



**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH**

**Wissenschaftliche
Grundlagen zum
Nachweis der
Langzeitsicherheit
von Endlagern**



Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH

Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern

Ulrich Noseck
Wernt Brewitz
Dirk-Alexander Becker
Brigitte Boese
Dieter Buhmann
Eckhard Fein
Peter Hirsekorn
Klaus-Peter Kröhn
Thomas Kühle
Ingo Müller-Lyda
Richard Storck

August 2000

Anmerkung:

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen FZK 02 E 8855 gefördert.

Die Arbeiten wurden von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt allein bei den Autoren.

GRS - 153
ISBN 3-931995-15-1

Deskriptoren:

Endlagerung, Gas, Geochemie, Geosphäre, Langzeitsicherheit, Modell, Sicherheitsanalyse

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Bearbeitung von Einzelthemen mit hoher Relevanz für LZSA	3
2.1	Permeabilität von Salzgrus	3
2.2	Permeabilität von Auflockerungszonen	7
2.2.1	Schließmechanismen	9
2.2.2	Zeitunabhängige Permeabilitätsreduktion unter Druckeinfluß	10
2.2.3	Zeitabhängige Permeabilitätsreduktion unter Druckeinfluß	11
2.2.4	Ergebnis	12
2.3	Daten zum Kolloidtransport	13
2.4	Sicherheitsanalysen für Endlager im Hartgestein	20
2.4.1	Studien anderer Länder	20
2.4.1.1	Nahbereichsmodelle	21
2.4.1.2	Fernfeldmodelle für geklüftete Gesteine	24
2.4.1.3	Überlegung zur Entwicklung neuer Instrumentarien	24
2.4.2	Langzeitsicherheitsanalyse: Durchführung und Ergebnisse	27
2.5	Natürliche Analoga	29
2.5.1	Ergebnisse aus internationalen Studien	29
2.5.2	Porenwassergewinnung aus tonigen Materialien	33
2.6	Zukünftige Entwicklungen	36
2.6.1	Zeitraumen	37
2.6.2	Prognose von Klimaänderungen	41
2.6.2.1	Methoden zur Prognose von Eiszeiten	42
2.6.2.2	Auswirkungen auf Schadstoffmobilisierung und -transport	44
2.6.2.3	Auswirkungen auf Standort und Bevölkerung	47
2.6.3	Vulkanismus	48
2.6.4	Neotektonische Bewegungen	49
2.6.5	Resümee	50
3	Verfolgung internationaler Aktivitäten	51
3.1	Performance Assessment Advisory Group (PAAG)	51
3.2	Site Evaluation and Design Experiments for Radioactive Waste (SEDE)	53
3.2.1	In-situ-Messungen in Untertagelabors und Feldversuche	55

3.2.2	Rolle der geologischen Barriere bei der Sicherheitsbewertung	57
3.2.3	Schnittstellen und Wechselwirkungen zwischen Geosphäre und ingenieurmäßigen Barrieren	58
3.2.4	Spezielle Aspekte tonhaltiger Gesteine (Clay-Club)	60
3.2.5	Integration Group for the Safety Case (IGSC)	62
3.3	Integrated Performance Assessment Group (IPAG)	64
3.4	GEOTRAP	66
3.4.1	Beiträge und Mitwirkung	67
3.4.2	Auswertung der Erkenntnisse aus den Workshops bezüglich der Modellierung des Radionuklidtransports in Granit	68
3.5	WIPP Peer-Review	70
3.5.1	Aufgabe und Zielsetzung	71
3.5.2	Genehmigungsgrundlage	71
3.5.3	Einzelergebnisse	72
3.5.4	Schlußfolgerungen	75
3.6	DECOVALEX	76
3.7	NEA-Statusreport Gasmigration und Zweiphasenfluß	77
3.7.1	Stand des Wissens zu Gasmigration und Zweiphasenfluß	78
3.7.1.1	Tonbarrieren	79
3.7.1.2	Zementbarrieren	80
3.7.1.3	Gastransport und Zweiphasenströmungen in der Geosphäre	81
3.7.1.4	Ansätze zur Modellierung von Gastransport und Zweiphasenströmungen	83
3.7.1.5	Vertrauensbildung in die Modelle	85
3.7.2	Mögliche Auswirkungen auf die Entwicklung von Endlagersystemen	86
3.7.2.1	Abgebrannte Brennelemente und HLW in Steinsalz	87
3.7.2.2	LLW/ILW in Kluffgestein	88
3.7.2.3	Abgebrannte Brennelemente in Kluffgesteinen	90
3.7.2.4	Abgebrannte Brennelemente und HLW in Tonstein und Schiefertone	91
3.7.2.5	ILW in Tonformationen	92
3.8	BIOMASS	94
3.9	Internationaler Kenntnisstand zur Szenarienanalyse	98
3.9.1	Methoden der Szenarientwicklung	98
3.9.2	NEA Workshop zur Szenarientwicklung	100
3.10	FEP Datenbank der NEA	101

4	Bewertung bisheriger und geplanter Vorhaben	103
4.1	Szenariientwicklung	103
4.2	Verhalten der Wirtsgesteinsformation	106
4.3	Chemische und physikalische Effekte im Nahfeld	109
4.3.1	Erzeugung und Verbleib von Gasen in einem Endlager im Salinar	109
4.3.1.1	Entstehung und Freisetzung von Gasen	109
4.3.1.2	Verhalten und Wirkung der Gase im Endlager	110
4.3.1.3	Modellierung des Gasverhaltens in Sicherheitsanalysen	111
4.3.2	Quellterme für Glas, LWR-Brennstoff und zementierte Abfälle	112
4.3.3	Diverse Arbeiten zum Nahfeld	115
4.4	Verhalten von geotechnischen Barrieren	120
4.5	Verhalten von geologischen Barrieren	123
4.6	Methoden und Rechenprogramme für Sicherheitsbewertungen	125
4.7	Validierung von Modellen, Unsicherheitsanalyse	127
5	Zusammenfassung	129
6	Literatur	133
	Abbildungsverzeichnis	143
	Tabellenverzeichnis	145

1 Einleitung und Zielsetzung

Bewertungen der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle erfordern ein leistungsfähiges und erprobtes Instrumentarium. Die allgemeine Vorgehensweise eines Sicherheitsnachweises muß den Anforderungen der nationalen Regelwerke gerecht werden und dabei auch dem internationalen Stand entsprechen. In den zur Berechnung sicherheitsanalytischer Prozesse einzusetzenden Programmen sind Modellansätze implementiert, die Datensätze aus verschiedenen geowissenschaftlichen, chemischen und ingenieurtechnischen Disziplinen benötigen. Sowohl die Modellansätze als auch die Daten müssen das Endlagersystem in seinen wesentlichen Eigenschaften abbilden und soweit möglich validiert sein.

In Deutschland sind Instrumentarien zum Langzeitsicherheitsnachweis von Endlagern von hochradioaktiven Abfällen vor allem im Hinblick auf Salz entwickelt worden. Weltweite Harmonisierungsbestrebungen und verstärkte internationale Kooperation bei der Endlagersicherheitsforschung haben bewirkt, daß in Deutschland vorhandene Modelle schrittweise auf andere Endlagerkonzeptionen und andere geologische Formationen angewendet werden. Die dafür notwendigen Entwicklungsarbeiten gestatten es, an internationalen Validierungsvorhaben teilzunehmen und die sicherheitsrelevanten Unterschiede der jeweiligen geologischen Formation besser quantifizieren und bewerten zu können.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden die wissenschaftlichen Ergebnisse aus experimentellen und theoretischen FuE-Vorhaben im Hinblick auf ihre Übertragbarkeit in Modellvorstellungen und Modelldaten für Langzeitsicherheitsanalysen ausgewertet. Beauftragte und laufende FuE-Projekte wurden in ihrer Relevanz für die Langzeitsicherheit überprüft. Internationale Entwicklungen zu offenen Fragen der Langzeitsicherheit wurden verfolgt und, wo erforderlich, mit Ihren Konsequenzen für die deutschen Endlagerkonzepte kommentiert. Vorrangig wurden Fragestellungen bearbeitet, die im Förderkonzept des BMBF zur Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen (1997-2001) aufgeführt sind.

Schwerpunktt Themen waren:

- Ableitung neuer Ansätze zur Beschreibung der Permeabilität von Salzgrus bzw. der Permeabilität von Auflockerungszonen in Langzeitsicherheitsanalysen auf Basis aktueller Forschungsergebnisse,
- Auswertung experimenteller Ergebnisse zu Wechselwirkungen von Actinoiden mit Huminstoffen mit Ableitung der Eingangsparameter zur Beschreibung des kolloidgetragenen Transports mit dem Rechenprogramm TRAPIC,
- Entwicklung eines vollständigen Instrumentariums für Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager für radioaktive Abfälle im Hartgestein und Durchführung erster sicherheitsanalytischer Studien (diese Arbeiten wurden im Rahmen des Projektes "Spent Fuel Performance Assessment" partiell von der Europäischen Union unterstützt),
- Beginn einer Statusanalyse über internationale Arbeiten zur Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen der hydrologischen, klimatischen und geologischen Verhältnisse in sicherheitsanalytischen Modellen,
- Verfolgung internationaler Studien zu Natürlichen Analoga mit Auswertung der geochemischen Erkenntnisse.

2 Bearbeitung von Einzelthemen mit hoher Relevanz für LZSA

Zu den oben genannten Schwerpunktthemen wurden aktuelle Forschungsergebnisse zusammengestellt, ausgewertet und, wo möglich, für die Verwendung in Langzeitsicherheitsanalysen aufbereitet. Dabei wurden z.T. neue Rechenmodule entwickelt, Modellansätze modifiziert oder auch Eingabeparameter aktualisiert. Ein Teil dieser Arbeiten ist in separaten wissenschaftlichen Berichten detailliert beschrieben und veröffentlicht worden. Auf diese Berichte wird an entsprechender Stelle verwiesen. Im folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefaßt.

2.1 Permeabilität von Salzgrus

Innerhalb eines Endlagers im Salinar wird der Transport von Laugen durch den Strömungswiderstand von Versatzmaterialien und Verschlüssen behindert. Dieser Widerstand wirkt sich sowohl bei einem Zufluß von Laugen in Einlagerungsbereiche als auch beim Auspressen kontaminierter Laugen aus dem Grubengebäude aus. Die bestimmende Größe für den Strömungswiderstand ist in diesem Fall die Permeabilität. Der vom Gebirgsdruck verursachte Konvergenzprozeß verringert den vorhandenen Resthohlraum und damit auch die Permeabilität der Versatzmaterialien und Verschlüsse.

In Langzeitsicherheitsanalysen wird der Zusammenhang zwischen Porosität und Permeabilität für Salzgrus in der Regel durch eine Potenzfunktion beschrieben. 1996 hatte die GRS auf Grundlage der bis Ende 1994 publizierten experimentellen Daten eine Relation für den Zusammenhang zwischen der Permeabilität k und der Porosität n für Salzgrusversatz abgeleitet [13].

$$k = A n^m \quad (1)$$

Diese beruhte auf einer porositätsbezogenen Regression von insgesamt 67 Permeabilitätsmeßwerten, die sich auf Grund der Versuchsbedingungen und der Dokumentation als verwertbar erwiesen hatten. Außerdem wurde gezeigt, daß die Permeabilität von feucht kompaktiertem Salzgrus signifikant stärker porositätsabhängig ist als die von trocken

kompaktiertem. Zusätzlich wurden zur Verwendung in probabilistischen Sicherheitsanalysen erstmalig die statistischen Verteilungsfunktionen der miteinander korrelierten Parameter der Permeabilitäts-Porositätsbeziehungen bestimmt.

Für den Bericht [13] lagen keine Daten für stark kompaktierten Salzgrus niedriger Porositäten $< 4\%$ vor. Dieser Bereich ist für Langzeitsicherheitsanalysen besonders wichtig. Diese Lücke wurde durch neuere Messungen weiter geschlossen, durch die sich die Anzahl der insgesamt verfügbaren Daten auf 521 erhöhte. Hiervon betreffen 484 Meßwerte Totalporositäten $> 0,3\%$. Für Porositätsmeßwerte $< 0,3\%$ wurde gezeigt, daß deren relative Meßfehler eine unzulässige, systematische Verringerung der mittels Regressionsanalysen bestimmten Porositätsexponenten bedingen. Mit dieser erheblich erweiterten Datenbasis wurden Permeabilitäts-Porositätsrelationen mit einem größeren Gültigkeitsbereich und kleineren statistischen Unsicherheiten abgeleitet. Die Arbeiten sind ausführlich in [33] beschrieben.

Die Permeabilität von kompaktiertem/teilkompaktierten Salzgrus wird durch die mikroskopische Verteilung und die dreidimensionale Vernetzungsstruktur des Porenraums bestimmt. Daher ist die Permeabilität als makroskopische Kenngröße eine komplexe Funktion mit einer Vielzahl von Eingangsparametern, von denen die totale Porosität der wichtigste ist. Mit einer Permeabilitätsrelation, die als Parameter nur den Mittelwert der Porosität heterogener Materialien enthält, kann die Variabilität der gemessenen Permeabilitäten nicht restlos beschrieben werden.

Mit abnehmender Porosität spielt der Unterschied zwischen der totalen Porosität und dem Porositätsanteil, durch den ein Fluidtransport erfolgt (effektive Porosität) eine zunehmende Rolle. Einzelne Messungen zeigen bereits, daß die Permeabilität bei sehr niedriger Totalporosität schneller abnimmt als nach einer Extrapolation des Potenzgesetzes zu erwarten ist. Die Datenbasis reicht derzeit für eine verfeinerte Regressionsanalyse, in der zwischen effektiver und Totalporosität unterschieden wird, nicht aus.

Durch Einbeziehung anderer Einflußgrößen für Salzgrus, wie beispielsweise Korngröße, Korngrößenverteilung, Wassergehalt, Kompaktionsgeschwindigkeit oder eine Berücksichtigung der realen Porenraumstruktur ließe sich die restliche Variabilität grundsätzlich weiter reduzieren. Da diese Parameter unter praktischen Gesichtspunkten nie vollständig

bekannt sind oder eine Detailplanung des Versatzes nicht praktikabel ist, muß in den Permeabilitätsberechnungen notwendigerweise ein gewisses Maß an Unsicherheit berücksichtigt werden.

