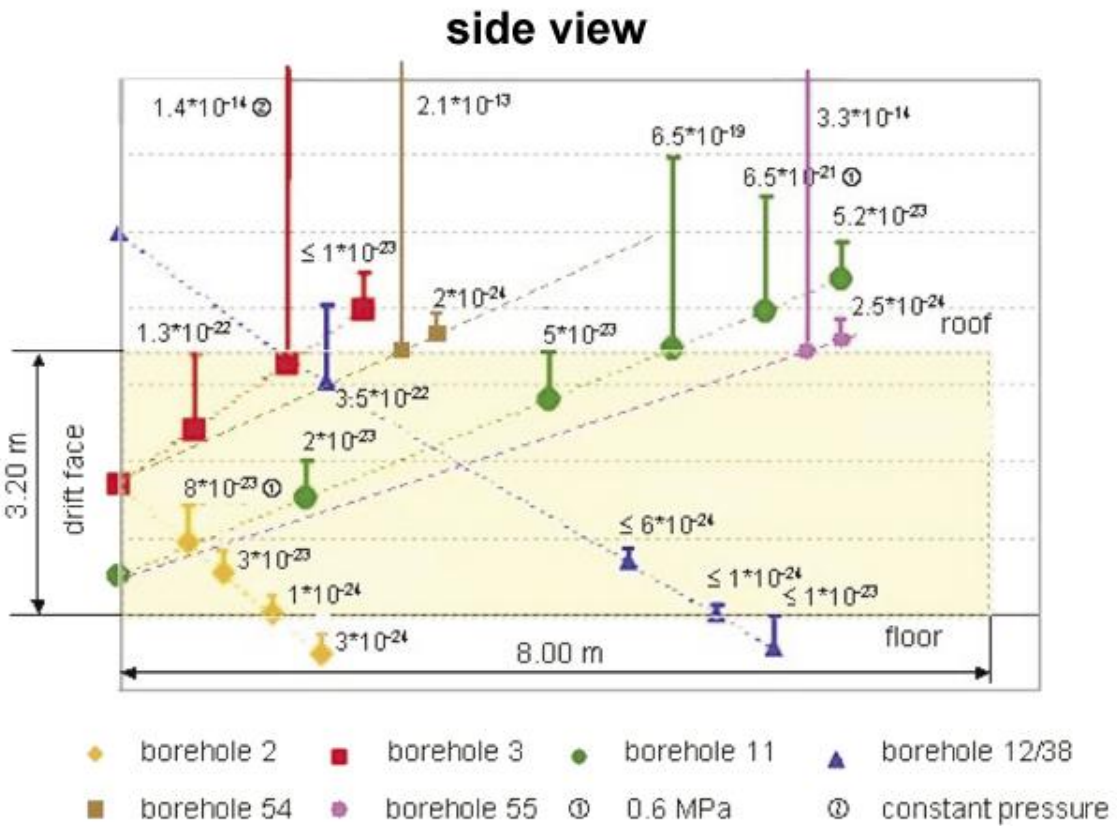

Abb. 8.2: Seitenansicht des untersuchten Vordamms mit Bohrungen von der Ortsbrust aus in den Damm, in die Kontaktzone und in die ehemalige Auflockerungszone; Richtungen der Bohrungen mit den gemessenen Permeabilitäten [m²] (GLÄß ET AL. 2003, 2005)

In Tab. 8.1 sind die Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen mit Gas vollständig angegeben.

In der folgenden Tab. 8.2 werden für die Permeabilitätswerte der drei Elemente Baukörper, Kontaktzone und (ehemalige) Auflockerungszone jeweils die beiden charakteristischen Werte X_k und der Bemessungswert X_d als abgeminderte vorsichtige Schätzung des Mittelwertes nach (CEN 2002) getrennt angegeben. Aufgrund ihrer abweichenden, konstruktiven Ausführung als handverstopfter Firstspalt und anschließend nachinjizierte Firste werden die Werte für die Kontaktzone in der Firste und die übrige Kontaktzone getrennt ausgewertet.

Unterstellt man, dass es gelingt, die Kontaktzone in der Firste mit gleicher Qualität wie die Kontaktzone in der Sohle und den Stößen herzustellen, zeigen die Ergebnisse in Tab. 8.2, dass die (ehemalige) Auflockerungszone im umgebenden Salzgestein tendenziell eine Zone mit größeren Permeabilitäten darstellt.

Tab. 8.1: Gemessene Gaspermeabilitäten von Pulse-Tests bei in der Regel 1,2 MPa Prüfdruck. Abweichende Versuchsrandbedingungen sind in Abb. 8.2 angegeben.

Lage	Sohl-bohrungen	First-bohrungen	Stoßbohrungen (Süd)	Stoßbohrungen (Nord)
Baukörper	$8\cdot10^{-23}$ m² $3\cdot10^{-23}$ m² $6\cdot10^{-23}$ m²	$1{,}3\cdot10^{-22}$ m² $3{,}5\cdot10^{-22}$ m² $5\cdot10^{-23}$ m² $2\cdot10^{-23}$ m²	$4{,}4\cdot10^{-24}$ m² $1{,}5\cdot10^{-23}$ m² $1{,}3\cdot10^{-22}$ m²	$8\cdot10^{-24}$ m² $6\cdot10^{-24}$ m² $7\cdot10^{-24}$ m²
Kontaktzone	$1\cdot10^{-24}$ m² $1\cdot10^{-24}$ m²	$1{,}4\cdot10^{-14}$ m² $2{,}1\cdot10^{-13}$ m² $6{,}5\cdot10^{-19}$ m² $3{,}3\cdot10^{-14}$ m²	$7\cdot10^{-23}$ m² $2{,}5\cdot10^{-23}$ m²	$4\cdot10^{-23}$ m² $6\cdot10^{-23}$ m²
(ehemalige) Auflockerungszone	$3\cdot10^{-24}$ m² $1\cdot10^{-23}$ m²	$1\cdot10^{-23}$ m² $2\cdot10^{-24}$ m² $6{,}5\cdot10^{-21}$ m² $5{,}2\cdot10^{-23}$ m² $2{,}5\cdot10^{-24}$ m²	$1\cdot10^{-23}$ m² $4{,}6\cdot10^{-22}$ m²	$8\cdot10^{-24}$ m² $1{,}2\cdot10^{-22}$ m²

Tab. 8.2: Charakterische und Bemessungwerte der Permeabilität für den Baukörper, die Kontaktzone und die (ehemalige) Auflockerungszone

Element	X_k (5%-Fraktil)	X_k (95%-Konfidenz)	X_d mit $p_f < 0{,}1\%$	Vergleich: Mittelwert
Baukörper	$3\cdot10^{-22}$ m²	$5\cdot10^{-23}$ m²	$3\cdot10^{-21}$ m²	$3\cdot10^{-23}$ m²
Kontaktzone allgemein	$4\cdot10^{-22}$ m²	$7\cdot10^{-23}$ m²	$1\cdot10^{-20}$ m²	$1\cdot10^{-23}$ m²
Kontaktzone Firste*	$6{,}2\cdot10^{-13}$ m²	$4{,}7\cdot10^{-13}$ m²	$6{,}3\cdot10^{-12}$ m²	$4{,}6\cdot10^{-14}$ m²
(ehemalige) Auflockerungszone	$2\cdot10^{-21}$ m²	$1\cdot10^{-22}$ m²	$8\cdot10^{-20}$ m²	$2\cdot10^{-23}$ m²

* der Wert $6{,}5\cdot10^{-19}$ m² wurde nicht berücksichtigt

Die ermittelten integralen Permeabilitäten sind in Tab. 8.3 angegeben, wobei der Firste einmal die in Tab. 8.2 aufgeführten Werte zugeordnet werden und ein weiteres Mal der exemplarische Wert von $6{,}5\cdot10^{-19}$ m². Aus Tab. 8.3 wird deutlich, dass in beiden Fällen der vergleichsweise kleine Querschnitt der Kontaktzone in der Firste die integrale Permeabilität bestimmt. Zur besseren Veranschaulichung der Ergebnisse sind zusätzlich die Durchflussraten angegeben.

Im Ergebnis bleibt festzustellen, dass ein Streckenverschluss aus Salzbeton bei sorgfältiger Bauausführung prinzipiell in der Lage ist, die hydraulische Anforderung bezüglich der integralen Permeabilität zuverlässig zu erfüllen.

Tab. 8.3: Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse für die integrale Permeabilität

Integrale Permeabilitäten / Durchflussraten	X_k (5%-Fraktil)	X_k (95%-Konfidenz)	X_d mit $p_f < 0{,}1\%$	Vergleich: Mittelwert
k_{int} [m²] (Tab. 8.2)	$2{,}8 \cdot 10^{-14}$	$2{,}2 \cdot 10^{-14}$	$2{,}9 \cdot 10^{-13}$	$2{,}1 \cdot 10^{-15}$
k_{int} [m²] ($6{,}5 \cdot 10^{-19}$ m²)	$3{,}1 \cdot 10^{-20}$	$3{,}0 \cdot 10^{-20}$	$8{,}2 \cdot 10^{-20}$	$3{,}0 \cdot 10^{-20}$
$\dot{V}$ [m³/s] (Tab. 8.2)	$8{,}08 \cdot 10^{-5}$	$6{,}35 \cdot 10^{-5}$	$8{,}37 \cdot 10^{-5}$	$6{,}06 \cdot 10^{-5}$
$\dot{V}$ [m³/s] ($6{,}5 \cdot 10^{-19}$ m²)	$8{,}94 \cdot 10^{-11}$	$8{,}65 \cdot 10^{-11}$	$2{,}37 \cdot 10^{-10}$	$8{,}65 \cdot 10^{-11}$
$\dot{V}$ [l/d] (Tab. 8.2)	6 981	5 486	72 317	523
$\dot{V}$ [l/d] ($6{,}5 \cdot 10^{-19}$ m²)	0,0077	0,0075	0,020	0,0075

8.2.1.2 Beständigkeit

Im Zusammenhang mit der Stilllegung des ERAM wurden Untersuchungen zur Beständigkeit (Dauerhaftigkeit, Langzeitstabilität) von Salzbeton der Rezeptur M2 durchgeführt, die für die Streckenverschlüsse (Abdichtungen) vorgesehen ist. Die Rezeptur Salzbeton M2 setzt sich aus jeweils 16,4 M% Zement (CEM III) und Steinkohlenfilterasche, 13,5 M% Wasser und 53,8 M% Steinsalzgrus als Zuschlagstoff zusammen (ENGELHARDT ET AL. 2003).

Analog zu Normalbeton ist Salzbeton nicht beständig gegen alle Arten von Salzlösungen. Die Bandbreite möglicher Salzlösungen durch die Lösungszusammensetzungen NaCl-gesättigt und IP21 repräsentiert. Während Salzbeton gegen NaCl-gesättigte Salzlösung beständig ist, wird er durch IP21-Lösung korrodiert. Auf Grundlage von Kaskadenversuchen, Laboruntersuchungen und vorhandenen geochemischen Langzeitdaten aus dem Forschungsbergwerk Asse wurden Datensätze für die geochemische Modellierung abgeleitet (HERBERT ET AL. 2005). Unter Ansatz von Bandbreiten für die angesetzte Salzlösung, die Betonzusammensetzung und die thermodynamischen Konstanten wurde auf Grundlage von 10.000 Rechenfällen das 95%-Konfidenzintervall für das maximale Korrosionspotenzial ermittelt. Als auslegungsbestimmend ergab sich die Zusammensetzung der einwirkenden Lösung, ein Ergebnis, das mit vorhandenen Kenntnissen zum Normalbeton übereinstimmt.