Die Größe dieser Unsicherheiten hängt von der Anzahl und der Streuung der Meßdaten ab, welche die Datenbasis für die statistische Ermittlung der Schätzwerte für die Koeffizienten der Permeabilitäts-Porositätsbeziehung bilden. Daher kann man durch die Berücksichtigung aller verfügbaren experimentellen Ergebnisse aus Untersuchungen des Zusammenhangs zwischen der Permeabilität und der Porosität von kompaktiertem Salzgrus die Unsicherheit der Ergebnisse von Langzeitsicherheitsanalysen verringern.

Die Permeabilitäts-Porositätsrelationen mit den statistischen Bestwerten aus 367 Meßdaten für trocken bzw. aus 117 für feucht kompaktierten Salzgrus mit Totalporositäten von $n > 0,3\%$ lauten:

$$k_{tr} = 1,303 \cdot 10^{-10} \cdot n^{3,841} [\text{m}^2] \qquad k_{fe} = 7,464 \cdot 10^{-9} \cdot n^{5,253} [\text{m}^2]$$

Die aktualisierte Beziehung für k_{fe} basiert auf einer gegenüber der Analyse von 1996 um mehr als den Faktor 10 vergrößerten Datenmenge. Sie weist mit 5,2 einen gegenüber 9 erheblich kleineren Porositätsexponenten aus. Die Aussage aus früheren Untersuchungen, daß sich die Relationen für feucht und trocken kompaktierten Salzgrus signifikant unterscheiden, ist gleichwohl noch gültig.

Die gemeinsame Regression aller 484 Daten mit $n > 0,3\%$ ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen Anzahl der Meßdaten ergibt eine Permeabilitäts-Porositätsrelation mit einem Porositätsexponenten von etwa 4,2. Wenn die unterschiedliche Größe der Datenmengen in beiden Kategorien durch eine Regressionsanalyse mit entsprechend gewichteten Residuen kompensiert wird, ergibt sich ein Porositätsexponent von 4,5, der etwa dem arithmetischen Mittel der Exponenten für die beiden Datenkategorien entspricht.

$$k_w = 6,237 \cdot 10^{-10} \cdot n^{4,497} [\text{m}^2] \qquad k_{uw} = 2,540 \cdot 10^{-10} \cdot n^{4,175} [\text{m}^2]$$

Die ermittelten Konfidenzbereiche für die Porositätsexponenten von trockenem Material liegen innerhalb der nach der Theorie zu erwartenden Bandbreite.

Die Streuung der in die Regressionsanalyse eingegangenen Meßwerte bedingt eine statistische Unsicherheit der Schätzwerte für die beiden Koeffizienten m und A in dem Potenzgesetz für die Permeabilitäts-Porositätsrelation. Die statistische Analyse hat ergeben, daß diese Koeffizienten stark miteinander korreliert sind. Ihre statistische Verteilung kann durch eine spezielle bivariate Dichtefunktion beschrieben werden. In dieser Dichtefunktion ist der Porositätsexponent m normalverteilt und der Koeffizient A lognormal verteilt. Die Dichtefunktion läßt sich auf eine Zahlenwertgleichung mit sechs Koeffizienten reduzieren:

$$f(A, m) = \frac{c_1}{A} \cdot \exp \left[- \left(c_2 \cdot m + c_3 + c_4 \cdot \ln(A) \right)^2 - \left(c_5 \cdot \ln(A) + c_6 \right)^2 \right]$$

Die Koeffizienten c_1 bis c_6 sind in Tabelle 2.1 für die verschiedenen statistischen Analysen aufgeführt. Diese Beziehung kann in probabilistischen Rechnungen zur Ziehung von A/m -Wertepaaren verwendet werden, die in die einzelnen Spiele einer Monte-Carlo-Simulation als Koeffizienten in der Permeabilitäts-Porositätsrelation eingehen. Dabei kann je nach Situation der entsprechende Koeffizientensatz für die Kategorien "feucht kompaktiert", "trocken kompaktiert" oder beliebigen Salzgrus ausgewählt werden.

Tabelle 2.1: Abgeleitete Koeffizienten der Dichtefunktion

Kategorie	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
trocken	18,594	21,281	-214,05	-5,812	2,798	63,762
feucht	0,7113	3,947	-29,731	-0,6073	0,6032	11,961
alle, ungewichtet	15,139	19,763	-195,75	-5,145	2,405	52,940
alle, gewichtet	8,361	13,533	-127,88	-3,162	1,941	41,138

Die hier angegebenen Permeabilitäts-Porositätsrelationen wurden über Regressionen nach der totalen Porosität abgeleitet und decken den Bereich zwischen 0,3% und 42% ab. Dadurch wird die Untergrenze des Gültigkeitsbereichs gegenüber der GRS-Analyse von 1996 um mehr als eine Größenordnung nach unten ausgedehnt.

Eine Regression nach den effektiven Porositäten ist derzeit nicht möglich, weil hierzu keine Daten vorliegen. Aus einer speziellen, nichtlinearen Regressionsanalyse einzelner Meßreihen ergibt sich ein Hinweis auf einen unteren Grenzwert der totalen Porosität, bei der die Transportporosität und damit die Permeabilität auf 0 zurückgehen.

Permeabilität-Porositäts-Beziehung

Kenntnisstand

- Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung ist für Porositätsbereich bis hinab zu 0,3% abgesichert.
- Mit abnehmender Porosität spielt der Unterschied zwischen effektiver und totaler Porosität eine zunehmende Rolle. Auf Basis der bisherigen Meßdaten ist dieser Effekt noch nicht zu quantifizieren

Relevanz

hoch: Sensitivitätsanalysen zeigen daß die Eingangsparameter für die Permeabilität-Porositätsbeziehung das Ergebnisse von Langzeitsicherheitsanalysen wesentlich bestimmen.

Empfehlungen für weitere FuE

Durchführung zusätzlicher Permeabilitätsmessungen in Abhängigkeit der totalen und effektiven Porosität (bei niedrigen Porositäten). Ermittlung des Einflusses der effektiven Porosität.

2.2 Permeabilität von Auflockerungszonen

In den Randbereichen untertägiger Hohlräume bilden sich nach der Auffahrung als Folge der entstehenden deviatorischen Spannungszustände sogenannte Auflockerungszonen. In Auflockerungszonen, deren Ausdehnung im Fall einer Zugangs- oder Einlagerungsstrecke in einer Steinsalzformation bis zu 2 m in das Gebirge hinein betragen kann [14], sind verschiedene Gebirgskennwerte gegenüber dem unverritzten Gebirge verändert. Für die Nachbetriebsphase eines Endlagers ist die wichtigste Änderung die Erhöhung der Gebirgspermeabilität. In den sicherheitsanalytischen Modellansätzen betrifft dies die Verringerung der Strömungswiderstände, durch die die Ausbreitung schadstoffhaltiger Lösungen begünstigt werden kann.

Ungestörtes Salzgestein weist eine sehr niedrige Permeabilität $<10^{-21} \text{ m}^2$ auf. Ein solches Gestein ist für Gase und Laugen praktisch undurchlässig. In den stoßnahen Bereichen von Auflockerungszonen kann die Permeabilität demgegenüber auf Werte bis zu 10^{-16} m^2 oder noch darüber anwachsen [33]. Dadurch entstehen Wegsamkeiten für die Ausbreitung von Gasen und Flüssigkeiten, so daß im Endlagernahbereich Druckausgleichs- und Schadstofftransportvorgänge möglich oder begünstigt werden. Auflockerungszonen im Salinar sind allerdings nicht statisch, sondern verheilen unter Druckeinwirkung erfahrungsgemäß nach gewisser Zeit, und das Gestein erreicht wieder seinen Ausgangszustand. So wurde beispielsweise im Rahmen eines Projektes zur In-situ-Un-

tersuchung von Auflockerungszonen [76] festgestellt, daß die Permeabilität im Nahbereich eines ca. 80 Jahre zuvor eingebauten steifen Streckenverschlusses in 700 m Teufe um mehr als 3 Größenordnungen niedriger ist, als im Saum der benachbarten offenen Strecke. Ein weiterer Schwerpunkt dieses Projekts ist die Messung der In-situ-Permeabilitäten in Bereichen mit unterschiedlichen Gebirgsspannungsverhältnissen.

Neben diesem In-situ-Projekt werden derzeit in zwei FuE-Vorhaben der TU-Clausthal ergänzende Laboruntersuchungen durchgeführt [29], [54]. Ziel des einen Projektteils sind die Entwicklung und Validierung eines Stoffmodells zur Simulation der mechanisch hydraulischen Prozesse in aufgelockerten Saumzonen von Abdichtungs und Verschlussbauwerken in ihrer Zeitabhängigkeit. Im anderen Projektteil werden die durch plastische Deformation verursachte Dilatanz und die dadurch hervorgerufenen Permeabilitätseffekte im Salz untersucht.

Der für die Verheilung von Auflockerungszonen erforderliche Kompaktionsdruck wird durch den Gebirgsdruck erzeugt, der sich durch das Auflaufen der Stöße von Gebirgshohlräumen auf ein Widerlager - wie Verschlüsse, Dämme oder Versatz - aufbaut. Konstruktion, Geometrie und Materialeigenschaften der technischen Barrieren beeinflussen den zeitlichen Druckaufbau und damit auch die zeitliche Wirksamkeit der durchlässigen Auflockerungszonen.

Der Transport von Gas oder Lauge durch Auflockerungszonen, die sich im Druckbereich eines Verschlusskörpers befinden, ist dann zu berücksichtigen, wenn dessen Permeabilität gleich mit der des umgebenden Streckensaums oder geringer ist. Bei der Modellierung von strömungsabhängigen Transportvorgängen sollte im Sinne einer gewünschten Realitätsnähe die räumliche Ausdehnung und die Permeabilität der Auflockerungszonen berücksichtigt werden, und zwar unter den sich im Nahbereich langfristig einstellenden Randbedingungen. Daher ist insbesondere die Kenntnis der zeitlichen Entwicklung der Permeabilität unter Druckeinfluß eine wichtige Größe.

In den durchgeführten Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager in Salzstöcken wird die druckabhängige Permeabilität wegen des eingeschränkten Kenntnisstandes mit konservativen Annahmen belegt. So wird beispielsweise den Auflockerungszonen eine räumlich konstante Permeabilität und ein Querschnitt in der Größenordnung des Streckenquer-

schnitts zugeschrieben. Außerdem wird keine Permeabilitätsabnahme mit der Zeit berücksichtigt, also die Existenz dieser Auflockerungszonen für die gesamte Endlagerentwicklung unterstellt. Bei der Modellierung der Auflockerungszonen um die Schächte der amerikanischen WIPP-Site wurde dagegen eine orts- und zeitabhängige Permeabilität angenommen. Hier wurden die beschreibenden Relationen aus standortspezifischen Meßdaten für das Salz der Salado-Formation abgeleitet. Die Übertragbarkeit auf das Salz in norddeutschen Salzstöcken ist wegen der unterschiedlichen Feuchtegehalte vermutlich nicht gegeben.

2.2.1 Schließmechanismen

Durch den wirkenden Gebirgsdruck wird das Salzgestein in der Auflockerungszone zunächst elastisch komprimiert. Dabei wird die Weite der auflockerungsbedingten Risse verringert. Permeabilitätsänderungen durch elastische Verformung sind nur druck-, aber nicht zeitabhängig und reversibel. Die Sichtung der verfügbaren experimentellen Ergebnisse hat gezeigt, daß die Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz bei hydrostatischem Druckanstieg instantan um mehrere Größenordnungen reduziert wird.

Wenn der Druck zu niedrig ist oder die Reißflächen gegeneinander verschoben sind, werden die Auflockerungshohlräume durch die elastischen Verformungen allein nicht vollständig geschlossen. In Steinsalz findet dann eine plastische Verformung über Kriechprozesse statt, durch die das offene Volumen allmählich verringert wird. Am Ende dieses Prozesses wird wieder die Dichtigkeit von unverritztem Salzgestein erreicht. Dieser Mechanismus ist sowohl druck- als auch zeitabhängig. Bei einem schnellen Druckaufbau sind grundsätzlich auch bruchhafte Verformungen im Bereich von Spannungsspitzen an Berührungspunkten unebener Kontaktflächen möglich.

Bei der Verringerung der Auflockerung des Steinsalzes unter der Druckeinwirkung durch elastische und plastische Verformungen nehmen die Anzahl und die Weite der durchgängigen Strömungspfade allmählich und damit auch die Permeabilität des Materials entsprechend ab. Ein Modell zur Beschreibung der druckabhängigen Permeabilität muß

demnach einen zeitunabhängigen Term, der den Einfluß der elastischen und gegebenenfalls auch bruchhaften Verformungen berücksichtigt, und einen zeitabhängigen Term für die nachfolgenden Kriechverformungen enthalten.

2.2.2 Zeitunabhängige Permeabilitätsreduktion unter Druckeinfluß

Die publizierten Ergebnisse von Messungen, in denen die Druckabhängigkeit der Permeabilität systematisch untersucht wurde, zeigen eine sehr weite Bandbreite sowohl bei den Anfangspermeabilitäten als auch bei der Größe der druckbedingten Abnahmen. Es hat sich gezeigt, daß die Permeabilitätsreduktion unter Druckeinfluß durch die in den meisten Fällen vorgenommene Trocknung der Proben beeinflusst wird. Wegen der Größe dieses Effekts können derartig beeinträchtigte Proben nicht als repräsentativ für die Verhältnisse in einem Endlager angesehen werden.

Zunächst wurden anhand der publizierten Laborergebnisse die bestimmenden Einflußgrößen für die Permeabilitätsentwicklung von aufgelockertem Steinsalz identifiziert. Anschließend wurde eine hinreichend einfache Relation gesucht, mit der die Permeabilität der Auflockerungszone bei der Modellierung in Langzeitsicherheitsanalysen beschrieben werden kann. Dabei wurde zunächst geprüft, ob aus der Literatur bekannte Modelle auf Steinsalz übertragbar waren. Solche Modelle waren bereits zur Beschreibung der druckabhängigen Permeabilität von Festgesteinen entwickelt und deren Eignung in verschiedenen Untersuchungen belegt worden.

Dabei hat sich ergeben, daß nur die Meßwerte, die an getrockneten Proben bestimmt wurden, in der Regel gut durch ein solches Modell beschrieben werden. Die Meßwerte an ungetrockneten Proben zeigten dagegen ein abweichendes Verhalten und ließen sich nur ungenügend beschreiben. Da gerade die ungetrockneten Proben am ehesten die Verhältnisse in situ repräsentieren, mußte für diese ein empirisches Modell erstellt werden. Hierfür wurde folgender Ansatz gemacht:

$$\bar{k}(P) = k_{\infty} \cdot \exp\left(\frac{u}{1 + v \cdot P^w}\right)$$

Die vier Koeffizienten k_{∞} , u , v , und w werden durch Anpassung an die logarithmierten Meßwerte nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt. Dabei wurden nur die Meßwerte für ungetrocknete Proben verwendet.

2.2.3 Zeitabhängige Permeabilitätsreduktion unter Druckeinfluß

Der Umfang der bisher durchgeführten Messungen, in denen die zeitliche Permeabilitätsabnahme unter Druckeinfluß ermittelt wurde, ist im Vergleich zu den Kurzzeitmessungen gering. Ein Teil dieser Meßergebnisse konnte ebenfalls wegen ungeeigneter Testbedingungen nicht für die Beschreibung der Verhältnisse in einem Endlager berücksichtigt werden. Die vorliegenden Ergebnisse belegen aber eindeutig, daß die Feuchtigkeit des Salzes bzw. des Testfluids die Geschwindigkeit, mit der die Auflockerungen unter Druck wieder verschwinden, in hohem Maße beeinflussen. Getrocknete Proben zeigen bei Durchströmung mit trockenen Gasen innerhalb von 10^2 bis 10^3 h noch keine meßbaren Permeabilitätsänderungen. Bei ungetrockneten Proben ist bereits mit Raumluft ein merklicher Rückgang der Permeabilität zu verzeichnen, und mit wasserdampfgesättigtem Testfluid nimmt der Durchfluß in kürzester Zeit auf den Wert Null ab.

In einem ersten Ansatz wurde untersucht, ob die beobachtete zeitabhängige Permeabilitätsabnahme durch die Abnahme der Dilatation in den Proben beschrieben werden kann. Die Wahl dieses Parameters basierte einerseits auf einigen experimentellen Ergebnissen an aufgelockertem Steinsalz und andererseits auf der Analogie zu kompaktiertem Salzgrus, dessen Permeabilität eine Funktion der Porosität ist (siehe Kapitel 2.1). Die Anpassung der Meßwerte an das Dilatanzmodell war in den meisten Fällen gut möglich. Es stellte sich aber heraus, daß die Zulässigkeit zeitlicher Extrapolationen der Regressionsfunktion für dieses Modell aus Sicht der Langzeitsicherheitsanalyse nicht hinreichend gesichert ist, da ein anzupassender Parameter wegen der relativ kurzen Versuchszeiten nicht mit der erforderlichen Genauigkeit bestimmt werden konnte. Innerhalb der Schwankungsbreite der möglichen Werte dieses Parameters ändert sich die extrapolierte Zeit, in der die Permeabilität wieder die von unverritztem Salzgestein erreicht, um ca. 3 Größenordnungen.

Daher wurde in einem zweiten Ansatz auch eine Relation der Form

$$k \propto t^c \quad \text{bzw.} \quad \log(k) = c(T, P, \dots) \cdot \log(t),$$

d.h. die Gültigkeit eines Potenzgesetzes für den Zusammenhang zwischen k und t , geprüft. Die Wahl dieses Ansatzes wird weniger durch theoretische Gründe als durch Beobachtungen nahegelegt, daß die Meßreihen aus Experimenten mit Lauge als Testfluid in doppellogarithmischer Darstellung auf einen linearen Zusammenhang zwischen $\log(k)$ und $\log(t)$ zeigen, daß also die Permeabilität in Abhängigkeit von der Zeit nach einem Potenzgesetz abnimmt. Die geringe Zahl der verfügbaren Messungen gestattete aber nur eine lineare Regression von c nach P .

2.2.4 Ergebnis

Für die Modellierung dieser Vorgänge in Langzeitsicherheitsanalysen wurde versucht, aus den vorhandenen experimentellen Daten über die druck- und zeitabhängige Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz Relationen zur Beschreibung der In-situ-Permeabilität der Auflockerungszonen in einem Endlager in Salzgestein abzuleiten. Die Beschreibung der kurzzeitigen Permeabilitätsänderung von aufgelockertem Steinsalz unter Druckeinfluß ist gelungen. Dagegen kann für die langfristige Permeabilitätsabnahme unter Druckeinwirkung jedoch nur für den Fall der Durchströmung mit Lauge eine provisorische, unzureichend durch experimentelle Daten abgesicherte Relation angegeben werden. Die Beschreibung der Zeitabhängigkeit ist insofern problematisch, als die Zeiträume, die in Langzeitsicherheitsanalysen berücksichtigt werden müssen, um ein vielfaches länger sind als die in Experimenten möglichen Meßzeiträume.

Das Ergebnis der Regressionen der ausgewählten Meßdaten an die phänomenologischen Modellfunktionen für die zeitunabhängige und zeitabhängige Permeabilitätsabnahme unter Druckeinfluß ist in folgender Beziehung zusammengefaßt.

$$\log\left(\frac{k(P, t)}{1 \text{ m}^2}\right) = -21 + \frac{4,8}{1 + 0,01055 \text{ MPa}^{-2} \cdot P^2} - 0,0586 \text{ MPa}^{-1} \cdot P \cdot \log\left(\frac{t}{1 \text{ h}}\right)$$

Diese Relation beinhaltet eine außerordentlich starke Druckabhängigkeit der Änderungsgeschwindigkeit der Permeabilität. Diese Relation beruht auf einer sehr kleinen Datenbasis und bedarf zur Absicherung ihrer Inter- bzw. Extrapolierbarkeit in Anwendungen noch ergänzender Messungen. Hierbei müssen insbesondere die Feuchtigkeitsverhältnisse sowohl bei den Proben als auch bei den Meßfluiden den Bedingungen in einem verschlossenen Endlager entsprechen.

Die Anwendbarkeit dieser phänomenologischen Relation ist auf Sicherheitsanalysen für Endlager in Steinsalz beschränkt. Die hier beschriebenen Arbeiten sind detailliert in [34] dargestellt.

Permeabilität von Auflockerungszonen

Kenntnisstand

- Ein Modellansatz zur Beschreibung kurzzeitiger Permeabilitätsänderungen unter Druckeinfluß existiert.
- Es gibt noch keine ausreichend abgesicherte Funktion zur Beschreibung der Permeabilitätsabnahme unter Druckeinwirkung über lange Zeiträume.

Relevanz

hoch, da Laugentransport über die Auflockerungszone erheblich zur Nuklidfreisetzung beitragen kann.

Empfehlungen für weitere FuE

Absicherung der Funktion zur Beschreibung der Permeabilität über lange Zeiträume anhand neuer Experimente, soweit noch nicht durch die laufenden FuE-Arbeiten der BGR und der TU-Clausthal abgedeckt.

2.3 Daten zum Kolloidtransport

Die Auswirkung von Kolloiden auf die Migration von Radionukliden im Fernfeld von Endlagern über sehr lange Zeiträume ist bisher noch nicht abschließend geklärt. In den geologischen Formationen, die die Salzstöcke der norddeutschen Tiefebene überlagern, treten Huminstoffe z.T. in sehr hohen Konzentrationen von bis zu 100 mg C/l auf. Aus diesem Grund wurden innerhalb der letzten Jahre verschiedene Säulenexperimente zur Untersuchung der Migration der Actinoide Am, Pu, Np, Pa, U und Th in huminstoffreichen Grundwässern durchgeführt [21, 22]. Mit den gleichen Sediment-Grundwassersystemen wurden begleitende Batch-Experimente durchgeführt. Die wichtigsten Resultate dieser Experimente lassen sich wie folgt beschreiben: Die Actinoide migrieren durch die

Säule, ohne retardiert zu werden, obwohl die Ergebnisse aus Batch-Experimenten eine signifikante Rückhaltung erwarten lassen [78]. Die Wiedererhaltung liegt in allen Experimenten deutlich unter 100% und die Durchgangskurven zeigen ein signifikantes Tailing. Für Europium korreliert die Wiedererhaltung mit abnehmender Darcy-Geschwindigkeit. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, daß kinetische Effekte eine wichtige Rolle spielen. Deshalb sollten folgende Fragestellungen untersucht werden:

- Verläuft der Austausch zwischen gelöster und kolloidgebundener Schadstoffphase schnell, d.h. kann ein Gleichgewicht zwischen gelösten und kolloidgebundenen Schadstoffen angenommen werden?
- Gibt es Wechselwirkungen der Kolloide mit der Gesteinsmatrix und sind diese Wechselwirkungen (falls existent) reversibel oder irreversibel?
- Sind Aussagen bezüglich der Kinetik der Ad- bzw. Desorption der Schadstoffe an die Kolloide herzuleiten, d.h. sind Aussagen über Stabilität der Kolloid-Schadstoff-Bindungen anhand der Experimente möglich?

Zur Untersuchung dieser Fragen wurde im Rahmen des Projekts "Weiterentwicklung des Rechenprogramms EMOS zur Durchführung von Langzeitsicherheitsanalysen" (FKZ 02 E 8835 6) das Transportmodell TRAPIC (Transport of Pollutants Influenced by Colloids) entwickelt, das die in Abbildung 2.1 dargestellten vier verschiedenen Schadstoffphasen, berücksichtigt [24].

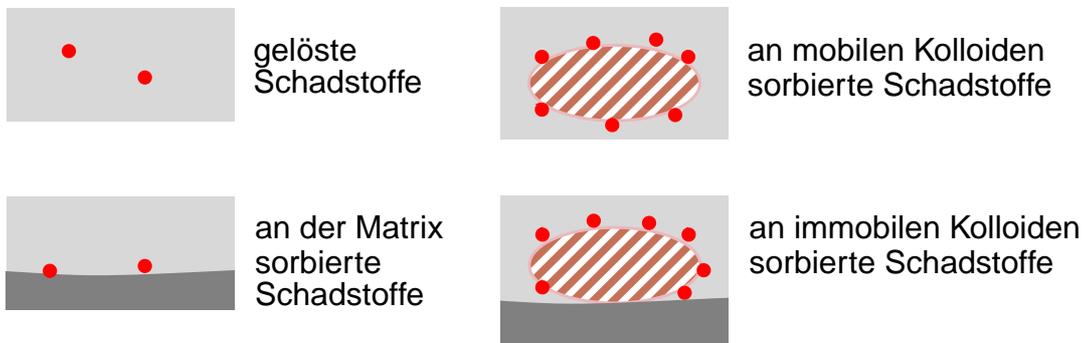
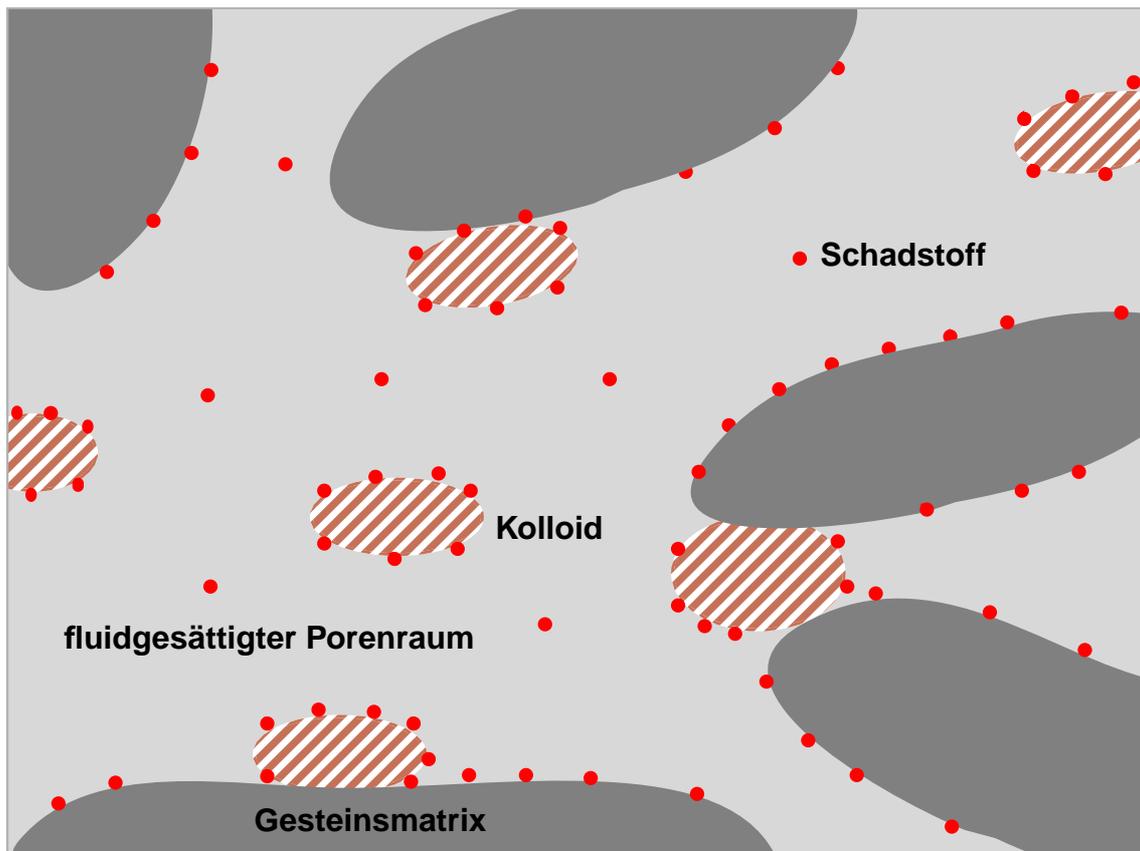


Abb. 2.1: Schematische Darstellung der einzelnen im Rechenprogramm TRAPIC berücksichtigten Phasen.