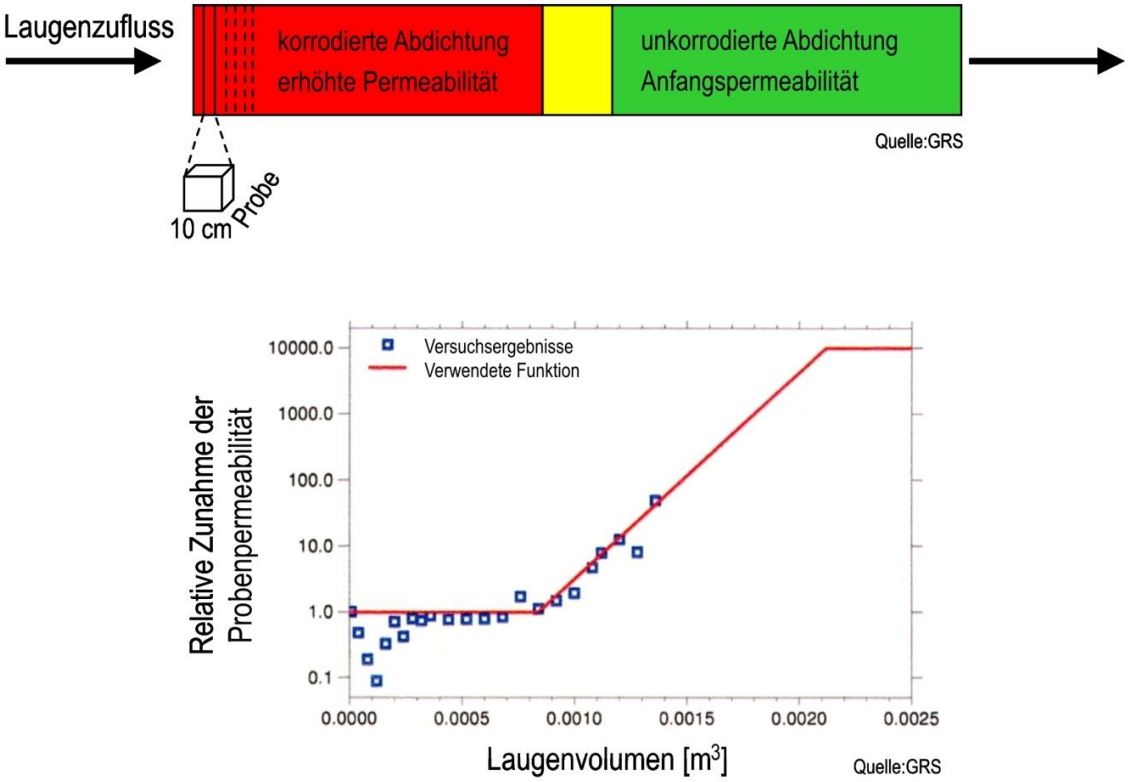

Abb. 8.3: Permeabilitätsabhängigkeit (HERBERT ET AL. 2005)

Auf Basis gekoppelter chemisch-hydraulischer Berechnungen wurde das Korrosionsverhalten eines Streckenverschlusses (Abdichtung) bei korrosivem Angriff durch IP21-Lösung modelliert. Da die Permeabilität des Streckenverschlusses bei chemischem Angriff durch Korrosion zunimmt (Abb. 8.3) ist die Anfangspermeabilität des Streckenverschlusses aus Salzbeton von entscheidender Bedeutung. Denn mit zunehmender Durchflussrate laufen die Korrosionsvorgänge schneller ab. Bei Erfüllung der Anforderung von $k_{int} = 10^{-18}$ m² ergibt sich unter den Randbedingungen, die in etwa dem generischen Streckenverschluss entsprechen, ein korrodierter Bereich von ca. 30 cm in 10.000 Jahren (HERBERT ET AL. 2005), der als Opferschicht betrachtet werden kann und dessen Einfluss auf das sonstige Verhalten des Streckenverschlusses vernachlässigt werden kann.

Falls nicht durchgehende Risse vorhanden sind, nimmt das Korrosionspotenzial in Richtung Rissspitze ab und die Korrosionsfront beschränkt sich auf einen vergleichsweise kleinen Bereich. Insofern kommt dem im folgenden Abschnitt beschriebenen Nachweis der Rissbeschränkung erhebliche Bedeutung zu.

8.2.1.3 Nachweis der Rissbeschränkung

Da der Streckenverschluss Dichtfunktion und Widerlagerfunktion wahrnimmt, ist der Nachweis der Rissbeschränkung gleichermaßen für den Baukörper, die Kontaktzone

und die (ehemalige) Auflockerungszone zu führen. Dabei werden Baukörper und Kontaktzone gemeinsam behandelt, da über die Kontaktzone die auf den Baukörper wirkenden Beanspruchungen in das Gebirge übertragen werden. In diesen Fällen ist der Nachweis für die Kontaktzone auch für die Auflockerungszone abdeckend. In Bezug auf die Rissbeschränkung in Folge der hydraulischen Einwirkung des Lösungsdruckes wird die Auflockerungszone gesondert behandelt.

Für die Bemessungssituation Bauzustände sind ausschließlich die thermischen Einwirkungen in Folge der Hydratationswärme des Salzbetons zu berücksichtigen, Einwirkungen aus aufkriechendem Salzgebirge und anstehender Lösungsdruck sind im Zeitraum der Bauzustände nicht vorhanden. Maßgebend für den Nachweis der Rissbeschränkung ist die Abkühlphase des Salzbetons, der als Suspension eingebracht wird, während des Abbindens Wärme entwickelt und dann als erhärteter Festkörper wieder abkühlt. Während der Abkühlung entstehen thermomechanische Zwangsspannungen im Baukörper und im umgebenden Salzgestein. Diese Zwangsspannungen können Rissbildung verursachen.

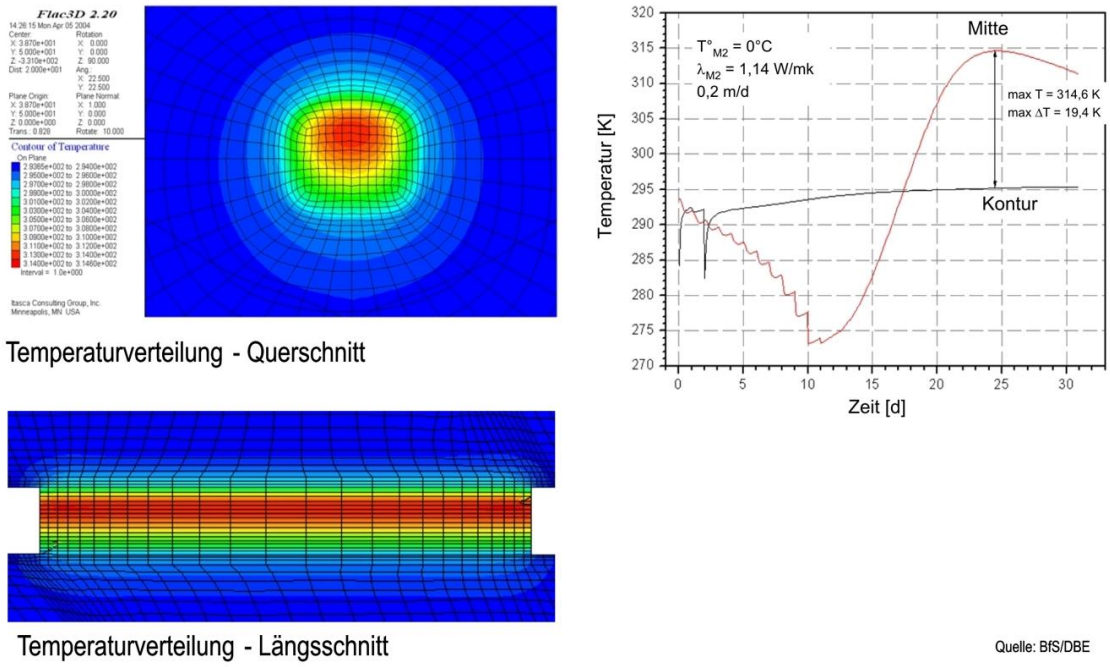

Abb. 8.4: Temperaturverteilung im Streckenverschluss (Abdichtung) und maximale Temperaturdifferenzen (MAUKE ET AL. 2007)

Für den Nachweis der Rissbeschränkung wurde im Fall der Streckenverschlüsse (Abdichtungen) als Grenzbedingung ein auf empirischer Erfahrung bei der Errichtung von Massenbetonbauwerken beruhendes Temperaturkriterium angewandt, das besagt, dass die maximalen Temperaturdifferenzen im Baukörper zu keinem Zeitpunkt $\Delta T = 20$ K überschreiten dürfen. Dazu wurden Temperaturberechnungen durchgeführt (MAUKE ET AL. 2007), siehe Abb. 8.4.

Die Temperaturberechnungen ergaben, dass für diesen Nachweis der Rissbeschränkung ein Kühlen des einzubringenden Salzbetons auf ca. 0°C erforderlich wäre.

Um dies zu vermeiden, wären weiterführende Untersuchungen durchzuführen, mit dem Ziel, die Rissbeschränkung für die Bauzustände unter Abbau von Konservativitäten an Hand spannungsbasierter Kriterien nachzuweisen.

Für den Baukörper und die Kontaktzone ist der ungünstigste Zeitpunkt erreicht, wenn einerseits die hydraulische Einwirkung, d.h. der einseitige Lösungsdruck seinen Maximalwert von 6 MPa erreicht hat, der Gebirgsdruck in Folge des aufkriechenden Gebirges aber noch so gering ist, dass die Festigkeit des Baukörpers und der Kontaktzone (Kohäsion bei Normalspannung null) maßgebend sind für die Übertragung des hydrostatischen Lösungsdrucks in das Gebirge.

Die auslegungsbestimmenden Spannungen im Baukörper und in der Kontaktzone werden analytisch ermittelt (LANCASTER 1964). Dieses alte Verfahren ist sehr einfach und anschaulich und wird heute in der Regel nur zur Vorbemessung eingesetzt, während die eigentliche Auslegung mit Hilfe numerischer Berechnungen erfolgt. Hier wird es aus Gründen der Anschaulichkeit verwendet, außerdem hat es sich in der Praxis durchaus bewährt.

Im Hinblick auf Schubversagen in der Kontaktzone ist die zulässige Schubspannung maßgebend, wobei überprüft wird, ob die (fiktive) Widerlagerlänge des Streckenverschlusses ausreicht. Dazu wird konservativ der Querschnitt als flächengleicher Kreis approximiert. Es gilt (LANCASTER 1964)

$$erf\ L_{W,\tau} = \frac{A \cdot p_L}{U \cdot zul\ \tau} \tag{5.1}$$

mit

$erf\ L_{W,\tau}$	Länge des Streckenverschlusses zur Ableitung der statischen Last
A	Querschnitt der Stirnfläche des Streckenverschlusses
p_L	Hydrostatischer Druck auf der Stirnfläche
U	Umfang des Streckenverschlusses
$zul\ \tau$	Zulässige Schubspannung in der Kontaktzone

Im Hinblick auf Biegezugversagen ist der Baukörper aus Salzbeton maßgebend. Die für den Biegespannungsnachweis erforderliche (fiktive) Widerlagerlänge lässt sich wie folgt bestimmen

$$erf\ L_{w,bz} = r\sqrt{\frac{0{,}375(1+k)\,p_L}{zul\ \sigma_z}} \tag{5.2}$$

mit

$erf\ L_{w,bz}$	Länge des Streckenverschlusses zur Aufnahme der Biegezugspannungen
R	Radius des Streckenverschlusses
p_L	Hydrostatischer Druck auf der Stirnfläche
v	Querdehnungszahl des Salzbetons
$zul\ \sigma$	Zulässige Zugspannung im Baukörper

Die Zusammenstellung der erforderlichen Kenngrößen ergibt:

- Länge des Streckenverschlusses: L= 25 m
- Querschnitt der Stirnfläche des Streckenverschlusses: A = 12,02 m²
- Radius des Streckenverschlusses: r = 1,96 m
- Umfang des Streckenverschlusses: U = 12,32 m
- Hydrostatischer Druck auf die Stirnfläche: p_L = 6 MPa
- Querdehnzahl v = 0,33

Auflaufender Gebirgsdruck wird nicht berücksichtigt.

Tab. 8.4: Charakterische und Bemessungswerte der Spaltzugfestigkeit von Steinsalz

Spaltzugfestigkeit σ_{sz}	**X_k (5%-Fraktil)**	**X_k (95%-Konfidenz)**	**X_d mit p_f < 0,1%**
$\sigma_{sz,k}$ [MPa]	1,02	1,72	-
$\sigma_{sz,d}$ [MPa] (Tragfähigkeit)	0,68	1,15	kein Wert bestimmbar
$\sigma_{sz,d}$ [MPa] (Rissbeschränkung)	0,54	0,92	

In GEORGI ET AL. 1973 sind Ergebnisse zu Spaltzugfestigkeiten einiger Steinsalze veröffentlicht. Für das Steinsalz „Allertalgraben Typ D, 500 m Teufe“ wurden 16 Probekörper geprüft. Diese zeigten einen Mittelwert der Spaltzugfestigkeit von σ_{sz} = 1,96 MPa und einen Variationskoeffizienten von 0,28. Die sich daraus ergebenden beiden charakteristischen Werte sowie die unter Ansatz von Teilsicherheitsbeiwerten γ_m = 1,5 für Tragfähigkeit und zusätzlich γ = 1,25 für Rissbeschränkung ermittelten Bemessungswerte sind in Tab. 8.4 angegeben.

Für die einaxiale Zugfestigkeit von Salzbeton M2 für die Streckenverschlüsse (Abdichtungen) des ERAM wird eine Bandbreite von 2,04 bis 3,03 MPa angegeben (MÜLLER-HÖPPE ET AL. 2002). Es wird angenommen, dass die Zugfestigkeit normalverteilt ist und die Bandbreite symmetrisch um den Mittelwert angeordnet ist, der sich dann zu

2,54 MPa ergibt. Da Angaben zum Variationskoeffizienten nicht veröffentlicht sind, wird angenommen, dass der Variationskoeffizient der einaxialen Zugfestigkeit von Salzbeton dem Variationskoeffizienten von Normalbeton entspricht. In DAFSTB 1995 ist für Normalbeton ein Wert von 0,236 angegeben. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass eine sehr große Zahl von Versuchen vorliegt (hier gewählt: 30). Die sich unter diesen Annahmen ergebenden charakteristischen Werte und Bemessungswerte der einaxialen Zugfestigkeit für den Salzbeton sind in Tab. 8.5 angegeben.

Tab. 8.5: Charakterische und Bemessungswerte der einaxialen Zugfestigkeit von Salzbeton

Spaltzugfestigkeit σ_{sz}	**X_k (5%-Fraktil)**	**X_k (95%-Konfidenz)**	**X_d mit p_f < 0,1%**
$\sigma_{sz,k}$ [MPa]	1,02	1,72	-
$\sigma_{sz,d}$ [MPa] (Tragfähigkeit)	0,68	1,15	kein Wert bestimmbar
$\sigma_{sz,d}$ [MPa] (Rissbeschränkung)	0,54	0,92	

Rissbeschränkung für Baukörper und Kontaktzone

Auf Grundlage von (5.1) und (5.2) ergeben sich bei Ansatz der 5%-Fraktile mit $\sigma_{sz,d}$ = 0,54 MPa und $\sigma_{z,d}$ = 0,82 MPa die erforderlichen Widerlagerlängen zu

$L_{W,\tau}$ = 10,85 m und $L_{w,bz}$ = 3,74 m < 25 m = $vorh\ L$

und bei Anwendung des 95%-Konfidenzintervalls mit $\sigma_{sz,d}$ = 0,92 MPa und $\sigma_{z,d}$ = 1,26 MPa die erforderlichen Widerlagerlängen zu

$L_{W,\tau}$ = 6,36 m und $L_{w,bz}$ = 3,02 m < 25 m = $vorh\ L$.

Für den Baukörper und die Kontaktzone ist somit der Nachweis der Rissbeschränkung zuverlässig geführt.

Für die Auflockerungszone ist der ungünstigste Zeitpunkt erreicht, wenn die hydraulische Einwirkung zu minimalen effektiven Drücken, d.h. minimaler Differenz zwischen totalem Druck und Porendruck, führt. In Abhängigkeit des zeitlichen Verlaufs des Druckaufbaus kann dieser Zeitpunkt im gesamten Zeitraum bis zum Erreichen des Maximaldrucks auftreten.

Für den Nachweis der Rissbeschränkung in der Auflockerungszone wird als Grenzbedingung das Fluidkriterium (Minimalspannungskriterium) bzw. die effektive Dilatanzbedingung für Steinsalz angewendet. Diese Kriterien besagen, dass der Porendruck der eindringenden Salzlösung geringer ist als die herrschende Gebirgsspan-

nung und deshalb keine Erweiterung der Poren/Risse erfolgt und damit eine Zunahme der Permeabilität ausgeschlossen ist.

Die beispielhaften Berechnungsergebnisse zur Streckenabdichtung sind in Abb. 8.5 dargestellt. Abb. 8.5 zeigt deutlich, dass es sehr lange dauert, bis das Kriterium erfüllt ist und auch nicht die gesamte Länge der Abdichtung als wirksam betrachtet werden darf. Im Falle des ERAM baut sich der hydraulische Druck an den Abdichtungen allerdings nur sehr lang-sam auf, da der Zufluss von Salzlösung aufgrund der Deckgebirgseigenschaften nur langsam erfolgt, siehe dazu mögliche Verläufe des Druckaufbaus (grüne und blaue Linie in Abb. 8.5). Bei instantanem Druckaufbau wäre der Nachweis für die Auflockerungszone nicht erbracht, da der Porendruck den Gebirgsdruck überschreitet, siehe ebenfalls Abb. 8.5 (orange Linie).

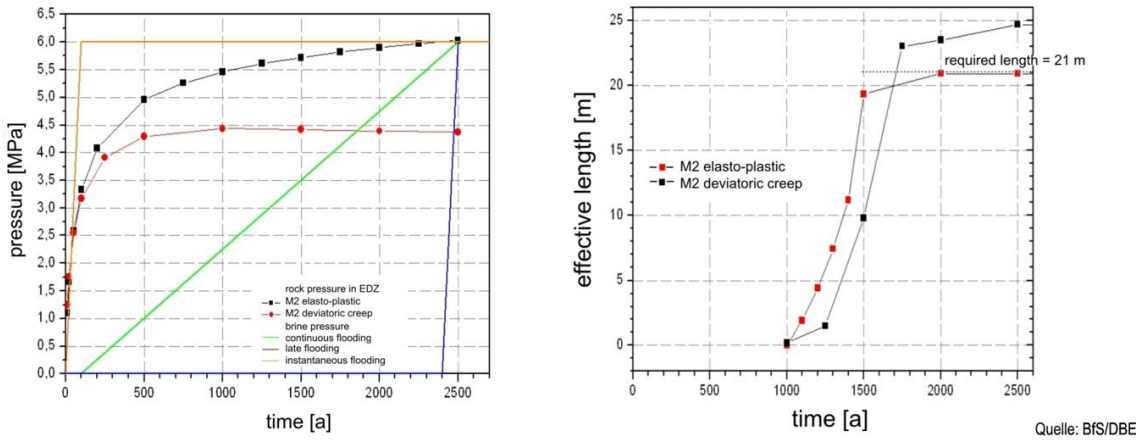

Abb. 8.5: Zeitlicher Verlauf des Druckaufbaus und effektive Länge des Streckenverschlusses (Abdichtung) (MAUKE ET AL. 2007)

Da der Nachweis der Rissbeschränkung für die Auflockerungszone, wie am o.g. Beispiel ausgeführt einerseits vom Zuflussszenario abhängt, andererseits vom kriechbedingten Spannungsaufbau in der der ehemaligen Auflockerungszone (vgl. Abb. 8.5) kann für den generischen Streckenverschluss keine belastbare allgemeingültige Zuverlässigkeitsaussage abgeleitet werden. Dies gilt, obwohl die Permeabilitätsmessungen am Asse-Vordamm in der ehemaligen Auflockerungszone zeigen, dass sehr geringe Permeabilitäten erreicht werden, wenn das Fluidkriterium tatsächlich eingehalten wird. Dies wird deutlich, wenn man die in Tab. 8.6 angegebenen Ergebnisse der Hydrofracmessungen in der Kontaktzone des Asse-Vordamms mit den Permeabilitätswerten in Tab. 8.6 und gleichzeitig berücksichtigt, dass der bei den Permeabilitätsmessungen verwendete Prüfdruck 1,2 MPa betrug und somit das Fluidkriterium erfüllt war.

Tab. 8.6: Ergebnisse der Hydrofracmessungen in der Kontaktzone am Asse-Vordamm (GLÄß ET AL. 2005). Die Hydrofracmessungen wurden in den gleichen Bohrungen wie die Permeabilitätstests durchgeführt

Position	Ruhedruck nach einer Stunde [MPa]	
	Vorn	Mitte
Sohle	3,5	15,6
Nordstoß	2,5	6,9
Südstoß	6,6	13,1
Firste	kein Druckaufbau	2,1

In Bezug auf die vorher aufgeführten, nachzuweisenden Funktionen und Eigenschaften für eine einzelne Barriere lässt sich das Ergebnis der Bestimmung des nachweisbaren Zuverlässigkeitsniveaus des generischen Streckenverschlusses wie folgt zusammenfassen.

Die Dichtfunktion des Streckenverschlusses aus Salzbeton im Steinsalz kann zuverlässig nachgewiesen werden, wenn der Nachweis der Rissbeschränkung gelingt. Dies gilt im Grundsatz auch für den Nachweis der Beständigkeit, wobei eine mögliche Umläufigkeit in der Auflockerungszone zwar noch zu untersuchen ist, da aber die Durchflussraten bei der geringen Permeabilität der (ehemaligen) Auflockerungszone ebenfalls gering sind, wenn der Nachweis der Rissbeschränkung gelingt, dürfte dieser Nachweis führbar sein. Dazu ist anzumerken, dass der Nachweis der Beständigkeit von der erforderlichen Lebensdauer des Streckenverschlusses bzw. vom zu Grunde gelegten Nachweiszeitraum abhängt.

8.2.2 Schlussfolgerungen

Die in der Bautechnik etablierte Methode der Teilsicherheitsbeiwerte bietet eine Reihe interessanter Ansatzpunkte hinsichtlich der Behandlung von Ungewissheiten in sicherheitsgerichteten Nachweisen, die auch für den Sicherheitsnachweis eines Endlagers von großem Interesse sind.