In enger Zusammenarbeit wurden im Rahmen des hier vorgestellten Projekts aus aktuellen experimentellen Arbeiten Ergebnisse und Daten zusammengestellt und daraus Eingangsparameter für die Migration dreiwertiger Actinoide abgeleitet. Mit diesen Daten wurden dann Säulenexperimente von *Klotz et al.* [23], simuliert. Aufgrund der chemischen Ähnlichkeit mit den Actinoiden Americium und Curium sind die für Europium ermit-

telten Daten auch auf die Actinoiden übertragbar. Alle verwendeten Daten sowie die durchgeführten Simulationsrechnungen für das o.g. Migrationsexperiment sind ausführlich in [24] - [27] beschrieben. Als Eingangsparameter für das Modell werden Daten

- zur Bildung und zum Transportverhalten von Kolloiden
- zur Wechselwirkung von Nukliden mit Huminkolloiden,
- zur Wechselwirkung von Nukliden mit dem Sedimentgestein sowie
- hydrogeologische Daten

benötigt. Tabelle 2.2 zeigt die für Europium abgeleiteten Eingangsdaten für das Modell.

Tabelle 2.2: Eingangsparameter für die Simulationen der Europium-Migration in huminstoffreichen Grundwässern mit dem Programm TRAPIC

Dichte der Kolloide	1200 kg m^{-3}
Diffusionskonstante der Kolloide	$10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
Diffusionskonstante des Actinoids	$3 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
Korndurchmesser	$2 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
Langmuir-Konstante	$0.496 \text{ m}^3 \text{ g}^{-1}$
Komplexbildungskonstante	$5.23 \cdot 10^5 \text{ l mol}^{-1}$
Sorptionskapazität der Matrix für dreiwertige Actinoide	3.322 g kg^{-1}
Sorptionskapazität der Kolloide für Actinoide	$1.787 \text{ mol kg}^{-1}$
mobile Kolloidkonzentration	0.08 g l^{-1}
immobile Kolloidkonzentration	3.84 g m^{-3}
Sorptionsrate von Actinoiden an die Matrix	$> 1.4 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

Die hydrogeologischen Daten wie Porositäten, Filtergeschwindigkeiten und Dispersionslängen wurden jeweils direkt aus Experimenten mit idealen Tracern bestimmt. Da keine abgesicherten Daten zum Kolloidtransport vorlagen, wurde dieser analog zum Schadstofftransport modelliert.

Die Wechselwirkung von Actinoiden mit Huminstoffen wurden in einer Reihe von Arbeiten untersucht. Die im Modell benötigten Parameter sind die Sorptionskapazität und die Komplexbildungskonstante. Die Sorptionskapazität κ_C der Kolloide für Kationen ergibt sich aus dem Produkt mit der Protonenaustauschkapazität der Huminstoffe κ_H , wobei die Ladung z des betrachteten Radionuklids berücksichtigt werden muß.

$$\kappa_C = \frac{C_C \kappa_H}{z} \quad (2)$$

Da das Molekulargewicht von Huminsäuren stark variiert, wird die Konzentration von Huminstoffen C_C in [g/l] angegeben. Das für die oben genannten Säulenexperimente verwendete Grundwasser hat eine relativ hohe Huminstoffkonzentration von 80 mg/l. Die Protonenaustauschkapazität von natürlichen Huminsäuren wurde von *Buckau* [8] zu 5.36 mol/kg bestimmt. Die Komplexbildungskonstante von dreiwertigem Americium an Huminsäuren wurde zu $\log \beta = 6.44$ bestimmt. Unter Berücksichtigung, daß unter der gegebenen Lösungszusammensetzung ein Teil des Americiums als Carbonatkomplex vorliegt, ergibt sich als Eingangsparmeter für das Modell $\beta = 5.2 \cdot 10^5 \text{ l mol}^{-1}$ [73]. Auf Basis dieser Werte kann man den Anteil von Eu berechnen der im Gleichgewicht in der Injektionslösung kolloidgebunden vorliegt. Es ergibt sich ein Wert von 98%, der sehr gut mit den experimentellen Beobachtungen übereinstimmt [23].

Verteilungskoeffizienten für dreiwertige Actinoide wurden in zahlreichen sandigen Sediment-Grundwasser-Systemen des Deckgebirges in Gorleben gemessen. Für dreiwertiges Americium wurden Verteilungskoeffizienten $\log (b_1 \kappa_S)$ in einer Größenordnung von 1.0 bis 4.7 [$\log (\text{l/kg})$] bestimmt. Für die Simulationen wurde ein Wert von $(b_1 \kappa_S) = 3,2 \log(\text{l/kg})$ angenommen. Die Sorptionskapazität des sandigen Sediments wurde aus dem Platzbedarf eines Europium-Ions (6 Sorptionsplätze pro nm^2) und der spezifischen Oberfläche der Probe von $2,21 \text{ m}^2/\text{g}$ ermittelt. Zusätzlich wurde angenommen, daß der Austausch zwischen gelöster und sedimentgebundener Phase sehr schnell stattfindet.

Für die Wechselwirkung von Kolloiden mit der Sedimentmatrix wurden in der Literatur für vergleichbare Sediment-Grundwasser-Systeme Werte von 25% bzw. zwischen 0-80% gefunden. Für die Simulation der Europiumexperimente wurde der Wert durch Anpassung des Tailings der Durchgangskurve an eines der Experimente mit 13% ermittelt. Das entspricht einer immobilen Kolloidkonzentration von $3,84 \text{ g m}^3$. Dieser Wert wurde für alle anderen Experimente auch verwendet.

Mit diesen aus unabhängigen Experimenten erhaltenen Eingangsdaten wurde die Migration des Europiums simuliert. Dabei konnten die in den Säulenversuchen beobachteten Durchgangskurven und Wiedererhaltungsraten sowie die Resultate aus Batch-Versuchen sehr gut beschrieben und die wesentlichen Wechselwirkungseffekte während des Transports identifiziert werden:

- Die Migration des Europium-Tracers verläuft im wesentlichen kolloidgetragen ohne signifikante Rückhaltung durch die Säule.
- Die Wiedererhaltungsraten $<100\%$ ergeben sich aufgrund der Desorption der Schadstoffe von den Kolloiden und einer anschließende Sorption derselben an die Matrix und/oder irreversibler Filtration von schadstoffbehafteten Kolloiden.
- Reversible Kolloid-Matrix-Wechselwirkungen erklären das in allen Versuchen beobachtete Tailing.
- Die Raten der Desorption des Schadstoffs von den kolloiden Partikeln nehmen in Abhängigkeit der Transportzeit exponentiell ab. Die Realisierung unterschiedlicher Transportzeiten über unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten oder unterschiedliche Fließlängen ergibt für die ermittelten Desorptionsraten im wesentlichen identische Werte.

Die aus Batch-Experimenten ermittelten Sorptionsaffinitäten des Europium-Tracers für die Matrixsorption bzw. Kolloidhaftung zeigen, daß im Gleichgewicht der Hauptteil des Europiums an der Matrix sorbiert ist. Eine Modellierung der Sorptionsprozesse mit Hilfe von Gleichgewichtsansätzen, führt somit zu geringeren Transportgeschwindigkeiten und entsprechend niedrigeren Konzentrationsmaxima. Da ein solches Verhalten jedoch im Widerspruch zu den Beobachtungen in den Migrationsexperimenten steht, ergibt sich als weiteres wichtiges Ergebnis:

- Die Rückhalte- bzw. Sorptionsprozesse in den ausgewerteten Migrationsexperimenten sind kinetisch kontrolliert. Sorptionsmodelle auf Basis von Gleichgewichtsansätzen können das beobachtete Ausbreitungsverhalten nicht erklären.

Vom INE-FZK wird derzeit ein umfangreiches Versuchsprogramm durchgeführt, um zusätzlich auch das Verhalten 4- und 5-wertiger Actinoiden unter entsprechenden Verhältnissen zu erforschen. Es zeigt sich, daß die Desorptionsrate der Schadstoffe von den Kolloiden ein wichtiger Parameter ist. Die Experimente deuten darauf hin, daß die Desorptionsraten mit zunehmender Transportweglänge bzw. Transportzeit abnehmen. Die Übertragung dieser Resultate auf Zeitskalen von einigen Jahren und in großräumigen heterogenen Systemen erfordert für den Schadstofftransport jedoch weitergehende experimentelle Untersuchungen. Dabei spielen insbesondere Fragestellungen zur Bildung und Langzeitstabilität der Kolloide eine Rolle.

In diesem Zusammenhang soll noch ein erstes Feld-Experiment zur Untersuchung des Einflusses organischer Materie auf den Radionuklidtransport erwähnt werden [30], [31]. Am Standort Oak Ridge in Tennessee/USA wurden vor 25 Jahren TRU-Abfälle oberflächennah in Gräben eingelagert. In einem 78 m entfernten Beobachtungsbrunnen wurden die Radionuklide ^{241}Am und ^{244}Cm nachgewiesen. Außerdem wurde beobachtet, daß die Actinoidkonzentrationen in dem Beobachtungsbrunnen nach sehr regenreichen Wintern sehr schnell anstieg. Auch wurde festgestellt, daß bei Regenperioden der Grundwasserspiegel bis auf Höhe der TRU-Abfälle ansteigt. Die Autoren nehmen an, daß dabei Actinoide mobilisiert und anschließend transportiert werden. Ein derart schneller Transport durch das Saprolith-Gestein steht im Widerspruch zu den im Labor gemessenen Sorptionswerten, aus denen sich Retardationskoeffizienten für Am von $>50\ 000$ ergeben. Zur Überprüfung, ob der Actinoidtransport durch organische Materie forciert wird, wurden In-situ-Experimente mit den künstlichen Tracern Europium und Neodym durchgeführt, die in ihren chemischen Eigenschaften und Sorptionsverhalten den dreiwertigen Actinoiden sehr ähnlich sind. Zusammenfassend ist festzustellen:

- Dreiwertige Lanthanide und Actinoide liegen im Grundwasser als negativ geladener Komplex vor. Bei der organischen Materie in den Grundwässern handelt es sich vorwiegend um Fulvinsäuren, die in ihrem chemischen Verhalten den Huminsäuren ähnlich sind.
- 70% der dreiwertigen Actinoide sind an Fulvinsäuren gebunden.
- Die in 78 m Entfernung erhaltenen Durchbruchkurven für Neodym, Europium und ideale Tracer (Br-) zeigen sehr geringe Retardationsfaktoren von 1,2 und 1,3 für Neodym bzw. Europium.

Diese Ergebnisse aus den Beobachtungen und Feldexperimenten zeigen, daß durch Bindung an organische Materie der Transport von Schadstoffen auch über größere Entfernungen (ca. 100 m) erheblich beschleunigt werden kann.

Kolloidgetragener Schadstofftransport

Kenntnisstand

- Modelle zur Simulation des Einflusses von Huminkolloiden auf den Transport dreiwertiger Actinoide wurden entwickelt und können Säulenexperimente mit sandigen Sedimenten (auch die kinetischen Effekte) im Meter-Maßstab beschreiben.
- Übertragbarkeit auf Zeitskalen von einigen Jahren und auf großräumige heterogene Systeme ist noch Gegenstand der Untersuchung
- Fragen zur Generierung und Langzeitstabilität von Kolloiden sind noch offen

Relevanz

hoch, da Kolloide den Schadstofftransport evtl. erheblich beschleunigen können

Empfehlungen für weitere FuE

- Untersuchungen insbesondere auch zum Mechanismus des Huminstoff-Einflusses auf den Transport 4-, 5- und 6-wertiger Aktiniden sind notwendig und werden derzeit bei FZK-INE durchgeführt.
- Untersuchungen an natürlich vorkommenden Kolloiden können Informationen über die Langzeitstabilität von Kolloiden liefern.

2.4 Sicherheitsanalysen für Endlager im Hartgestein

Ziel dieser Teilaufgabe war die Erweiterung des sicherheitsanalytischen Instrumentariums für Endlager in Hartgesteinsformationen sowie die Durchführung einer orientierenden Modellrechnung.

Zu diesem Zweck wurden zuerst die in Langzeitsicherheitsanalysen anderer Länder verwendeten Modellkonzepte und Rechenmodelle ausgewertet und die relevanten Prozesse und Parameter identifiziert.

2.4.1 Studien anderer Länder

Die Endlagerkonzepte für radioaktive Abfälle in Granitformationen weisen in allen Ländern Ähnlichkeiten auf. Die Einlagerung der Abfallbehälter erfolgt entweder in Strecken oder in Bohrlöchern. In allen Konzepten werden die Behälter von einer mindestens

0,3 m dicken Bentonitschicht umgeben. Die umliegenden Strecken und Tunnel werden ebenfalls mit Bentonit oder mit einem Bentonit-Sandgemisch versetzt. Bei den schwedischen und finnischen Konzepten stellt der korrosionsbeständige Kupferbehälter eine wichtige Barriere dar. In den Konzepten der meisten anderen Länder sollen dagegen dickwandige Stahlbehälter verwendet werden.

In den Langzeitsicherheitsnachweisen wird als Referenzszenario die normale Entwicklung des Endlagers behandelt. Für die zeitliche Entwicklung nach Ende der Betriebsphase wird eine schnelle Sättigung des Nahbereichs mit Grundwasser angenommen. Nach der Wassersättigung beginnt die Behälterkorrosion und führt zum vollständigen Ausfall einzelner Behälter, bzw. zu Defektstellen an einzelnen Behältern. Nach Behälterausfall werden die Nuklide aus der Abfallmatrix freigesetzt. Der Nuklidtransport durch die Bentonitschicht erfolgt diffusiv. Für den Übergang vom Bentonit in das Fernfeld werden unterschiedliche Randbedingungen angenommen. Der Transport im Fernfeld wird bei fast allen Studien durch bevorzugte Störungszonen im Granit modelliert.