Sie bietet eine (in anderen Gebieten bereits erfolgreich praktizierte) Handhabe, um das gesamte Spektrum auftretender Ungewissheiten (von Daten- über Modell- bis zu Prognoseungewissheiten) systematisch derart bei der Auslegung und Bemessung eines Bauwerkes zu berücksichtigen, dass die geforderten Sicherheitsfunktionen über seine Lebensdauer mit einer vorgegebenen Zuverlässigkeit eingehalten werden. Sie verbindet dabei Auslegung und Nachweisführung und ist in Deutschland bereits in atomrechtlichen Genehmigungsverfahren (Stilllegung ERAM) für geotechnische Verschlussbauwerke eingeführt.

Naheliegend ist die Anwendung dieser Methode auch für den Integritätsnachweis der geologischen Barriere anhand der hierfür abgeleiteten geotechnischen Kriterien, dem Dilatanz- und dem Fluidkriterium (HEUSERMANN 2007). Streng genommen handelt es sich hier wiederum um eine Einheit aus Auslegung und Nachweisführung, denn im Rahmen der vorgefundenen geologischen Gegebenheiten ist durch geeignete Anord-

nung und Dimensionierung der Grubenbaue die verbleibende geologische Barriere „auszulegen“. Die besondere Relevanz dieses Nachweises für die Standorteignung ist offensichtlich.

Somit stellt die Methode der Teilsicherheitsbeiwerte eine Möglichkeit dar, alle auftretenden Ungewissheiten bei der Gesamtheit der Integritätsnachweise in gleicher Art und Weise zu berücksichtigen und dabei ein einheitliches Zuverlässigkeitsniveau für die Gewährleistung der Integrität sowohl der geologischen als auch der geotechnischen Barriere zu Grund zu legen.

Die vorrangig für bautechnische Nachweise abgeleiteten und im Regelwerk verankerten Grundsätze für die Auswahl von Bemessungsgrößen, Teilsicherheitsbeiwerten und somit der Sicherheitsauf- und -abschläge insgesamt orientieren sich an einem einheitlichen Zuverlässigkeitsmaßstab, der einen Verlust der Sicherheitsfunktionen während der geplanten Lebensdauer (den bautechnischen Nachweiszeitraum) auf 10^{-4} beschränkt. Diese Grundsätze berücksichtigen dabei sowohl Erfahrungswerte als auch Regeln für eine versuchsgestützte oder theoretisch begründete Festlegung der einschlägigen Kenngrößen. Bei Verwendung dieser Regeln in Nachweisen zu untertägigen Verschlussbauwerken als auch bei Integritätsnachweisen zur geologischen Barriere ist im Einzelfall sorgfältig die Äquivalenz mit den Sachverhalten zu prüfen, für die sie abgeleitet wurden. Eine Besonderheit besteht insbesondere hinsichtlich der anzusetzenden Nutzungs- bzw. Lebensdauer. Während sie bei üblichen Bauwerken im Bereich von 100 Jahren liegt sind für Verschlussbauwerke mehrere Tausend oder Zehntausend Jahre anzusetzen. Daher müssen einerseits alle zeitrelevanten Vorgänge wie z.B. Alterung oder Korrosion gesondert betrachtet werden. Andererseits ergibt sich die erheblich geringere Nutzungsdauer üblicher Bauwerken im hohen Maße aus den häufig wechselnden Witterungseinflüssen, während Verschlussbauwerke in relativ stabilen geologischen Umgebungsbedingungen errichtet werden.

Grundsätzlich erscheint es zweckmäßig, den Zuverlässigkeitsmaßstab von 10^{-4} auch den Integritätsnachweisen für die einschlusswirksamen Barrieren zugrunde zu legen, da er sehr gut mit international üblichen Sicherheitsmaßstäben für Endlager radioaktiver Abfälle korrespondiert. In Schweden gilt eine Risikoschranke von 10^{-6}/a einen radiologisch bedingten Gesundheitsschaden zu erleiden (SKI 2001), die bei einer Lebenszeit von ca. 100 a auch dem in Deutschland diskutiertem Lebenszeitrisiko von 10^{-4} entspricht, wobei die Umsetzung in der aktuellen Version der Sicherheitsanforderungen (BMU 2009) insbesondere hinsichtlich weniger wahrscheinlichen Entwicklungen einen gewissen Systembruch beinhaltet.

Wenn das Risiko eines Integritätsverlustes der einschlusswirksamen Barrieren vor Ablauf ihrer Lebensdauer in Übereinstimmung mit den Grundsätzen der Methodik der Teilsicherheitsbeiwerte 10^{-4} nicht übersteigt, dann kann das Lebenszeitrisiko einer Referenzperson wegen der geringen Eintrittswahrscheinlichkeit einer solchen Entwicklung unabhängig von den dabei eintretenden radiologischen Konsequenzen gleichfalls 10^{-4}

nicht übersteigen. Eine Betrachtung von Endlagerentwicklungen und radiologischer Konsequenzen, die das vorzeitige Versagen einer der einschlusswirksamen Barrieren unterstellen, ist dann für den Nachweis der Einhaltung eines solchen Schutzzieles strenggenommen nicht mehr erforderlich, sondern hätte nur den Rang von What-if-Fällen. Bei derartigen What-if-Betrachtungen ist es hingegen ausreichend, die damit verbundenen Ungewissheiten als „best estimates“ oder entsprechend als wahrscheinlichste Entwicklung zu berücksichtigen, da gering wahrscheinliche Parameterkonstellationen bzw. Entwicklungen bei gleichzeitigem Barriereversagen jenseits der praktischen Vernunft liegen. Die Anwendbarkeit radiologischer Grenzwerte in derartigen What-if-Betrachtungen ist wegen ihrer geringen Eintrittswahrscheinlichkeit aber nicht gegeben.

Eine bisher noch nicht abschließend geklärte Fragestellung bei der Anwendung der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte im Endlagerbereich besteht darin, dass sie für Bauwerke mit Lebensdauern bzw. Nachweiszeiträumen in der Größenordnung von 100 a entwickelt wurden. Für die einschlusswirksamen Barrieren eines Endlagers werden jedoch erheblich längere Zeiträume angesetzt. Auch die Übertragbarkeit empirisch gewonnener Bemessungsregeln ist im Einzelfall sorgfältig zu prüfen.

Obwohl der Eurocode EN 1990:2002 in C.6 (CEN 2002) selbst eine Handhabe zur Berücksichtigung abweichender Zeiträume bietet, sind entsprechende systematische Regeln für Endlagersysteme noch abzuleiten.

Ungeachtet dessen, sollte der dort angesetzte Zuverlässigkeitsmaßstab (von 10^{-4} als Restrisiko) dank der Korrespondenz mit den Sicherheitsmaßstäben für ein Endlager auch als Richtschnur für die Behandlung von Ungewissheiten dienen, die auch ohne Versagen einer einschlusswirksamen Barriere zum Tragen kommen. D. h. für Parameterkonstellationen und Endlagerentwicklungen bzw. deren Kombination mit Eintrittswahrscheinlichkeiten $\geq 10^{-4}$ ist die Einhaltung der radiologischen Schutzziele nachzuweisen, während Betrachtungen denen geringere Eintrittswahrscheinlichkeiten zugeordnet werden können, nur ergänzenden Charakter tragen.

8.3 Überprüfung des Instrumentariums für die Behandlung von Ungewissheiten bei der Bewertung von Freisetzungsszenarien

Die Behandlung von Ungewissheiten bei der Bewertung von Freisetzungsszenarien lässt sich wie folgt einteilen:

- FEP-Katalog: Benennung von Datenungewissheiten
- Szenarienentwicklung: Behandlung der Szenarienungewissheiten
- Modellvalidierung: Behandlung von Modellungewissheiten

– Unsicherheitsanalyse und Sensitivitätsanalyse: Behandlung von Parameterungewissheiten (auch von Daten- und Modellungewissheiten)

Wie in Kapitel 7.3 beschrieben wird in der Regel ein Großteil der identifizierten Modellungewissheiten nicht durch die Validierung der Modelle behandelt, sondern es wird versucht, diese Ungewissheiten auf die Parameter der Modelle zu übertragen. Auch bestehende Datenungewissheiten werden in der Regel auf die Parameterungewissheiten übertragen. Daher stehen die deterministischen und probabilistischen Methoden zur Behandlung von Parameterungewissheiten im Mittelpunkt der Betrachtung.

Für die Bewertung von Freisetzungsszenarien stehen eine Vielzahl von Werkzeugen zur Verfügung, die detailliert in (BUHMANN ET AL. 2008B) untersucht wurden. Der Einsatz probabilistischer Werkzeuge war dabei nicht Gegenstand der Untersuchungen. Die probabilistischen Werkzeuge werden ausführlich im Projekt ISIBEL-II getestet, insofern kann zu diesem Zeitpunkt nur auf Erfahrungen anderer Untersuchungen zurückgegriffen werden. In diesem Bericht werden dafür exemplarisch die Studien NOSECK ET AL. 2005 für deterministische Untersuchungen, BECKER ET AL. 2009A für probabilistische Untersuchungen und BUHMANN ET AL. 2004 für Sensitivitätsstudien herangezogen.

In BUHMANN ET AL. 2008B wurde vor allem der Einsatz des vorhandenen Instrumentariums zur Durchführung von deterministischen Rechnungen und Parametervariationen in diesen Rechnungen getestet. Die in dem vorhandenen Instrumentarium vorliegenden Modelle wurden bezüglich der Anwendbarkeit auf Endlager in Salzgestein für ausgewählte Szenarien untersucht und fehlende oder zu verbessernde Daten und Modelle identifiziert. Bei den für die Untersuchungen notwendigen Parametervariationen wurde deutlich, dass das vorhandene Instrumentarium geeignet ist, um Ungewissheiten in den Parametern der Modelle zu bewerten.

Eine detaillierte deterministische Untersuchung von Parameter- und Modellungewissheiten zum Modellansatz der Konvergenz und der eingesetzten Parameter liefert (NOSECK ET AL. 2005). In dieser Untersuchung wird der Konvergenzansatz gemäß (3.3) erweitert und der Modellansatz mit dem alten Ansatz nach (3.2) verglichen. Für den Vergleich wurden auch gebirgsmechanische Rechnungen (LERCH 2001) herangezogen. Für die bei dem erweiterten Ansatz neu benötigten Parametergrößen wurden Variationsrechnungen durchgeführt.