2.4.1.1 Nahbereichsmodelle

Die in den verschiedenen Langzeitsicherheitsanalysen verwendeten Nahbereichsmodelle sind mit den beschriebenen Effekten und Prozessen in Tabelle 2.3 zusammengefaßt. Es wurden die Rechenprogramme der Schweizer [36], Finnen [68], Schweden [62] - [65] und Kanadier [16] betrachtet.

In den Programmen STRENG [36], CALIBRE [63] und REPCOM [68] wird der Behälterausfall für alle Behälter gleichzeitig modelliert. Der Behälter stellt nach dem Ausfall keine Barriere mehr da. Im Nahbereichscode TULLGARN [65] können drei unterschiedliche Prozesse, die zum Versagen des Kupferbehälters führen berücksichtigt werden: defekte Behälter, Zerstörung durch Helium-Überdruck, Korrosion durch Sulfide im Grundwasser. Im Fall eines defekten Behälters wird angenommen, daß der Nuklidtransport aus der Abfallmatrix nur durch ein 5 mm großes Loch im Behälter erfolgt. Wird der Behälter dagegen durch Überdruck oder durch Korrosion zerstört, wird kein Transportwiderstand des Behälters mehr angenommen. Für die Berechnung der Korrosionsdauer bis zum Behälterausfall wird das aus dem Bentonit gelöste bzw. im Grundwasser

enthaltene Sulfid zugrundegelegt. Bei dem Vault-Modell [16] wird der Behälterausfall mit einer Ausfallfunktion beschrieben. Dabei wird die Temperaturverteilung im Endlager berücksichtigt.

Bei den vier Rechencodes, die direkt eingelagerten Brennstoff betrachten wird zwischen der Freisetzung aus Gasvolumen (Gap), Korngrenzen und der Brennstoffmatrix unterschieden. Die Freisetzung aus dem Gasvolumen ist bei allen Rechenprogrammen instantan, die aus der Matrix wird bei den Programmen CALIBRE, TULLGARN und REPCOM proportional zur α -Radiolyse modelliert. Das Vault-Modell berücksichtigt bei der Matrixkorrosion zusätzlich die Urankonzentration in der umgebenden Lösung.

Alle Modelle beschreiben den Radionuklidtransport durch die Bentonitschicht diffusiv und berücksichtigen lineare Gleichgewichtssorption an der Bentonitoberfläche. Bei STRENG und CALIBRE wird die Diffusion ausschließlich radial, bei REPCOM im Referenzfall ausschließlich axial durch die Bentonitschicht modelliert. Bei TULLGARN sind sowohl axiale und radiale Diffusion implementiert. Die Ausbreitung einer Redoxfront wird nur in CALIBRE berücksichtigt.

Tabelle 2.3: Prozesse und Effekte im Nahbereich, und ihre Behandlung in ausgewählten Rechenprogrammen

Prozeß	STRENG Schweiz	CALIBRE Schweden	TULLGARN Schweden	REPCOM Finnland	Vault-Model Kanada
Behälterausfall	alle Behälter zu spe- ziellem Zeitpunkt	ein Behälter zu spe- ziellem Zeitpunkt	3 verschiedene Pro- zesse: defekter Behälter, Überdruck, Korrosion; Anteil von Behältern fällt aus	ein Behälter zu spe- ziellem Zeitpunkt	2 verschiedene Pro- zesse: Ausfall-Funktion die unterschiedliche Bereiche im Endla- ger berücksichtigt
Nuklid- mobilisierung	<u>Glasmatrix</u> kongruente Auflö- sung, Löslichkeitsgrenzen	<u>LWR-Brennstoff</u> Gap, Korngrenzen, Matrix: α -Radiolyse, Löslichkeitsgrenzen	<u>LWR-Brennstoff</u> Gap, Korngrenzen, Matrix: α -Radiolyse, Löslichkeitsgrenzen	<u>LWR-Brennstoff</u> Gap, Korngrenzen, Matrix: α -Radiolyse, Löslichkeitsgrenzen	<u>LWR-Brennstoff</u> Gap, Korngrenzen, Matrix: abhängig von Uran-Konzentration, Löslichkeitsgrenzen
Transport	Radiale Diffusion durch die Bentonit- schicht lineare Gleichge- wichts-Sorption	Redox-Front Radiale Diffusion durch die Bentonit- schicht lineare Gleichge- wichts-Sorption	Radiale oder axiale Diffusion durch die Bentonitschicht lineare Gleichge- wichts-Sorption	Axiale Diffusion durch die Bentonit- schicht lineare Gleichge- wichts-Sorption	eindimensionale Dif- fusion durch planare Bentonitschicht und Versatz lineare Gleichge- wichts-Sorption
Übergang Nahbe- reich - Fernfeld Randbedingung	Transfer in den Grundwasserfluß Nullkonzentration oder Mischzelle	Transfer in den Grundwasserfluß	Transfer in die Strö- mungsröhre Nullkonzentration	Transfer in den Grundwasserfluß Nullkonzentration	Transfer in Grund- wasserfluß abh. von Eigenschaften der angrenzenden Matrix

2.4.1.2 Fernfeldmodelle für geklüftete Gesteine

Die für Nuklidbreitungsrechnungen in geklüfteten Gesteinen verwendeten Rechen-codes sind zusammen mit den modellierten Prozessen und Effekten in Tabelle 2.4 zusammengefaßt.

Alle Codes mit Ausnahme des kanadischen Modells beschreiben den Transport mit einem Doppelporositätsmodell, d.h. als eindimensionalen advektiven und dispersiven Transport, bei dem senkrecht zur Transportrichtung Diffusion in die verwitterte Matrix hinein verbunden mit einer linearen Sorption an der Matrixoberfläche stattfindet. Radioaktiver Zerfall wird in allen Rechenprogrammen berücksichtigt. Hauptunterschiede bestehen in der jeweiligen Modellgeometrie, d. h. in der Wahl einer planaren oder Röhren-Anordnung mit den entsprechenden Parametern. In dem weiterentwickelten Code RANCHMDNL wurden erstmals auch nichtlineare Sorptionskonzepte implementiert.

Das kanadische Modell unterscheidet sich prinzipiell von den anderen Programmen, denn es behandelt einen in Kanada offenbar weniger geklüfteten Granit als poröses Medium. Der Transportweg durch die Geosphäre wird in 46 Abschnitte eingeteilt. Diesen Abschnitten werden unterschiedliche Parameter für physikalische und chemische Eigenschaften zugewiesen.

2.4.1.3 Überlegung zur Entwicklung neuer Instrumentarien

Auf der Grundlage der bisherigen Auswertungen wurde entschieden, keine Rechencodes von anderen Institutionen zu übernehmen sondern neue Rechen-codes für Nahbereich und Fernfeld zu entwickeln. Aus nationaler Sicht sind damit folgende Vorteile verbunden:

- Das in Deutschland für Langzeitsicherheitsrechnungen entwickelte Programmpaket EMOS kann ohne größeren Aufwand entsprechend erweitert werden.

Tabelle 2.4: Prozesse und Effekte im Fernfeld und ihre Behandlung in ausgewählten Rechenprogrammen

	RANCHMD(NL) Schweiz	Crystal Schweden	FARF31 Schweden	FTRANS Finnland	Geosphere Model Kanada
Transport	advectiver, dispersiver 1d-Transport in Störungszonen	advectiver, dispersiver 1d-Transport in Störungszonen	advectiver, dispersiver 1d-Transport in Strömungsröhren	advectiver, dispersiver 1d-Transport in Störungszonen	advectiver, dispersiver 1d-Transport im porösen Medium
Geometrie der Wasserleiter	planare oder Röhren-Geometrie	planare Geometrie	Röhren: Länge und Anzahl wird stochastisch ermittelt	planare Geometrie	46 verschiedene Abschnitte
Rückhaltung	Matrixdiffusion senkrecht zur Transportrichtung in Bereiche immobilen Porenwassers lineare/nichtlineare Gleichgewichts-Sorption an der Matrix	Matrixdiffusion senkrecht zur Transportrichtung in Bereiche immobilen Porenwassers lineare Gleichgewichts-Sorption an der Matrix	Matrixdiffusion senkrecht zur Transportrichtung in Bereiche immobilen Porenwassers lineare Gleichgewichts-Sorption an der Matrix	Matrixdiffusion senkrecht zur Transportrichtung in Bereiche immobilen Porenwassers lineare Gleichgewichts-Sorption an der Matrix	lineare Gleichgewichts-Sorption an der Matrix
Radioaktiver Zerfall	für Spaltprodukte und Zerfallsreihen	für Spaltprodukte und Zerfallsreihen	für Spaltprodukte und Zerfallsreihen	für Spaltprodukte; max. 3 Nuklide pro Zerfallsreihe	für Spaltprodukte und Zerfallsreihen
Bemerkungen	wurde bisher nicht für probabilistische Rechnungen verwendet	für probabilistische Rechnungen wird ein vereinfachter Code verwendet	kann in probabilistische Umgebung eingefügt werden	wurde bisher nicht für probabilistische Rechnungen verwendet	kann in probabilistische Umgebung eingefügt werden

- Bei der Neuentwicklung von Rechenmodulen konnten bereits vorhandene Teilmodelle des Programmpakets EMOS verwendet werden:
 - a) Für den Nahbereichscode wurde das bisher in EMOS für die SAM-Studie verwendete Teilmodell für die Nuklidmobilisierung aus LWR-Elementen eingesetzt. Die Verwendung dieses Modellansatzes und die Auswahl von Modellparametern wurden im korrespondierenden EU-Projekt SPA mit allen Teilnehmern abgestimmt.
 - b) Aufgrund der Ähnlichkeit der Transportcodes für poröse und geklüftete Medien wurde das für poröse Medien verwendete Fernfeldmodul CHET1 so erweitert, daß es den Transport durch geklüftete Medien wie Granit beschreiben kann. Dabei wurde der Prozeß der Matrixdiffusion in verwittertes nur diffusiv zugängliches Granitgestein senkrecht zur Transportrichtung mit Sorption der Nuklide an der Matrixoberfläche implementiert.

- Aufgrund des für EMOS bereits existierenden Monte-Carlo-Rahmens könnten nach einigen Modifikationen mit den neuen Rechenprogrammen zukünftig auch probabilistische Rechnungen durchgeführt werden.

- Eine zukünftige Weiterentwicklung, wie der Einbau zusätzlicher Teilmodelle für die Konsequenzberechnungen zu anderen Szenarien, oder eine Modifikation bzw. Erweiterung des Rechencodes ist bei einem selbstentwickeltem Rechencode einfacher möglich.

Die neuentwickelten Rechencodes GRAPOS und CHETMAD wurden in Vergleichsrechnungen mit Programmen anderer Teilnehmer des SPA-Projekts verifiziert und sind ausführlich in [28] beschrieben.

2.4.2 Langzeitsicherheitsanalyse: Durchführung und Ergebnisse

Das einer beispielhaften Langzeitsicherheitsanalyse für Granit zugrundegelegte Endlagerkonzept wurde weitgehend aus der Studie GEISHA [52] übernommen. Es wurde die Endlagerung abgebrannter Brennelemente mit einem Inventar von 25 000 t_{SM} betrachtet. Ähnlich der schwedischen Planung wurde ein Konzept gewählt, bei dem die Abfälle in Edelstahlbehältern verfüllt und in Bohrlöchern eingebracht werden.

Für das Nahbereichsmodell wurde unterstellt, daß 1000 Jahre nach Beendigung der Betriebsphase ein Behälterausfall eintritt. Für die anschließende Nuklidmobilisierung wurde ein von den Teilnehmern des Projektes SPA gemeinsam abgestimmtes Modell verwendet. Durch den umgebenden Bentonit findet ein diffusiver radialer Transport mit linearer Sorption statt. In der im Gebirge auftretenden und an den Bentonit angrenzenden Auflockerungszone wurde eine instantane Durchmischung der Nuklide angenommen. Alle Eingangsparameter wurden aus internationalen Studien abgeleitet, wobei auch spezielle Aspekte des Endlagerkonzepts Berücksichtigung fanden.

Da erste überschlägige Bewertungen deutscher Granitformationen ähnliche hydrogeologische und hydrogeochemische Eigenschaften wie die der Formationen in der Schweiz zeigen, wurde eine geologische Struktur für das Fernfeld ähnlich der in KRISTALLIN 1 beschriebenen angenommen. In einem ersten Schritt wurden konservative Modellparameter gewählt. Für den Transport existiert im Granit ein System aus offenen Klüften. Senkrecht zur Kluftrichtung findet in begrenztem Umfang eine Matrixdiffusion mit linearer Sorption auf der Matrixoberfläche statt. Das Kluftsystem reicht vom Endlagernahbereich bis zu einer Hauptstörungszone - im Referenzfall 100 m. Entsprechend lang wird die zu modellierende Weglänge für den Nuklidtransport angenommen. In der Störungszone wird ein Transport ohne signifikante Verzögerung angenommen. Dieses Teilmodell ist besonders standortabhängig. Deswegen wurden hierfür keine Modellannahmen gemacht.

Im Rahmen des Projekts wurden ausschließlich deterministische Rechnungen durchgeführt. Neben einem Referenzfall wurden Parametervariationen sowie drei alternative Szenarien untersucht. Die Ergebnisse zeigen, daß die Langzeitsicherheit des Endlagersystems im Granit mit der gewählten Endlagerauslegung, und den bekannten technischen Barrieren sowie bei der angenommenen geologischen Situation im Granit erreicht

werden kann. Die Summendosis wird von den Spalt- und Aktivierungsprodukten ^{14}C , ^{36}Cl , ^{129}I , ^{79}Se und ^{135}Cs dominiert (vgl. Abbildung 2.2 für den Referenzfall). Die Actinoiden und ihre Tochterprodukte werden durch das Multibarrierensystem effektiv zurückgehalten.

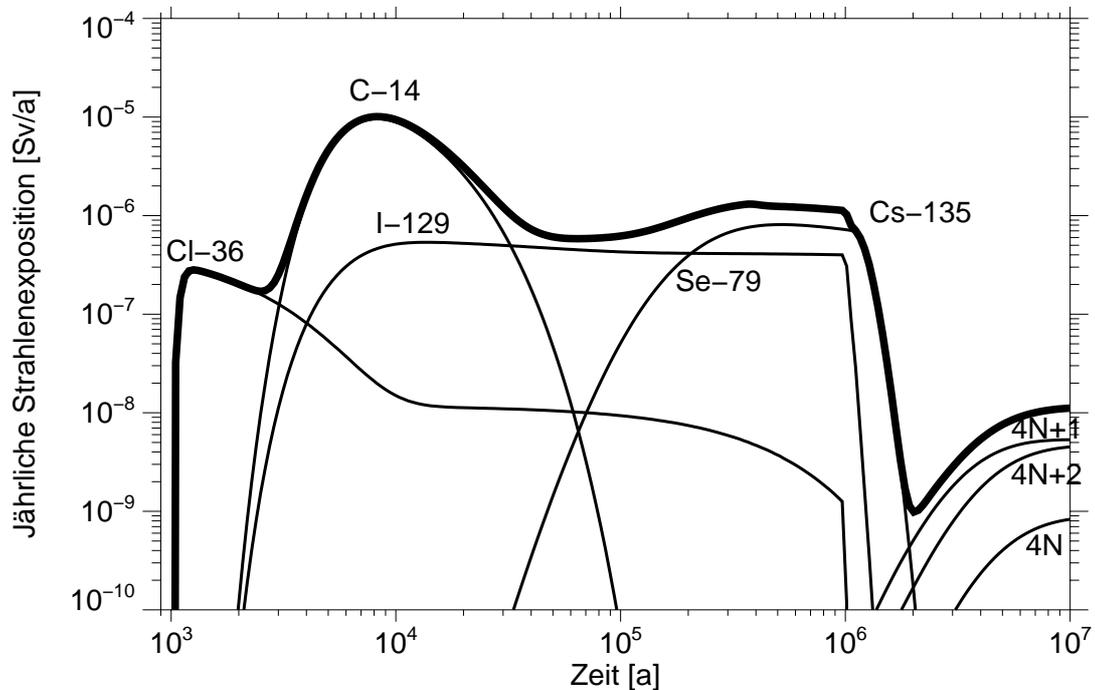


Abb. 2.2: Für den Referenzfall eines potentiellen Endlagers in Granit berechnete jährliche Strahlenexposition

Anhand der Parametervariationen konnten für die Langzeitsicherheit wichtige Prozesse identifiziert werden. Auf dieser Grundlage ergeben sich als Ziele zukünftiger Studien:

- Untersuchung der Langzeitstabilität und Optimierung der technischen Barrieren,
- eine genauere Beschreibung der Struktur der für den Nuklidtransport zu berücksichtigenden Störungszonen im Granit,
- die Überprüfung/Einbeziehung anderer Sicherheitsindikatoren.

Die hier vorgestellten Arbeiten sind detailliert in [28] beschrieben.

Hartgestein

Kenntnisstand

- Verifizierte Rechenmodule für den Radionuklidtransport im Nahbereich und Fernfeld eines deutschen Endlagers in Granit liegen vor.
- Anhand von Langzeitsicherheitsrechnungen und Parametervariationen wurden wichtige Einflußgrößen identifiziert.

Relevanz

hoch: Entsprechende Modelle sind für die Durchführung von Sicherheitsanalysen und zum Vergleichen im internationalen Rahmen notwendig.

Empfehlungen für weitere FuE

- Detaillierte Untersuchung der Nahbereichsprozesse, insbesondere der Aufsättigung und des Langzeitverhaltens von Bentonit.
- Weiterentwicklung der Rechencodes: Implementation von relevanten Effekten, wie z.B. ortsabhängiger Matrixdiffusion, Kolloideinfluß oder Bentonitaufsättigung.

2.5 Natürliche Analoga

Die in Sicherheitsanalysen verwendeten Modelle und Parameter werden gewöhnlich aus Laborexperimenten abgeleitet. Problematisch ist, daß der Langzeitsicherheitsnachweis z.T. über außergewöhnlich lange Zeiträume geführt werden muß, die sich in Laborexperimenten nicht nachbilden lassen. Deshalb werden zur Absicherung von Modellansätzen und Daten vermehrt Ergebnisse aus Studien über sogenannte natürliche Analoga herangezogen, d.h. Prozessen, die über geologische Zeiträume in der Natur abgelaufen und denen im betrachteten Endlagersystem sehr ähnlich sind.

2.5.1 Ergebnisse aus internationalen Studien

Ziele der Arbeiten zu diesem Themengebiet waren Zusammenstellung und Auswertung internationaler Studien über natürliche Analoga mit Überprüfung ihrer Aussagen zum langzeitlichen Endlagerverhalten. Vorrangig wurden geochemische Effekte untersucht, die bei der Migration sicherheitsrelevanter Radionuklide im Fernfeld eine Rolle spielen können. Die Beteiligung an der letzten Phase des Projektes "Analogue Studies in the Alligator Rivers Region" (ASARR) eröffnete Möglichkeit, die dort durchgeführten Arbeiten besonders intensiv auszuwerten und ihre Ergebnisse auf Übertragbarkeit hin zu überprüfen [38].

Die experimentellen Arbeiten in Nord-Australien wurden seit 10 Jahren unter Koordination der NEA in den Projekten "Alligator Rivers Analogue Project" (ARAP) und dem Nachfolgeprojekt ASARR durchgeführt. Ein Schwerpunkt war die Vertiefung des Verständnisses von Prozessen, die bei Migration, Rückhaltung und Konzentration von Uran in der geologischen Entwicklung des Erzlagers eine Rolle gespielt haben. Ein vereinfachter Querschnitt des Standortes Alligator River ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Im folgenden werden nur ausgewählte Ergebnisse dargestellt:

- Die Abtragung von oberen Bodenschichten durch Erosion hat bewirkt, daß sich vor Jahrmillionen im oberen Bereich der Primärvererzung oxidierende Bedingungen eingestellt haben. Unter diesen Bedingungen fand die Oxidation und Mobilisierung von Uran aus Uraninit statt.
- Durch die Verwitterung von Chlorit zu Kaolinit wird die Zusammensetzung der Grundwässer bestimmt. Bei dem Verwitterungsprozeß kommt es zur Bildung von amorphen Eisenoxiden, die sich über lange Zeiträume in kristalline Phasen umwandeln.
- Die Uranrückhaltung im Bereich der Dispersionsfahne wird durch Sorption an diesen amorphen Eisenoxiden sowie durch Einbau in die kristallinen Eisenoxidphasen dominiert. Eine Freisetzung von Uran aus den kristallinen Phasen findet, wenn überhaupt, nur sehr langsam im Vergleich zum Grundwassertransport statt.

Begleitend zu den Felduntersuchungen wurden Laborexperimente zur Sorption von Uran an reinen Mineralphasen durchgeführt und Oberflächenkomplexmodelle entwickelt. Schwerpunkte der Arbeiten waren die Sorptionssysteme "Uran/Eisenoxid" und "Uran/Quarz", da diese Minerale im Bereich der sogenannten Dispersionsfahne dominieren.

Als Ergebnis ist festzuhalten, daß die Uransorption an Eisenoxid und Quarz in Abhängigkeit von pH-Wert, Carbonat- und Urankonzentration mit der jetzt vorhandenen thermodynamischen Datenbasis sehr gut beschrieben werden kann. Die Eigenschaften des Sorbens können dabei im wesentlichen auf dessen spezifische Oberfläche zurückgeführt werden und erklären den signifikant größeren Einfluß von amorphem Eisenoxid auf die Uransorption gegenüber Quarz und Kaolinit.

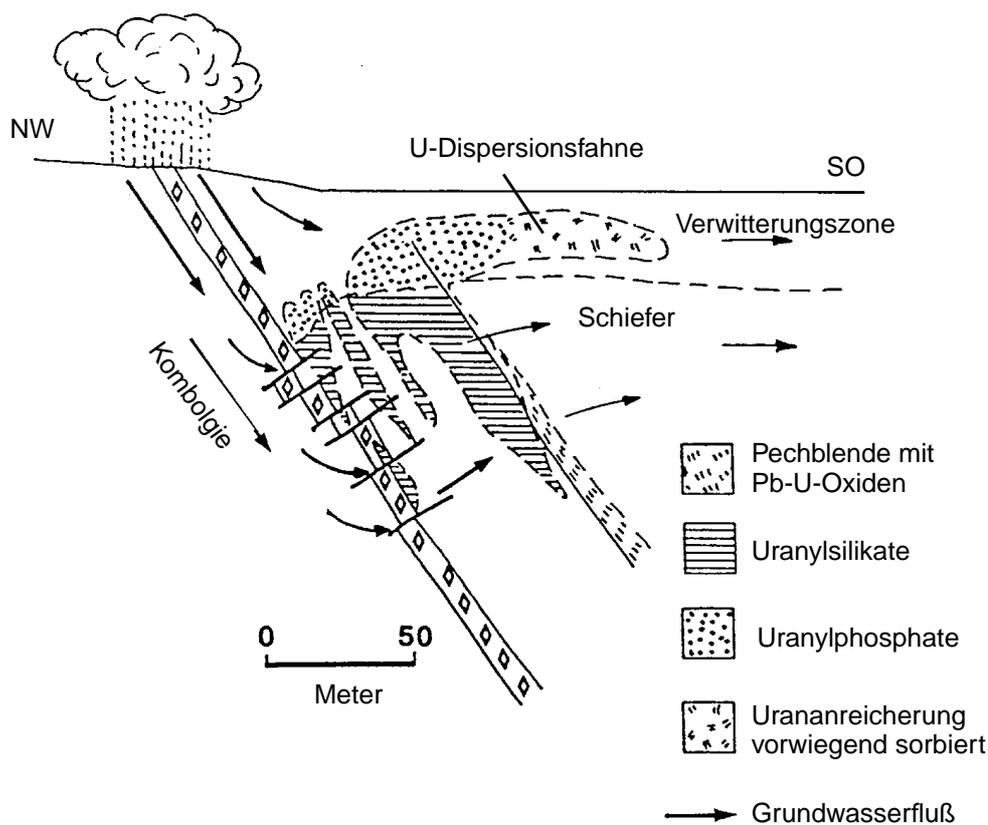


Abb. 2.3: Querschnitt durch den Uranerzkörper mit Dispersionsfahne am Standort Alligator River

Für die Anwendung des Sorptionsmodells auf natürliche Sedimentproben wurden zwei verschiedene Ansätze entwickelt. Mit dem sogenannten "Component-Additiv-Approach", wird die Uran-Sorption in den natürlichen Systemen für pH-Werte von 6-8 befriedigend beschrieben; bei höheren und niedrigeren pH-Werten treten signifikante Abweichungen zwischen Modell und Experiment auf. Bessere Übereinstimmung über den gesamten pH-Bereich liefert ein erweiterter Ansatz, der zusätzlich azide Sorptionsplätze berücksichtigt, die unbekannte Mineralphasen repräsentieren. Diese Beschreibung erfordert zusätzliche Eingangsdaten, die durch entsprechende Experimente zu bestimmen sind.

Ein generelles Problem bei der Anwendung von Oberflächenkomplexmodellen ist, daß detaillierte Kenntnisse über die Mineraloberflächen an natürlichen Gesteinen und Sedimenten zumeist nicht vorliegen und damit der elektrostatische Korrekturterm nicht zu berechnen ist. Aufgrund dieses grundsätzlichen Mangels verfolgte der USGS einen

“Generalized Composite Approach”, der die Abhängigkeit der Sorption vom geochemischen Milieu mit einem stark vereinfachten Modell beschreibt. Die Anzahl der dabei betrachteten Oberflächenreaktionen wird so gering wie möglich gewählt, und es wird kein elektrostatischer Ansatz zur Korrektur der Massenbilanz verwendet, d.h. die Oberflächenkomplexe werden analog zu den Komplexen in Lösung betrachtet. Ein solches Modell ist wegen des reduzierten Rechenaufwandes sehr gut für die Kopplung mit Transportcodes geeignet.

Die Parameter der Oberflächenkomplexreaktionen werden direkt an den natürlichen Systemen bestimmt. Mit diesem Ansatz konnte die Uransorption für verschiedene Sedimente der Region Alligator River in Abhängigkeit von pH-Wert, Carbonatgehalt und Urankonzentration zufriedenstellend beschrieben werden. Der Ansatz wird derzeit erstmalig vom USGS in einem gekoppelten Transportmodell zur Beschreibung der großräumigen Zink- und Uranmigration an kontaminierten Standorten wie z.B. Cape Cod oder Naturita angewandt [11], [20].

Die entwickelten Oberflächenkomplexmodelle sind auf oberflächennahe Endlager bzw. kontaminierte Standorte anwendbar. Für Endlager in tiefen geologischen Formationen ist insbesondere zu überprüfen, ob unter den dort vorliegenden pH/Eh-Bedingungen auch die hier nicht betrachteten vierwertigen Uranspezies eine Rolle spielen.

Nach Einschätzung des Sorptionsmodell-Forums der NEA werden Oberflächenkomplexmodelle in den nächsten Jahren noch nicht in den Rechencodes für integrierte Langzeitsicherheitsanalysen verwendet werden können [67]. Die Datenbasis für die relevanten Radionuklide ist noch nicht zufriedenstellend, obwohl speziell für Uran schon ein sehr gutes Verständnis der wichtigen Prozesse und eine umfangreiche Datenbasis existieren. Die derzeitige Bedeutung der Oberflächenkomplexmodelle für die Sicherheitsanalyse besteht hauptsächlich in

- der Erweiterung des Verständnisses der Sorptionsmechanismen,
- der Absicherung von K_d -Werten,
- der Ermittlung verschiedener K_d -Werte für heterogene Gebiete,
- der Abschätzung von Rückhalteparameter-bezogenen Unsicherheiten.

Neben der reversiblen Sorption spielt bei dem Uranerzlager Alligator River ein irreversibler Einbau von Uran in kristalline Eisenoxid-Mineralphasen eine Rolle. Ein solcher Prozeß wird in Sicherheitsanalysen bisher nicht betrachtet. Aus den Untersuchungen zur sequentiellen Extraktion geht hervor, daß ca. 40 - 60% des Urans irreversibel an die Minerale gebunden ist. Allerdings erfolgt der Einbau über die Vorstufe der amorphen Eisenoxide, die bei der Verwitterung von Chlorit entstehen und sich dann in kristalline Phasen umwandeln. Hier muß noch sehr genau überprüft werden, ob solche Prozesse grundsätzlich oder unter speziellen geologischen Bedingungen eine Rolle bei der Nuklidrückhaltung spielen. Die Verwitterung der Tonminerale findet am Standort Alligator River nur in den oberflächennahen Bereichen statt.