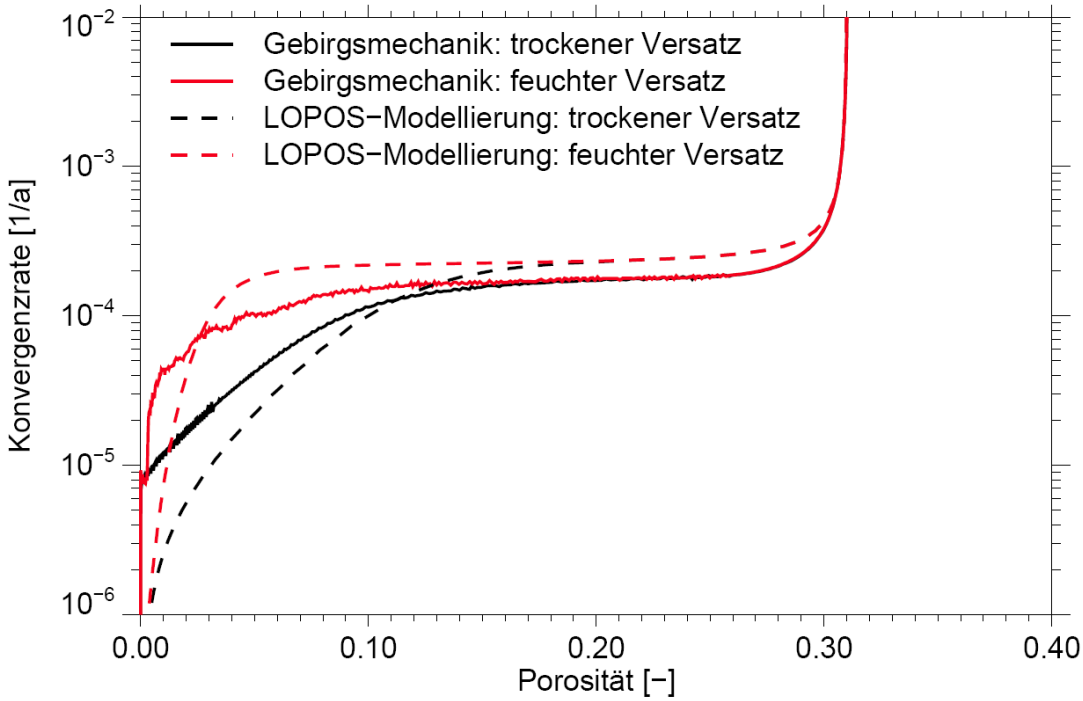

Abb. 8.6: Konvergenzraten als Funktion der Porosität für trockenen und feuchten Versatz (NOSECK ET AL. 2005)

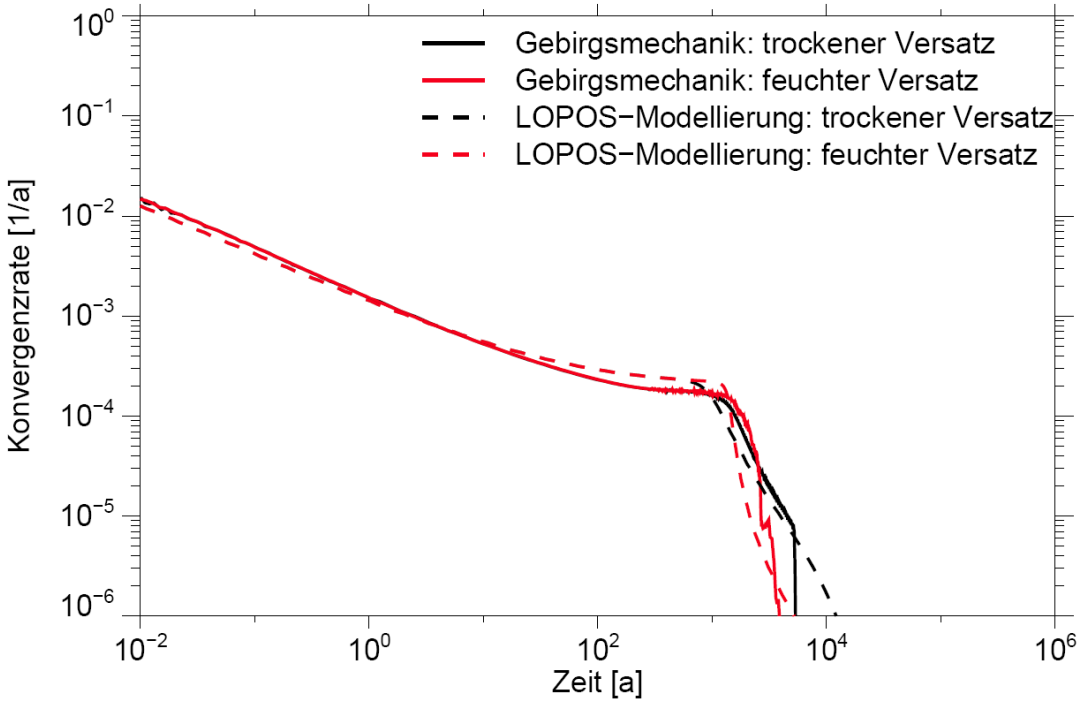

Abb. 8.7: Konvergenzraten als Funktion der Zeit für trockenen und feuchten Versatz (NOSECK ET AL. 2005)

Abb. 8.6 und Abb. 8.7 zeigen z.B. das berechnete unterschiedliche Verhalten von feuchtem und trockenem Versatz (abgebildet durch eine entsprechende Änderung der Funktion zur Berücksichtigung der Porosität f_ϕ in (3.2) und (3.3)) und vergleichen dieses Verhalten mit den Ergebnissen der gebirgsmechanischen Rechnungen.

Mit Hilfe solcher deterministischen Parameterstudien und dem Vergleich verschiedener Modellansätze wird vor allem eine Einschätzung des Einflusses von Ungewissheiten bei der Parameterbestimmung ermöglicht und das Vertrauen in die verwendeten Modellansätze gestärkt.

Probabilistische Untersuchungen für das ERAM wurden in BECKER ET AL. 2009A durchgeführt. In den probabilistischen Modellrechnungen wurde die Ausbreitung von Radionukliden aus den Einlagerungsbereichen auf dem Lösungspfad unter Berücksichtigung der Ungewissheiten der Eingangsparameter berechnet. Die Rechnungen wurden als Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt. Die Simulationen wurden anschließend in einer statistischen Unsicherheitsanalyse und einer globalen Sensitivitätsanalyse ausgewertet. Es wurde jeweils eine ausreichend große Anzahl unabhängiger Zufallsgrößen gewählt, um eine gute Voraussage über die Ungewissheiten des zukünftigen Systemverhaltens treffen zu können.

Für alle Zufallsgrößen wurden Verteilungsfunktionen definiert, welche die vorhandene Information über die möglichen Parameterwerte wiedergeben. Bei der Auswahl der Verteilungsfunktionen wurde nach den folgenden Richtlinien vorgegangen:

- Falls nur der Wertebereich für einen Parameter ermittelt werden kann und kein bevorzugter Wert bekannt ist, so wird eine Gleichverteilung verwendet: uniform
- Erstreckt sich im vorhergehenden Fall der Wertebereich des Parameters über mehrere Größenordnungen oder wird der Parameter mit einem Faktor variiert, so wird eine logarithmische Gleichverteilung verwendet: log uniform
- Falls der Wertebereich und innerhalb des Wertebereichs ein bevorzugter Wert für einen Parameter ermittelt werden können, so wird eine Dreiecksverteilung verwendet: Dreieck
- Wenn die Parameterwerte eine Häufung aufweisen, so wird eine Normalverteilung verwendet: normal
- Erstreckt sich im vorhergehenden Fall der Wertebereich des Parameters über mehrere Größenordnungen oder wird der Parameter mit einem Faktor variiert, so wird eine logarithmische Normalverteilung verwendet: log norm

Aufgrund ihrer mathematischen Natur können bei Normalverteilungen mit einer sehr kleinen Wahrscheinlichkeit auch sehr extreme Werte auftreten, die aber in Bezug auf die tatsächlichen Parameterwerte, die durch die Normalverteilung repräsentiert werden, unrealistisch sind. Daher werden die Normalverteilungen für die Monte-Carlo-

Analyse auf beiden Seiten begrenzt, sodass für die Zufallsgröße nur Werte innerhalb der vorgegebenen Grenzen auftreten können. Die in den nachfolgenden Tabellen angegebenen Grenzen bei den Normalverteilungen beziehen sich auf die 0,001- und 0,999-Quantile. Diese Grenzen entsprechen der 3,091-fachen Standardabweichung beiderseits des Mittelwerts.

Abbildung 8.8 zeigt ein Beispiel, wie das Ergebnis einer probabilistischen Unsicherheitsanalyse dargestellt werden kann. Bei Berücksichtigung der Ungewissheiten in den Parametern wird z.B. die maximale Strahlenexposition nicht als Zahl, sondern in Form einer Häufigkeitsverteilung angegeben. Für jeden Eingangsdatensatz ergibt sich als Ergebnis der Simulationsrechnung ein Zeitverlauf der Strahlenexposition, aus dem man die maximale Strahlenexposition entnimmt. Im dargestellten Beispiel kann man erkennen, das in allen Realisationen die maximal auftretende Strahlenexposition unter dem geforderten Wert $3 \cdot 10^{-4}$ Sv/a bleiben. Die Analyse der Parameterungewissheiten ist ein wichtiges Werkzeug, um zu zeigen, ob auch bei Berücksichtigung der identifizierten Ungewissheiten die Ergebnisse unter dem vorgegebenen Schutzziel bleiben. Auch zur Robustheit eines Endlagersystems können durch solche Analysen wertvolle Aussagen getroffen werden.

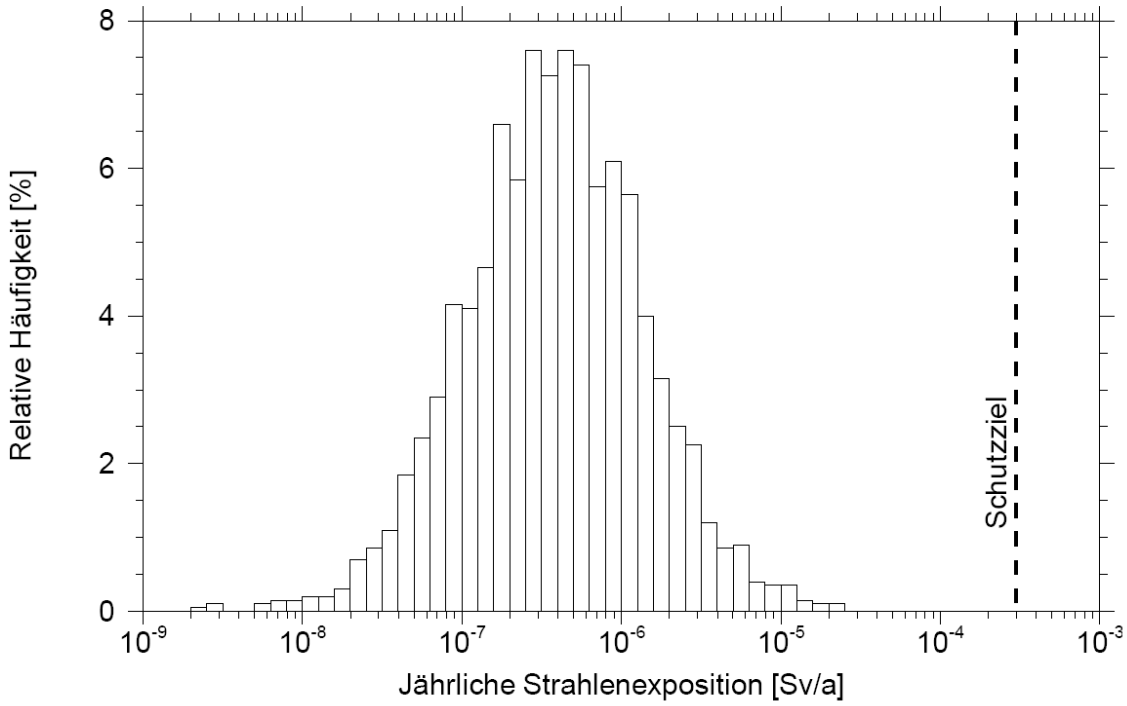

Abb. 8.8: Häufigkeitsdichte der maximalen Strahlenexposition (BECKER ET AL. 2009A)

Die probabilistische Modellierung liefert sehr viele weitere Möglichkeiten zur Darstellung und Bewertung von Ungewissheiten. Eine detailliertere Bewertung der existierenden Modelle zur Durchführung und Auswertung von Unsicherheitsanalysen und die

Möglichkeiten der Darstellung der Ergebnisse sind wie eingangs erwähnt im Nachfolgeprojekt ISIBEL-II vorgesehen. Während in der Unsicherheitsanalyse die Variabilität der Ergebnisse quantifiziert und analysiert wird, zielt die Sensitivitätsanalyse darauf ab, die Eingangsparameter entsprechend ihres Einflusses auf die Streubreite der berechneten Strahlenexpositionen in eine Rangfolge zu bringen.

In Kapitel 7.3.3 wurden bereits die gängigen Methoden der globalen Sensitivitätsanalyse vorgestellt. Für die Sensitivitätsanalyse von numerischen Modellen zur Beschreibung von Endlagern werden in der Regel Monte-Carlo-basierte Methoden, z.B. Korrelations- oder Regressionsverfahren (Spearman-Test) oder Monte-Carlo-Filtering (Smirnov-Test) verwendet. Vier dieser Methoden,

- der Korrelationskoeffizient nach Spearman,
- die standardisierte Regression,
- partielle Korrelationskoeffizienten und
- der Smirnov-Test,

sind im Programmpaket EMOS (BUHMANN 1999) umgesetzt und wurden auch in vielen Berechnungen eingesetzt, z.B. auch bei BECKER ET AL. 2009A. In Abb. 8.9 ist die Rangfolge der Parameter, die sich aus den Tests ergibt, dargestellt. Mit Hilfe dieser Zusammenstellung lassen sich die Relevanz der Parameter und damit die Relevanz der entsprechenden Ungewissheiten bewerten.

In BUHMANN ET AL. 2004 sind die mathematischen Grundlagen der in EMOS eingesetzten Methoden beschrieben. Dort wurde auch eine Bewertung dieser „klassischen“ Methoden vorgenommen. Nach dieser Bewertung sind alle Methoden zur Aufstellung von Bedeutungsranglisten wie in Abbildung 8.9 geeignet, liefern jedoch nur mehr oder weniger qualitative Sensitivitätsaussagen.

Es hat sich jedoch gezeigt, dass diese Methoden der Komplexität von Endlagermodellen nicht immer hinreichend gerecht werden und irreführende Ergebnisse liefern können. Anhand der Resultate solcher Untersuchungen können zwar die sensitiven Parameter zumeist ermittelt werden, eine Bewertung der Resultate selbst, z.B. im Hinblick auf Zuverlässigkeit und Robustheit der Verfahren, erfolgte im Allgemeinen jedoch nicht.

Speziell bezüglich der Anwendung auf Endlagermodelle ist in den letzten Jahren im Rahmen verschiedener nationaler und internationaler Projekte deutlich geworden, dass es gerade bei solchen Modellen aufgrund ihrer Komplexität und ihres z.T. hohen Grades an Nichtlinearität zu speziellen Problemen kommen kann, die nicht unbedingt in der Literatur dokumentiert sind.

Rang	Zufallsgröße	Spearman-Test				Partielle Korrelation				Standard. Rangregr.				Smirnov-Test			
1	Oberflächennaher Grundwasserfluss	1	3	2	1	1	3	2	1	1	3	2	1	2	4	1	1
2	Anfangspermeabilität der Abdichtung (Salzbeton)	2	4	1	2	2	4	1	2	2	4	1	2	5	2	4	2
3	Referenzkonvergenzrate	3	2	6	13	3	2	5	13	3	2	5	13	3	3	3	5
4	Gaseindringdruck	4	7	3	11	4	6	3	10	4	6	3	10	1	5	2	23
5	SF: Konvergenzrate	5	17	7	12	5	15	7	11	5	17	7	11	4	18	5	17
6	Zeitpunkt Auffüllen d. Restgrube	6	1	5	6	6	1	6	6	6	1	6	7	7	1	18	6
7	Querschnitt der Wegsamkeit im Hutgestein	8	5	21	4	8	5	22	4	8	5	22	4	8	8	10	3
8	Mg-Sättigung	7	10	4	3	7	10	4	3	7	10	4	3	15	10	8	9
9	Zersetzungsrate Polyethylen	9	44	9	7	12	26	11	7	9	15	9	5	6	18	6	11
10	K_d-Werte im Hutgestein	11	9	28	5	9	8	28	5	10	8	28	6	11	6	31	4
11	MB Bartensleben: Volumen	10	6	11	41	10	9	14	34	11	9	14	34	12	9	17	22
12	OF: Konvergenzrate	15	38	8	8	14	42	8	9	14	42	8	9	10	23	14	7
13	Diffusionskoeffizient	14	42	10	20	11	44	10	18	12	44	11	19	20	32	41	44
14	SF: C-14-Inventar	18	33	12	40	16	36	9	40	16	36	10	40	13	29	25	30
15	SF: Anteil Gasproduktion	16	37	16	23	15	43	12	24	15	43	12	25	24	35	34	19
16	WF: Konvergenzrate	19	24	18	44	18	24	18	45	18	26	18	45	19	21	43	15
17	Referenzporosität	13	39	15	28	13	40	15	35	13	40	15	35	37	45	19	8
18	Sonstige Restgrube Marie: Anteil Gasproduktion	25	16	30	16	19	18	24	15	19	20	24	15	21	25	11	38
19	Korrosionsrate von Eisen	12	29	13	9	36	25	33	25	31	14	31	16	9	11	9	31
20	Sonstige Restgrube Bartensl.: Konvergenzrate	17	8	39	45	17	7	41	42	17	7	41	42	39	7	37	29
21	Anfangsporosität Haufwerk	22	19	36	26	28	20	40	22	28	22	40	23	17	17	7	21
22	Longitudinale Dispersion im Hutgestein und Deckgebirge	21	26	19	38	21	27	17	37	21	27	17	37	32	43	39	20
23	ZT: C-14-Inventar	28	35	42	21	27	32	37	19	27	32	37	20	16	31	35	18
24	OF: Anteil Gasproduktion	20	40	14	22	23	38	19	26	23	38	19	26	36	22	22	25
25	Spezifische Abschalung	23	14	25	34	20	21	16	32	20	23	16	32	40	15	32	41

Abb. 8.9: Rangfolge der 25 sensitivsten Parameter bei der probabilistischen Untersuchung für das ERAM (BECKER ET AL. 2009A). Die Ränge sind hellorange unterlegt, wenn der entsprechende Wert in dem zugehörigen Hypothesentest mit einer Signifikanzzahl von 5% identifiziert wurde

Angesichts der erwähnten Nachteile der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Verfahren wurden verschiedene Methoden entwickelt, die aus der Varianz der Ausgangsgröße Maßzahlen für die Größe des Einflusses einer Zufallsgröße ableiten (SALTELLI 2000). Derartige, so genannte Bedeutungsmaße liefern eine quantitative, d.h. über die bloße Festlegung einer Rangfolge hinausgehende Aussage über die Stärke des Einflusses der betrachteten Eingangs- auf die Ausgangsgröße. Solche Verfahren setzen keinen linearen oder monotonen Zusammenhang voraus.

Die Anwendbarkeit varianzbasierter Verfahren, z.B. FAST oder Sobol, wurde in den vergangenen Jahren getestet (BUHMANN ET AL. 2004), wobei verschiedene Schwierigkeiten und Probleme erkennbar geworden sind, die ihre Ursachen z.T. gerade in speziellen Eigenschaften der betrachteten Konzepte und Modelle zu haben scheinen. Insbesondere Modelle für Endlager im Steinsalz reagieren aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften in oft unerwarteter Weise auf die verschiedenen Verfahren der Sensitivitätsanalyse. Diesbezüglich besteht noch Forschungsbedarf.

9 Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht wurde - ausgehend sowohl von nationalen als auch internationalen Konventionen und Erfahrungen - vorgestellt, wie mit Ungewissheiten in einem Langzeitsicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager im Salzgestein umgegangen werden kann. Die Behandlung der Ungewissheiten bezog sich dabei konsequent auf die Komponenten des im Projekt ISIBEL erstellten Sicherheits- und Nachweiskonzeptes.

Das wesentliche Ziel ist die Reduzierung der Ungewissheiten, im optimalen Fall ist eine Vermeidung der Ungewissheiten möglich. Beides ist vor allem bei der Standortauswahl und der Auslegung des Endlagers möglich. Bei der Standortauswahl können insbesondere Ungewissheiten hinsichtlich tektonischer und magmatischer Ereignisse vermieden werden. Ein Standort in Salzgestein hat auf Grund der Entstehungsgeschichte von Salzgesteinen zudem den Vorteil, dass er mit vergleichsweise wenigen Aufschlüssen plausibel beschrieben werden kann. Bei der Auslegung des Endlagers können vor allem die Auswirkungen der Ungewissheiten hinsichtlich des Einflusses zukünftiger Kaltzeiten und der Subrosion reduziert werden, indem die Einlagerungsbereiche in ausreichender Tiefe angelegt werden. Des Weiteren können weniger geeignete, Bereiche des Salzkörpers mit sicherheitsrelevanten Ungewissheiten in der Beschreibung bzw. Interpretation der Erkundungsergebnisse durch ausreichende Sicherheitsabstände gemieden werden. Zur Begrenzung der Auswirkungen unterschiedlicher geochemischer Milieus von eventuell zutretenden Lösungen werden die geotechnischen Barrieren durch technische Vorsorgemaßnahmen so ausgelegt, dass sie auch für verschiedene Milieus für den erforderlichen Zeitraum ihre Funktion erfüllen.

Für einen ausgewählten Standort ist für das gesamte Endlagersystem die Entwicklungsgeschichte zu analysieren und auf dieser Basis die zukünftige Entwicklung zu prognostizieren. Da der Nachweis für die Langzeitsicherheit für sehr lange Zeiträume zu führen ist und viele verschiedene Prozesse zu berücksichtigen sind, ergeben sich nicht vermeidbare Ungewissheiten hinsichtlich der Entwicklung des Endlagersystems. Diese Ungewissheiten werden mit Hilfe der Szenarienanalyse behandelt. In der Szenarienanalyse werden zunächst die relevanten Merkmale, Ereignisse und Prozesse (FEPs), die an einem Endlagerstandort auftreten können, zusammengestellt und daraus mögliche Entwicklungen des Endlagersystems abgeleitet. Die Szenarienanalyse hat entscheidenden Einfluss auf alle Komponenten des Nachweiskonzeptes und stellt ein wichtiges Werkzeug beim Umgang mit Ungewissheiten dar.

Eine geeignete Methode für eine umfassende Szenarienanalyse ist zurzeit für ein HAW-Endlager im Salzgestein noch nicht verfügbar. Mit der im Projekt ISIBEL entwickelten FEP-Datenbank existiert aber bereits ein wichtiges Werkzeug für die Entwicklung einer Methodik zur Ableitung von Szenarien und für eine Zuordnung zu Szenarienklassen mit unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten. Eine Methodik wurde bereits für die Ableitung eines Referenzszenarios erstellt und erfolgreich getes-

tet. Sie wird im Nachfolgeprojekt ISIBEL-II für die Ableitung von Alternativszenarien vervollständigt.