2.5.2 Porenwassergewinnung aus tonigen Materialien

Das Studium natürlicher Analogien zum Migrationsverhalten von Schadstoffen erfordert es, die Eigenschaften von Sediment und Grundwasser im Detail zu untersuchen. Die Extraktion von Porenwasser aus Gesteinen mit relativ geringen Wassergehalten, wie z.B. Tonen, erfordert spezielle Verfahren, die bisher in Deutschland nicht angewandt wurden. Dabei ist es wichtig, die Eigenschaften des Wassers (pH-Wert, Zusammensetzung, etc.) durch die Probenahme nicht zu verändern. Die Entwicklung eines geeigneten Verfahrens ist von grundsätzlicher Bedeutung, da für eine genaue und aussagekräftige geochemische Modellierung die Daten der unbeeinflussten wäßrigen Phase bekannt sein sollten. Die Modellierung dieser Prozesse ist zu deren besseren Verständnis und darüberhinaus zur Ableitung von Aussagen wichtig, die sogenannte Natürliche Analoga betreffen und zur Quantifizierung von Langzeiteigenschaften von Gesteinen bzw. Endlagern dienen.

Vor diesem Hintergrund wurde an den British Geological Survey (BGS) ein Auftrag vergeben, um den Stand der Technik für geeignete Probenahmeverfahren zu dokumentieren und die einzelnen Methoden genau zu beschreiben.

Im Rahmen dieser Studie wurden sieben mögliche Laborverfahren identifiziert und deren Vor- und Nachteile herausgearbeitet [57]. Diese sind im folgenden kurz zusammengefaßt.

In-situ-Charakterisierung:

Vakuumfiltration	Methode ist nur für Materialien mit hoher Porosität geeignet.
Dialyse	Methode wurde bisher nicht an Tonen erprobt. Bisher existieren noch zu wenig Informationen zu Membranen und zur Dateninterpretation.
Spektroskopie	Methode ist nur zur Bestimmung von Porenwasserschichten und Strukturen geeignet, nicht zur geochemischen Charakterisierung.

Ex-situ-Charakterisierung:

Auspressen	Diese Methode wurde als besonders geeignet für tonhaltige Materialien identifiziert. Bei der Interpretation der Ergebnisse müssen aber mögliche Druckeinflüsse berücksichtigt werden (s.u.).
Zentrifugieren	Methode ist einfach und preiswert aber begrenzt auf Proben mit relativ hoher Permeabilität. Für Tonmaterialien ist sie nicht geeignet.
Auslaugen	Methode ist einfach und als einzige anwendbar auf Proben mit Feuchtegehalten < 7%. Allerdings kann die Auflösung von Feststoffen die Ergebnisse verfälschen.
Destillation	Methode ist preiswert und anwendbar auf alle Tonmaterialien, allerdings begrenzt auf die Bestimmung von Isotopenverhältnissen.

Die Ergebnisse der Studien wurden auch als Beitrag in den NEA-Status-Report zur Extraktion von Porenwässern [60] integriert. In diesem Bericht wurden die verwendeten Methoden und Ergebnisse zur Extraktion von Wasser und gelösten Stoffen kritisch begutachtet. Nachfolgend sollen nur die wichtigsten Probleme bei der Interpretation der durch Auspressen extrahierten Porenwässer erläutert werden.

In Proben mit hohem Wassergehalt und geringen Tongehalten sind bei Auspreßdrücken von bis zu 100 MPa eventuelle Effekte auf Lösungsschemismus vernachlässigbar. Bei tonhaltigen Proben mit geringen Porenwassergehalten, für die höhere Auspreßdrücke erforderlich sind, sind grundsätzlich folgende Verfälschungen möglich, die jeweils bedacht werden müssen:

- Das Eindringen von Sauerstoff führt zu Oxidationseffekten. Dabei können folgende Reaktionen auftreten:

- Oxidation von sulfidhaltigen Mineralien mit Anstieg der Sulfatkonzentration und Abnahme des pH-Wertes,
 - Oxidation von funktionellen Gruppen organischer Materie und dadurch Veränderung der Sorptionseigenschaften für Ionen,
 - Abnahme von Phosphor und zweiwertigem Eisen in Lösung bei gleichzeitiger Ausfällung von Vivianit, bzw. Eisenoxiden mit anschließender Phosphatsorption,
 - generell aber geringere Oxidationsgeschwindigkeit in Tonen aufgrund der sehr langsamen Porendiffusion in konsolidierten Tonen.
- Temperaturveränderungen während des Auspreßvorgangs verändern die Löslichkeiten einzelner Mineralphasen.

Der Einfluß von Oxidation und Temperatur kann durch Apparaturen mit Temperaturkontrolle und Einstellung anaerober Bedingungen vermieden werden.

Folgende Reaktionen lassen sich jedoch nicht durch entsprechende apparative Ausstattung und Versuchsbedingungen vermeiden und müssen deshalb bei der Ergebnisinterpretation berücksichtigt werden:

- Druckabhängige Konzentrationsabnahme von Hauptkomponenten in den Porenwasserfraktionen: Dieser Effekt wird auf eine unterschiedlich starke Ionen-Filtration bei hohen Drücken zurückgeführt. Dabei ist folgende Rangfolge zu beobachten: Cs>Rb>K>NH₃>Na>Li>Ba>Sr>Ca>Mg. Manche Autoren führen diesen Effekt auf das sogenannte "Donnan-Prinzip" zurück, d.h. freies Porenwasser enthält eine höhere Ionenkonzentration, da insbesondere Anionen in der Nähe der Mineraloberfläche durch negative Oberflächenladungen abgestoßen werden. Beim Auspressen werden dann zuerst vorwiegend Anionen ausgepreßt, die aufgrund der Elektroneutralität Kationen mitreißen. Spätere Fraktionen werden bei entsprechend hohen Drücken durch das aus den Zwischenschichten der Tonminerale ausgepreßte Wasser verdünnt.
- Bei Erhöhung des Druckes findet eine Entgasung der Probe statt. Insbesondere die Veränderung der CO₂- und O₂-Gehalte haben Auswirkungen auf die Lösungsgleichgewichte einzelner Mineralien.

- Die Löslichkeiten vieler Festphasen, wie z.B. Calcit, sind druckabhängig. Bei Calcit ist der Effekt gegenläufig zum Ausgasen bei erhöhtem Druck.

Für tonhaltige Materialien, wie sie im Natürlichen-Analoga-Projekt "Tertiäre Sedimente als Barriere für die U/Th-Migration im Fernfeld von Endlagern" (FKZ 02 E 9128 6) untersucht werden, wurde das Auspressen als die geeignetste Methode identifiziert. Die nicht vermeidbaren Nebeneffekte müssen bei der Auswertung berücksichtigt werden.

Absicherung sicherheitsanalytischer Erkenntnisse

Kenntnisstand

- In der ASARR-Studie wurde gezeigt, daß die Sorption von Uran an Eisenoxid ein relevanter Rückhalte Mechanismus ist. Das Verständnis dieses Mechanismus wurde durch Weiterentwicklung von Oberflächenkomplexmodellen stark verbessert.
- Es existiert ein Ansatz zur Modellierung der Uranmigration in oberflächennahen, kontaminierten Standorten.

Relevanz

hoch: Die Absicherung von Modellansätzen und -daten (insbesondere über lange Zeiträume) erhöht die Glaubwürdigkeit von Sicherheitsnachweisen.

Empfehlungen für weitere FuE

Auswertung weiterer internationaler Studien über natürliche Analoga:

- Überprüfung, in welcher Form die Ergebnisse in Langzeitsicherheitsnachweise eingeflossen sind und welche Ergebnisse auf deutsche Verhältnisse übertragbar sind.
- Übernahme ausgewählter Methoden in nationale Studien über natürliche Analoga.

2.6 Zukünftige Entwicklungen

In bisher durchgeführten Langzeitsicherheitsanalysen für deutsche Endlagerprojekte wurde bei der Berechnung der potentiellen Strahlenexpositionen in der Nachbetriebsphase vorausgesetzt, daß sowohl die heutigen geologischen, hydrologischen und klimatischen Verhältnisse als auch die menschlichen Verzehrsgewohnheiten in Zukunft unverändert bleiben. Änderungen dieser Standortverhältnisse sind auch über extrem lange Zeiträume nicht in Ansatz gebracht worden, und entsprechend sind auch potentielle Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit in den bisherigen Modellrechnungen nicht betrachtet worden.

Im Vergleich dazu haben die zukünftigen geologischen, hydrologischen und klimatischen Veränderungen in Endlagersicherheitsanalysen anderer Länder einen wesentlich höheren Stellenwert. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, daß solche Veränderungen sowohl positive als auch negative Effekte auf die Langzeitsicherheit von Endlagersystemen bzw. auf die potentiellen Strahlenexpositionen in der Biosphäre haben können. In deterministischen Sicherheitsanalysen werden die berechneten zukünftigen Strahlenexpositionen von den jeweils getroffenen Annahmen über die zukünftigen Entwicklungen mitbestimmt. Für probabilistische Sicherheitsanalysen gilt dasselbe im Hinblick auf die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Dosis bzw. die zu berechnenden Risiken. Die Prognoseunsicherheit bei zukünftigen Entwicklungen führt bei deren Berücksichtigung zu einer – im Vergleich zu den bisherigen Analysen – höheren Variabilität der Rechenergebnisse.

Im Rahmen des Projektes wurden vorliegende und im Detail publizierte ausländische Langzeitsicherheitsanalysen gesichtet. Sie wurden insbesondere darauf untersucht, ob und wie weit zukünftige Entwicklungen wie Klimaänderungen mit Kalt- und Warmzeiten und Vergletscherungen, tektonische Krustenbewegungen, Vulkanismus und Erosionsprozesse darin berücksichtigt worden sind.

2.6.1 Zeitrahmen

Im Zusammenhang mit der Prognose zukünftiger Entwicklungen von Endlagersystemen sind die zu berücksichtigenden Vorhersagezeiträume von Bedeutung. Hierzu wurden in den vorliegenden nationalen Endlager-Sicherheitskriterien unterschiedliche Festlegungen getroffen.

Nach den französischen Sicherheitskriterien ist die Einhaltung einer Individualdosis von 0,25 mSv/a für den gesamten Zeitraum von 10 000 a nachzuweisen. Für den Zeitraum danach ist dieser Dosisgrenzwert nur als Richtwert anzusehen [32]. Für Sicherheitsanalysen definiert die Richtlinie drei Zeitabschnitte mit folgenden Merkmalen:

- Bis 500 Jahre nach Verschuß des Endlagers, in denen die Existenz des Endlagers noch bekannt ist (in dieser Zeit zerfallen die Radionuklide mit kurzen und mittleren Halbwertzeiten und die Wärmeproduktion ist weitgehend abgeklungen).

- Bis 50 000 Jahre nach Verschuß des Endlagers, in denen noch nicht mit Eiszeiten gerechnet werden muß.
- Über 50 000 Jahre hinaus mit hoher Eintrittswahrscheinlichkeit für Eiszeiten.

Die entsprechenden kanadischen Regelungen sind den französischen sehr ähnlich. Vorgeschrieben für Vorhersagen zum Individualrisiko ist ebenfalls ein Zeitraum von 10 000 Jahren. Die quantitativen Berechnungen für diesen Zeitraum müssen durch qualitative Aussagen über den Einfluß nachfolgender Eiszeiten ergänzt werden [2]. Diese Einschränkung hat zur Folge, daß die Veränderungen durch Eiszeiten, die in den Langzeitsicherheitsanalysen für ein HLW-Endlager in Kanada eine wichtige Rolle spielen, lediglich qualitativ bewertet werden müssen [61].

Die britischen Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle schreiben einen Grenzwert für das Individualrisiko der Bevölkerung fest, der $10^{-6}/a$ beträgt. Der Zeitraum, für den diese Beschränkung gilt, wurde nicht definitiv geregelt. In der Sicherheitsanalyse der NIREX für das Endlagerprojekt Sellafield [37] werden vier Zeiträume unterschieden:

$t \leq 10^2$ a: ^{137}Cs , ^{90}Sr und ^3H zerfallen zum größten Teil, die Wärmeenergieerzeugung nimmt entsprechend ab, durch die Überwachung des Endlagerstandortes wird ein unbeabsichtigtes Eindringen ausgeschlossen und Klimaänderungen durch den Treibhauseffekt sind möglich.

$t \leq 10^4$ a: ^{14}C zerfällt weitgehend, die Überwachung des Endlagers wird eingestellt und die klimatischen Bedingungen bestehen fort.

$t \leq 10^6$ a: ^{239}Pu , ^{99}Tc und ^{36}Cl zerfallen zum größten Teil, Eis- und Warmzeiten treten auf, während der Eiszeiten sinkt der Meeresspiegel maximal um 140 m, in Großbritannien herrschen ständig glaziale oder periglaziale Verhältnisse, und größere tektonische Ereignisse werden nicht erwartet.

$t > 10^6$ a: Es sind praktisch nur noch ^{129}I und Nuklide der natürlichen Zerfallsreihen übrig, größere tektonische Ereignisse sind möglich.

Dieser Unterteilung liegen umfangreiche Untersuchungen über die Prognostizierbarkeit der klimatischen Änderungen in Großbritannien zugrunde [15].

Die von der japanischen Atomenergiekommission (AEC) erlassenen "Richtlinien für die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur HLW-Endlagerung in tiefen geologischen Formationen in Japan" legen keinen expliziten Zeitrahmen fest, der in Sicherheitsanalysen berücksichtigt werden muß. Bewertungsgröße für die Einhaltung der Sicherheitskriterien ist die Individualdosis. Der Prognosezeitraum muß mindestens das Maximum der potentiellen Strahlenexposition abdecken [19]. Unabhängig davon wird gefordert, daß in einem Sicherheitsnachweis für ein HLW-Endlager

- Verschiebungen entlang von Störungslinien,
- vulkanische Aktivitäten,
- Hebungen und Abtragungen,
- Änderungen des Klimas und des Meerwasserspiegels

in den ersten 100 000 Jahren zu berücksichtigen sind.