Neben den Ungewissheiten zur zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems verbleiben bei allen wichtigen Komponenten des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes Daten-, Parameter- und Modellungewissheiten, die nicht durch die Standortauswahl oder die Auslegung des Endlagers vermieden werden können. Diese Ungewissheiten gilt es zu identifizieren und möglichst auch zu quantifizieren. In diesem Bericht wurde eine Struktur erarbeitet, die eine übersichtliche Identifizierung der Ungewissheiten ermöglicht. Außerdem wurde eine tabellarische Übersicht der sicherheitsrelevanten Phänomene erstellt, deren Ungewissheiten zu behandeln sind.

Beim Umgang mit den nicht vermeidbaren Ungewissheiten bei den unterschiedlichen Komponenten des Nachweiskonzeptes wird neben der Szenarienanalyse zur Behandlung der Szenarienungewissheiten insbesondere auf folgende Ansätze gesetzt:

- Integritätsnachweis geologische Barriere → Verbal-argumentativer Umgang, zielgerichtete Variation von sicherheitsrelevanten Merkmalen und Prozessen
- Integritätsnachweis geotechnische Barriere → Methode der Teilsicherheitsbeiwerte
- Bewertung von Freisetzungsszenarien → Analyse der Ungewissheiten und Sensitivitäten von Parametern

Alle Methoden haben Vor- und Nachteile:

- Zu der auf der Grundlage von Expertenwissen durchgeführten zielgerichteten Variation einzelner Parameter im geologischen Standortmodell gibt es keine Alternative, die zu plausiblen Ergebnissen führt. Die getroffenen Entscheidungen, welche geologischen Gegebenheiten wie variiert wurden, müssen aber nachvollziehbar sein.
- Für den Nachweis der Integrität der geotechnischen Barrieren können Methoden herangezogen werden, die sich in der Ingenieurspraxis bei der Bewertung der Zuverlässigkeit von technischen Bauwerken bewährt haben. Schwierigkeiten bestehen hier in der Übertragbarkeit von empirisch abgeleiteten Bemessungsansätzen und darin, dass der Nachweis für die Zuverlässigkeit eines technischen Bauwerkes über deutlich längere Zeiträume als in der Ingenieurspraxis üblich zu führen ist.
- Bei der Bewertung der Freisetzungsszenarien mit entsprechenden numerischen Modellen gibt es bereits eine Vielzahl von qualifizierten Werkzeugen, die die Ungewissheiten der Modelle und ihrer Parameter quantifizieren können. Die Quantifizierung der verschiedensten Arten von Ungewissheiten mit Hilfe von Parameterverteilungen ist aber nicht unproblematisch. Formale Zugänge zur Ableitung von Wahrscheinlichkeitsdichten aus Expertenurteilen sind in ihrem Mechanismus schwer zu durchschauen und damit auch schwer kommunizierbar.

Insgesamt ergibt sich aus der Zusammenstellung der verschiedenen Ungewissheiten und der Methoden zu ihrer Behandlung auf Grund der teilweise recht unterschiedlichen Anforderungen an die verschiedenen Komponenten des Nachweiskonzeptes kein einheitliches Bild. Die eingesetzten Methoden spiegeln die spezifischen Anforderungen bei der Nachweisführung der unterschiedlichen Komponenten wider und sind in den entsprechenden Fachbereichen anerkannt.

Ungeachtet dessen ist es sinnvoll, bei der Behandlung von Ungewissheiten auf die bereits vorhandenen Methoden aufzubauen. Als wesentlichem Bestandteil der Nachweisführung erfordert die Behandlung von Ungewissheiten eine einheitliche Sprache in den unterschiedlichen Komponenten des Nachweiskonzeptes bei der Behandlung von Ungewissheiten zu entwickeln, um Missverständnissen bei der Abfassung eines Langzeitsicherheitsnachweises vorzubeugen und die Kommunikation der Ergebnisse nach Außen zu erleichtern. Dies ist eine wesentliche Aufgabe des vorliegenden Berichtes, die auch im Nachfolgeprojekt ISIBEL-II weiter bearbeitet werden soll.

Die bisherige uneinheitliche Praxis der Berücksichtigung von Ungewissheiten im Langzeitsicherheitsnachweis lässt jedoch die Frage offen, in welchem Maße Ungewissheiten berücksichtigt werden müssen, um die Zuverlässigkeit der Sicherheitsaussage, auf die sie sich zwangsläufig durchpausen, zu gewährleisten.

Als eine Vorstufe zur Beantwortung dieser Frage kann man die oft mit aufwändigen deterministischen oder probabilistischen Verfahren durchgeführten Sensitivitätsanalysen betrachten. Sie dienen der Ermittlung der Ungewissheiten, die besonders große Auswirkungen auf die Sicherheitsaussage haben, um sie bzw. ihre Auswirkungen möglichst zu reduzieren oder wenigstens eingehender zu bewerten.

Zum Umgang mit verschiedenartigen Ungewissheiten hat sich in der Bautechnik mit der Methodik der Teilsicherheitsbeiwerte ein zuverlässigkeitsbasiertes Sicherheitsnachweiskonzept etabliert. Ihm liegt die Überlegung zugrunde, dass von allen Teilaussagen des Sicherheitsnachweises ein gleiches Maß an Zuverlässigkeit gefordert wird, um eine solche Zuverlässigkeit respektive Sicherheit des Bauwerkes insgesamt gewährleisten zu können.

Unter Zuverlässigkeit eines Bauwerks wird dabei die Wahrscheinlichkeit verstanden, mit der es nicht versagt. Oftmals wird die Zuverlässigkeit eines Bauwerks auch durch die geringe Versagenswahrscheinlichkeit (typisch 10^{-4} bezogen auf die Bauwerksnutzungsdauer) ausgedrückt. Als Zuverlässigkeit einer Sicherheitsaussage (oder eines Sicherheitsnachweises) kann man entsprechend die Wahrscheinlichkeit verstehen, dass sie trotz bestehender Ungewissheiten tatsächlich wahr ist. Ausgedrückt werden kann diese Zuverlässigkeit wiederum durch eine in der Regel hinreichend kleine Wahrscheinlichkeit, dass eine Sicherheitsaussage trotz erfolgreich geführtem Sicherheitsnachweis wegen der verbliebenen Ungewissheiten falsch und damit die Sicherheit nicht gegeben ist. Daraus ergibt sich der unmittelbare Zusammenhang zwischen dem

von einem Bauwerk ausgehenden Risiko und seiner Zuverlässigkeit bzw. der Zuverlässigkeit des Sicherheitsnachweises.

Überträgt man diese Grundgedanken auf ein Endlager, ließe sich aus der geforderten Endlagersicherheit, respektive aus dem akzeptierten Maß des von einem Endlager ausgehenden Risikos, ein Zuverlässigkeitsmaßstab für den Sicherheitsnachweis und seine Teile ableiten. Ableitbar wären auf dieser systematischen Grundlage dann wohlbegründete Vorgaben zur erforderlichen statistischen Sicherheit bei der Anwendung von probabilistischen Methoden, zu sehr geringwahrscheinlichen Szenarien, die wegen ihrer Unerheblichkeit nicht mehr berücksichtigt werden müssen, etc.

Die detaillierte Ausarbeitung und Bewertung eines solchen gesamtheitlich systematischen Ansatzes für den Umgang mit Ungewissheiten beim Nachweis der Endlagersicherheit stellt auch international Neuland dar und sollte zweckmäßiger Weise in einem gesonderten Vorhaben erfolgen. Die Anwendung z.B. auf das Sicherheitsnachweiskonzept für ein HAW-Endlager im Salzgestein würde darüber hinaus helfen zu bewerten, im welchen Maße bestehende Ungewissheiten durch weitere FuE-Arbeiten vorrangig abzubauen sind, und welche ohne Auswirkung auf die Sicherheit des Endlagers hingenommen werden können.

10 Literatur

AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS (ANDRA 2005): Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation. Synthesis Report, ANDRA, Châtenay-Malabry, Frankreich.

ARBEITSKREIS SZENARIENENTWICKLUNG (AKS 2008): Position des Arbeitskreises „Szenarienentwicklung“: Behandlung des menschlichen Eindringens in ein Endlager für radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen. atw 53. Jg., Heft 8/9: 538-540.

BACKHAUS, D., SCHNIER, H., SPIES, T. (1997): ERA Morsleben - Bewertung geomechanischer und markscheiderischer Messungen. AP9M21330011, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

BECKER, D.-A. , BUHMANN, D., MÖNIG, J., NOSECK, U., RÜBEL, A., SPIEßL, S. (2009A): Endlager Morsleben: Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene Endlager mit dem Programmpaket EMOS. Gesellschaft für Reaktor- und Anlagensicherheit mbH, GRS-A-3454, Braunschweig.

BECKER, D.-A., DESTIN, O., NORDMAN, H., BOLADO, R., DURO, L., CORMENZANA, J. L., CUÑADO, M. A., VETEŠNÍK, A., AVILA, R., STENBERG, K. (2009B): Treatment of Parameter Uncertainty in PA. - PAMINA Deliverable (D-N°:2.2.A.1), Braunschweig.

BLASE, G., POTTHOFF, A., OCHS, F., UHLENBECKER, F.-W. (1989): Gebirgsmechanische Beobachtungen in Salzstöcken Norddeutschlands. Kali und Steinsalz, Band 10, Heft 6: 174-181.

BRASSER, T., DROSTE, J., MÜLLER-LYDA, I., NELES, J.M., SAILER, M., SCHMIDT, G., STEINHOFF, M. (2008): Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-247, Braunschweig.

BREIDUNG, K.P. (2002): Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken. - Forschungsvorhaben Schachtverschluss Salzdetfurth Schacht II, Abschlussbericht, K+S Aktiengesellschaft,Bad Salzdetfurth.

BUHMANN, D. (1999): Das Programmpaket EMOS- Ein Instrumentarium zur Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagern. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-159, Braunschweig.

BUHMANN, D., BECKER, D.-A., KEESMANN, S., KRÖHN, K.-P., RÜBEL, A. (2004): Aktualisierung sicherheitsanalytischer Rechenprogramme für Teilsystem eines Endlagers. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-200, Braunschweig.

BUHMANN, D., MÖNIG, J., WOLF, J., HEUSERMANN, S., KELLER, S., WEBER, J. R., BOLLINGERFEHR, W., FILBERT, W., KREIENMEYER, M., KRONE, J., THOLEN, M. (2008A): 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.

BUHMANN, D., MÖNIG, J., WOLF, J. (2008B): Untersuchung und Ermittlung von Freisetzungsszenarien – Teilbericht zum Projekt ISIBEL: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-233, Braunschweig.

BUHMANN, D., MÖNIG, J., WOLF, J., KELLER, S., WEBER, J. R., EBERTH, S., KREIENMEYER, M., KRONE, J., THOLEN, M. (2008C): FEP-Katalog für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz. Gemeinsamer Bericht von DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS. Peine, Hannover, Braunschweig.

BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (BFS 2009): Stilllegung ERA Morsleben: Plan zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. Vorabzug, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, Stand 31.03.2009. http://www.bfs.de/de/endlager/morsleben.html/stilllegungsplan_eram.pdf

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU 2009): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. BMU, Berlin, Juli 2009.

DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (DAFSTB 1995): Wirksame Betonzugfestigkeit im Bauwerk bei früh einsetzendem Temperaturzwang. DafStb, Beuth Verlag, Berlin.

DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (DAFSTB 1997): Sicherheitskonzept für Bauten des Umweltschutzes. DafStb, Beuth Verlag, Berlin.

DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (DAFSTB 2004): Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen, DafStb, Beuth Verlag, Berlin.

EBERTH, S.; MÜLLER-HOEPPE, N. (2009): Übertragung des Sicherheitsnachweiskonzeptes für ein Endlager im Salz auf andere Wirtsgesteine – ÜBERSICHT. TEC-30-2008-AB, FKZ: 02E9521, Peine.

ENGELHARDT, H.-J., KREIENMEYER, M., LERCH, C., MÜLLER-HOEPPE, N., KÖSTER, R., EILERS, G., PREUSS, J. (2003): A Constitutive Law of Salt Concrete Used for Closure of an LILW-Respository, The 9th International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, September 21-25, Oxford, UK.

EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG (CEN 2002): Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung. DIN EN 1990:2002-10, Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.

GALSON, D.A., KHURSHEED, A. (2007): The Treatment of Uncertainty in Performance Assessment and Safety Case Development: State-of-the-Art Overview. PAMINA Work Package 1.2, Rutland, UK.

GEORGI, F., MENZEL, W., SCHREINER, W. (1973): Zum geomechanischen Verhalten von Steinsalz verschiedener Lagerstätten der DDR, Teil I: Das Festigkeitsverhalten, Neue Bergbautechnik, 5. Jg., Heft 9.

GLÄß, F., MAUKE, R., MÜLLER-HOEPPE, N. (2003): Investigations on the ´Asse-Vordamm´ to prove tightness of the contact zone of the sealing constructions for the Morsleben Repository for Radioactive Waste (Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben, ERAM), European Commision CLUSTER Conference ´Impact of the Excavation Disturbed or Damaged Zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories´, Luxemburg, 3-5. November 2003.

GLÄß, F., MAUKE, R., EILERS, G., PREUSS, J., SCHMIDT, H., LERCH, C., MÜLLER-HOEPPE, N. (2005): Investigation of a salt concrete seal in the Asse salt mine. WM'05 Conference, 27.02.-03.03.2005, Tucson, AZ.

HERBERT, H.-J., BECKER, D., HAGEMANN, S., MEYER, T., WOSECK, U., RÜBEL, A., MAUKE, R., WOLLRATH, J. (2005): Alteration of Non-metallic Barriers and Evolution of Solution Chemistry in Salt Formations in Germany, Engineered Barrier Systems (EBS) in the Context of the Entire Safety Case, Process Issues, Workshop Proceedings, Las Vegas, USA, 14-17 September 2004, OECD/NEA.

HESSER, J., KUNZ, H., KÜCHEMANN, W., FLENTJE, R. (2008): Projekt Gorleben: Bewertung geomechanischer und markscheiderischer Messungen auf der Erkundungssohle des Erkundungsbergwerkes Gorleben – Jahresbericht 2006. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Bericht 9G3211020000, Hannover.

HEUSERMANN, S. (2007): Langzeitsicherheitsanalyse für ein HAW-Endlager im Salz - Nachweis der Integrität der geologischen Barriere. Technischer Bericht, Tagebuchnummer 10402/08, BGR, Hannover.

HIRSEKORN, R.-P., BOESE, B., BUHMANN, D. (1999): LOPOS: Programm zur Berechnung der Schadstofffreisetzung aus netzwerkartigen Grubengebäuden. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-157, Braunschweig.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA 1989): Evaluating The Reliability of Predictions Made Using Environmental Transfer Models. Safety Series No. 100, IAEA, Wien.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA 2006): Geological Disposal of Radioactive Waste. Safety Requirements No. WS-R-4, IAEA, Wien.

JAPAN NUCLEAR CYCLE DEVELOPMENT INSTITUTE (JNC 2000): H12 – Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan. Project Overview Report, JNC TN1410 2000-001, Japan Nuclear Cycle Development Insitute, Tokai-Mura, Japan.

KERN, H., FRANKE, J.-H. (1980): Thermische Stabilität von Carnallit unter Lagerstättenbedingungen. – Glückauf-Forsch.-H. 41/6: 252-255, Essen.

KREIENMEYER, M., LERCH, C., POLSTER, M., THOLEN, M. (2008): Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. AP 5: Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren. TEC-15-2008-AP, FKZ 02 E 10065, Peine.

LANCASTER, F. H. (1964): Report on Research into Underground Plougs, Transvaal and Orange Fee State Chamber of Mines, Research Organisation, Research Report No. 27, Johannesburg.

LERCH, C. (2001): Numerische Untersuchungen zum Konvergenzverhalten eines Einzelhohlraums. Deutsche Gesellschaft für Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Peine.

MAUKE, R, SCHMIDT, H. (2003): Untersuchung der Kontaktzone am Asse-Vordamm, Darstellung und Bewertung der Ergebnisse, BfS/DBE, Vortrag beim 32. Geomechanik-Kolloquium, Leipzig.

MAUKE, R., MÜLLER-HOEPPE, N., WOLLRATH, J. (2007): Planning, Assissment and Construction of a Drift Seal in a Spalt Repository – Overview of Investigations, Engineered Barrier Systems (EBS) in the Safety Case: Design Confirmation and Demonstration, Workshop Proceedings, Tokyo, Japan, 12-15 September 2006, OECD/NEA.

MEYER, T., TEICHMANN, L., HEYDORN, M. (2008): Geotechnische Messungen an einer Pilotströmungsbarriere. Tagung „Messen in der Geotechnik“, 23.-24.10.2008, TU Braunschweig.

MÜLLER-HOEPPE, N., KRONE, J. (1999): Ein neuer Ansatz zur Bewertung der Wirksamkeit von Barrieren im Endlager, Forschungsbericht zum BMBF-Vorhaben 02E9087, DBE, Peine.

MÜLLER, W., THOLEN, M. (2009): Abschätzung der Standzeit von Endlagergebinden in einem zukünftigen HAW-Endlager im Salzgestein unter dem Einfluss der Korrosion. atW, 54. Jg., Heft 5: 303-306.

MÜLLER-HOEPPE, N., MAUKE, R., WOLLRATH, J. (2002): Closure Concept for the Morsleben LLW Repository for Radioactive Waste, Design of the Drift Seals in a former Salt Mine, Engineered Barrier Systems (EBS) in the Context of the Entire Safety Case, Workshop Proceedings, Oxford, UK, 2002.

MÜLLER-HOEPPE, N., JOBMANN, M., POLSTER, M., SCHMIDT, H. (2007): The Role of Structural Reliability of Geotechnical Barriers of an HLW/SF Repository in Salt Rock within the Safety Case. OECD/NEA Symposium on “Safety Cases for Deep Disposal of Radioactive Waste – Where do we stand?”, 23.-25.01.2007, Paris.

NATIONALE GENOSSENSCHAFT FÜR DIE LAGERUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE (NAGRA 2002A): Project Opalinus Clay – Safety Report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate level waste (Entsorgungsnachweis). - NTB 02-05, Wettingen, Schweiz.

NATIONALE GENOSSENSCHAFT FÜR DIE LAGERUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE (NAGRA 2002B): Project Opalinus Clay – Models, Codes and Data for Safety Assessment. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate level waste (Entsorgungsnachweis). - NTB 02-06, Wettingen, Schweiz.

NATIONALE GENOSSENSCHAFT FÜR DIE LAGERUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE (NAGRA 2002C): Project Opalinus Clay – FEP Management for Safety Assessment. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate level waste (Entsorgungsnachweis). - NTB 02-23, Wettingen, Schweiz.

NOSECK, U., BREWITZ, W., BECKER, D.-A., BUHMANN, D., FAHRENHOLZ, C., FEIN, E., HIRSEKORN, R.-P., KEESMANN, S., KRÖHN, K.-P., MÜLLER-LYDA, I., RÜBEL, A., SCHNEIDER, A., STORCK, R. (2005): Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-204, Braunschweig.

NUCLEAR ENERGY AGENCY (NEA 2001): Scenario Development methods and Practice. An Evaluation Based on the NEA Workshop on Scenario Development, Madrid, Spain, May 1999, NEA/OECD, Paris.

NUCLEAR ENERGY AGENCY (NEA 2003): Engineered Barrier Systems and the Safety of Deep Geological Repositories - State-of-the-Art-Report. In Co-Operation with the European Commission, EUR 19964 EN, NEA/OECD, Paris.

NUCLEAR ENERGY AGENCY (NEA 2004): Post-closure Safety Case for Geological Repositories - Nature and Purpose. NEA/OECD, Paris.

NUCLEAR ENERGY AGENCY (NEA 2008): International Experiences in Safety Cases - Outcomes of the NEA INTESC initaitive. Final Draft, Paris.

ORGANISME NATIONAL DES DÉCHETS RADIOACTIFS ET DES MATIÈRES FISSILES ENRICHIES (ONDRAF/NIRAS 2001): SAFIR 2 - Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2, NIROND 2001–05 E, Brüssel.

POSIVA OY (2008): Safety Case Plan. POSIVA 2005-01, Olkiluoto, Finnland.

REFSGAARD, J. C., VAN DER SLUIJS, J. P., HØJBERGA, A. L., VANROLLEGHEMC, P. A. (2007): Uncertainty in the environmental modelling process – A framework and guidance. Environmental Modelling & Software. 22 (11): 1543-1556.

REMPE, N. T. (2007): Eight Years WIPP Progress. - Proc. Reposafe 2007, International Conference on Radioactive Waste Disposal in Geological Formations, November 6-9, 2007, Braunschweig.

RÖHLIG, K.-J. (1998): Zur räumlichen Variabilität an Standorten für Endlager radioaktiver Abfälle. Gesellschaft für Reaktor- und Anlagensicherheit mbH, GRS-A-2622, Köln.

SALTELLI, A., CHAN, K., SCOTT, E.M. (2000): Sensitivity Analysis, John Wiley & Sons Ltd, Weset Sussex, England.

SAVAGE, D. (1995): The Scientific and Regulatory Basis for the Geological Disposal of Radioactive Waste. John Wiley & Sons Ltd, Weset Sussex, England.

STATENS KÄRNKRAFTINSPEKTION (SKI 2001): SKI's Regulations concerning safety in connection with the disposal of nuclear material and nuclear waste. Statens Kärnkraftinspektion, Stockholm.

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING (SKB 2006A): Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main Report of the SR-Can project, SKB TR-06-9, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING (SKB 2006B): Data report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-25, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING (SKB 2006C): FEP report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-20, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING (SKB 2008): Model summary report for the safety assessment SFR1 SAR-08. SKB R-08-17, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA 1996): Title 40 CFR Part 194: Criteria For The Certification And Re-Certification Of The Waste Isolation Pilot Plant's Compliance With The 40 CFR Part 191 Disposal Regulations, Final Rule. Federal Register, Vol. 61, No. 28: 5224-5245, Washington, D.C.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY (DOE 2002): Final Environmental Impact Statement for a Geologic Repository for the Disposal of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste at Yucca Mountain, Nye County, Nevada, DOE/EIS-0250, Washington, D.C.

VIENO T., IKONEN, A. T. K. (2005): Plan for Safety Case of Spent Fuel Repository at Olkiluoto. POSIVA 2005-01, Olkiluoto, Finnland.

VIGFUSSON, J., MADOUX, J., RAIMBAULT, P., RÖHLIG, K.-J. & SMITH, R. (2007): European Study on the regulatory review of the safety case for geological disposal of radioactive waste. Case study: Uncertainties and their management.