Die US-amerikanische Regelung 40 CFR 191.13 [72] fordert "die Berücksichtigung sämtlicher relevanten Vorgänge und Ereignisse, die sich auf das Endlagersystem auswirken können" für einen Zeitraum von 10 000 Jahren. Für die WIPP-Site im US Bundesstaat New Mexico hat die US/NRC mit der Regelung 40 CFR Part 194 spezielle standortspezifische Kriterien erlassen, in der die grundsätzlichen Anforderungen detailliert aufgeführt werden [72], die ihrerseits noch weiter konkretisiert wurden [70]. Die Annahmen, die bezüglich zukünftiger Entwicklungen (§194.25 "Future State Assumptions") zu machen sind, lauten zusammengefaßt:

- In Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager und in den Nachweisen der Einhaltung der gesetzlich festgelegten Schutzziele kann unterstellt werden, daß die gegenwärtigen Bedingungen am Standort grundsätzlich fortbestehen.
- Hiervon ausgenommen sind die hydrogeologischen, geologischen und klimatischen Verhältnisse. Die Auswirkungen von Änderungen dieser Verhältnisse auf das Endlagersystem müssen beschrieben werden.

Tabelle 2.5: Berücksichtigung von zukünftigen Veränderungen des Endlagersystems in verschiedenen Sicherheitsstudien

	Schweden	Kanada	Japan	GB	USA	Frankreich
Studie, Standort	Site-94 Aspö, Granit	AECL, generisch, Granit	H3, generisch, Granit	NIREX, Sellafield, Granit	DOE WIPP, Salz	MIDC RFS, generisch
< 10 ⁴ a	noch keine klimatischen Änderungen	noch keine klimatischen Änderungen	Berücksichtigung von Klimaände- rungen und Vulkanismus	noch keine klimatischen Änderungen	Änderungen der (hydro)geolo- gischen und klimatischen Verhältnisse	noch keine Eiszeiten
< 10 ⁵ a	quantitative Aussagen zur Auswirkung von Eiszeiten	qualitative Aussagen zur Auswirkung von Eiszeiten		kein Zeitrahmen vorgegeben: Dosis-Maximum muß abgedeckt sein		klimatische Än- derungen
< 10 ⁶ a			tektonische Ereignisse			
> 10 ⁶ a						

- Als wichtigste hydrogeologische Parameter sind ein Anstieg der Niederschlagsmengen und die daraus resultierenden Veränderungen des Ortes und der Mengen der Grundwasserneubildung und Änderungen des hydraulischen Gradienten in bestimmten Gesteinsformationen zu berücksichtigen.
- Als wichtigste geologische Veränderungen werden Lösungsprozesse, oberflächennahe geomorphologische Faktoren und Prozesse sowie damit verbundene Senkungen der geologischen Einheiten am Endlagerstandort aufgeführt.
- Bei den klimabedingten Einflüssen müssen nur die möglichen Schwankungen der Jahresniederschlagsmengen am Standort berücksichtigt werden.

2.6.2 Prognose von Klimaänderungen

Als Hauptursache für das Auftreten von Eis- und Zwischeneiszeiten in der jüngeren Erdgeschichte werden u.a. Änderungen der Erdbahnelemente, wie der Schiefe der Ekliptik, der Wanderung der Apsiden und der Exzentrizität der Erdbahn betrachtet. Diese bedingen periodische Schwankungen der Sonneneinstrahlung, wodurch die mittleren Temperaturen auf den beiden Hemisphären unterschiedlich verändert und die atmosphärische Zirkulation beeinflusst werden. Bildung und Ablation der glazialen Vereisungen führen zu Senkungen bzw. Hebungen der Meeresspiegel als auch, infolge Isostasie, der Erdkruste. Diese globalen Veränderungen beeinflussen massiv auch die großräumigen hydrogeologischen Verhältnisse, was sich auf einen Endlagerstandort und den Abschluß der Abfälle von der Biosphäre auswirken kann. Die hydrogeologische Situation wird auch durch die Ausdehnung der Permafrostbereiche mitgeprägt. Neben den langperiodischen Klimaschwankungen kommen Konzentrationsänderungen der atmosphärischen Treibhausgase H_2O , CO_2 , CH_4 , NO_2 und O_3 als Folge von Klimaänderungen, biologischer Effekte und Vulkanismus zum Tragen. Seit ca. 200 Jahren werden durch anthropogene Einflüsse, insbesondere durch Landwirtschaft, Industrie und Verkehr, zusätzliches CO_2 , CH_4 und O_3 und außerdem Stickoxide (N_xO_y) und Fluorkohlenwasserstoffe (FCKW) in die Troposphäre abgegeben. Die im Vergleich zu Meeres- oder Landflächen höhere Albedo der vereisten Zonen führt außerdem zu einer positiven Rückkopplung auf die Oberflächentemperaturen [56], also zu einer weiteren Temperaturreduktion.

Die globalen klimatischen Veränderungen lösen ihrerseits Prozesse in der Biosphäre aus, die beispielsweise Vegetation, Besiedlungsdichte und Bewässerung landwirtschaftlich genutzter Flächen betreffen und darüber hinaus Einfluß auf die menschlichen Verzehrgewohnheiten haben können. Diese Faktoren gehen grundsätzlich in die Berechnung der potentiellen individuellen und kollektiven Strahlendosen ein und beeinflussen so die Ergebnisse von Sicherheitsanalysen.

Wegen der zahlreichen, miteinander gekoppelten Phänomene, die während einer Eiszeit ablaufen, sind ohne entsprechende Modellrechnungen keine Aussagen darüber möglich, ob sich bei der Einbeziehung von Klimaänderungen höhere oder niedrigere potentielle Schadstofftransporte in die Biosphäre oder prognostizierte Strahlenexpositionen der Bevölkerung ergeben. Wegen der starken Abhängigkeit der Sonneneinstrahlung und deren Änderungen von der geographischen Breite ist die Auswirkung von Klimaänderungen, insbesondere von Eiszeiten, vor allem in nördlichen Gebieten wie Schweden oder Kanada von Bedeutung.

2.6.2.1 Methoden zur Prognose von Eiszeiten

Die mittlere Energieflußdichte der Sonneneinstrahlung beträgt auf der Erdoberfläche derzeit $1,36 \text{ kWm}^{-2}$. Diese als "Solarkonstante" bezeichnete Größe wird durch Schwankungen der emittierten Sonnenenergie wie z. B. Sonnenflecken, ^3He -Instabilitäten, galaktische Stäube u.a. beeinflusst, deren Vorhersagbarkeit derzeit noch sehr eingeschränkt ist. Dagegen werden die Schwankungen der solaren Energieflußdichte und die daraus resultierenden zyklisch auftretenden Eis- und Warmzeiten infolge von langperiodischen Änderungen der Erdbahnelemente befriedigend durch die Milankovich-Theorie erklärt. Diese berücksichtigt die periodischen Änderungen der Schiefe der Ekliptik (zwischen $24,1^\circ$ und $21,5^\circ$ mit einer Zykluslänge von 41 000 Jahren), der Präzession der Erdachse ($50,5'' \text{ a}^{-1}$, Zykluslänge 23 000 Jahre, und der Bahnexzentrizität (zwischen 6,07 % und 0,05 %, Zykluslänge ca. 100 000 Jahre).

Für die Prognose der Klimaänderungen wurden mehrere Modelle entwickelt, in denen die zeitlichen Verläufe der durchschnittlichen Temperaturen, des Sauerstoff-Isotopenverhältnisses $\delta^{18}\text{O}$ in biogenen Sedimenten, der Gesamtmasse der kontinentalen Vereisung

oder der eustatischen Schwankungen¹ beschrieben werden. Diese Größen korrelieren deutlich miteinander. Das Sauerstoff-Isotopenverhältnis $\delta^{18}\text{O}$ in karbonatischen Sedimenten ist in erster Näherung linear von der Wassertemperatur abhängig, wobei der Temperaturkoeffizient $0,22\text{‰ K}^{-1}$ beträgt [77]. Ursache für den $\delta^{18}\text{O}$ -Anstieg in den Ozeanen ist, daß bei einer Eiszeit in den polaren Eiskappen größere Mengen Niederschlagswassers gespeichert werden. Dessen Gehalt an dem schweren ^{18}O -Isotop wird bei der Verdampfung aus dem ozeanischen Wasserreservoir ab- und dementsprechend in den Ozeanen angereichert. Das Isotopenverhältnis $\delta^{18}\text{O}$ ist daher ein Parameter für paläoklimatische Temperaturänderungen, der darüber Aufschluß gibt, welche Bildungstemperaturen, bei der Sedimentation der Gesteine geherrscht haben, bzw. welches Klima in den bekannten geologischen Zeitabschnitt vorherrschend gewesen ist.

Die paläoklimatischen Temperatur- bzw. $\delta^{18}\text{O}$ -Verläufe lassen sich mithilfe mathematischer Modelle mit der astronomisch bestimmbaren, periodischen lokalen Sonneneinstrahlung verknüpfen. Die meisten der bisher durchgeführten Analysen des späten Pleistozäns (10-100 Tausend Jahre) basieren auf gemessenen $\delta^{18}\text{O}$ -Profilen an Bohrkernen mariner Sedimente von *Emiliani* aus den 50er und 60er Jahren und späteren von *Shackleton und Mitarbeitern*. Das Literaturverzeichnis in [77] enthält eine umfassende Aufstellung dieser Arbeiten.

Für die Berechnung der klimatischen Entwicklung in Abhängigkeit der Sonneneinstrahlung stehen einfache Energiebilanzmodelle, Strahlungs-Konvektionsmodelle oder allgemeine Kreislaufmodelle zur Verfügung [6]. In einer zusammenfassenden Studie [56] wurde 1996 bezüglich der Berücksichtigung von Klimaänderungen in Endlager-Sicherheitsanalysen festgestellt:

- Untersuchungen haben ergeben, daß mindestens 50% der Temperaturschwankungen im Quartär als Folge von astronomischen Effekten und den durch sie bedingten Klimaänderungen verursacht wurden.
- Die Analyse der Klimaänderungen in der Vergangenheit zeigt keine unerklärlichen positiven Rückkopplungen. Die Änderungen sind immer durch Prozesse mit negativer Temperaturrückkopplung begrenzt worden. Die Rückkopplungseffekte

¹ Eigenschwankungen des Meeresspiegels durch Änderung des Wasserhaushalts der Erde

zwischen den Klimavariablen sind grundsätzlich verstanden, die Komplexität und starke Nichtlinearität macht die Prognosen zukünftiger Änderungen aber praktisch unmöglich.

- Zur Beschreibung des geophysikalischen Systems mit seinen Änderungen eignen sich Autoregressive Modelle (ARIMA). Daneben sind auch Markov-Matrizen und stochastische Modelle geeignet. Markov-Matrizen beruhen auf den beobachteten Häufigkeiten der klimatischen Zustände und deren Änderungen in der Vergangenheit und setzen voraus, daß diese Wahrscheinlichkeiten auch in der Zukunft gelten.
- Der wissenschaftliche Kenntnisstand reicht aus, um Modelle zu entwickeln, mit denen die klimabedingten Änderungen wichtiger hydrogeologischer Variablen, wie Grundwasserspiegel und -strömungen, Evapotranspiration etc. beschrieben werden können. Darüber hinaus liegen in zunehmendem Umfang Ergebnisse aus Untersuchungen über Klimaänderungen in vielen Gebieten der Erde vor. Diese können zur Verbesserung der theoretischen Modelle herangezogen werden.
- Die verfügbaren mechanistischen Modelle zur Klimavorhersage (EBM: Energiebilanz, RCM: Strahlungs-Konvektion, GCM: "General Circulation") werden für die langen Vorhersagezeiträume in endlagerbezogenen Sicherheitsanalysen als nicht ausreichend angesehen.
- Die globalen Klimaänderungen werden in verschiedenen Endlagerprojekten in unterschiedlichem Maß als lokale Änderungen berücksichtigt. Entsprechend sollten für standortbezogene Klimavorhersagen spezielle Untersuchungen erfolgen, die zukunftsgerichtete Aussagen zur Abhängigkeit von globaler und regionaler Klimaentwicklung zulassen.

2.6.2.2 Auswirkungen auf Schadstoffmobilisierung und -transport

Die direkten Auswirkungen einer Eis-/Warmzeitperiode, die mit dem Milankovich-Modell vorhergesagt wurden, sind am Beispiel des schwedischen Standorts Äspö erkennbar, für den im Rahmen des SITE-94-Projekts [63] eine exemplarische Sicherheitsanalyse durchgeführt wurde. Am Ende der letzten großen Eiszeit vor ca. 10 000 Jahren hat sich das Grundgebirge in Nordeuropa nach Abschmelzen der 2 000 m mächtigen Eisschicht um ca. 400 m gehoben. Dabei wurden die Verbindungen zwischen Ost- und Nordsee vorübergehend unterbrochen. In den nächsten 10 000 Jahren werden die Temperaturen

wieder zurückgehen und der Meeresspiegel um etwa 40 m durch die zunehmende Vereisung sinken. Diese periglaziale Vereisung erreicht ihr Maximum in 20 000 Jahren. Die dauerhafte Eisbedeckung wird den Standort Äspö nicht erreichen. Allerdings nimmt die Mächtigkeit des Permafrosts auf ca. 100 m zu. Die nachfolgende Vereisung erreicht entsprechend der Modellierung ihren Höhepunkt in 60 000 Jahren. Dabei werden auch weite Teile Norddeutschlands mit erfaßt. Am Standort Äspö sinkt die Erdkruste unter der Last der Eisschicht um ca. 500 m ab. Die Meerestiefe der Ostsee vergrößert sich gegenüber heute um ca. 80 m. Nach ca. 75 000 Jahren stellen sich dann wieder warmzeitliche Bedingungen ein.

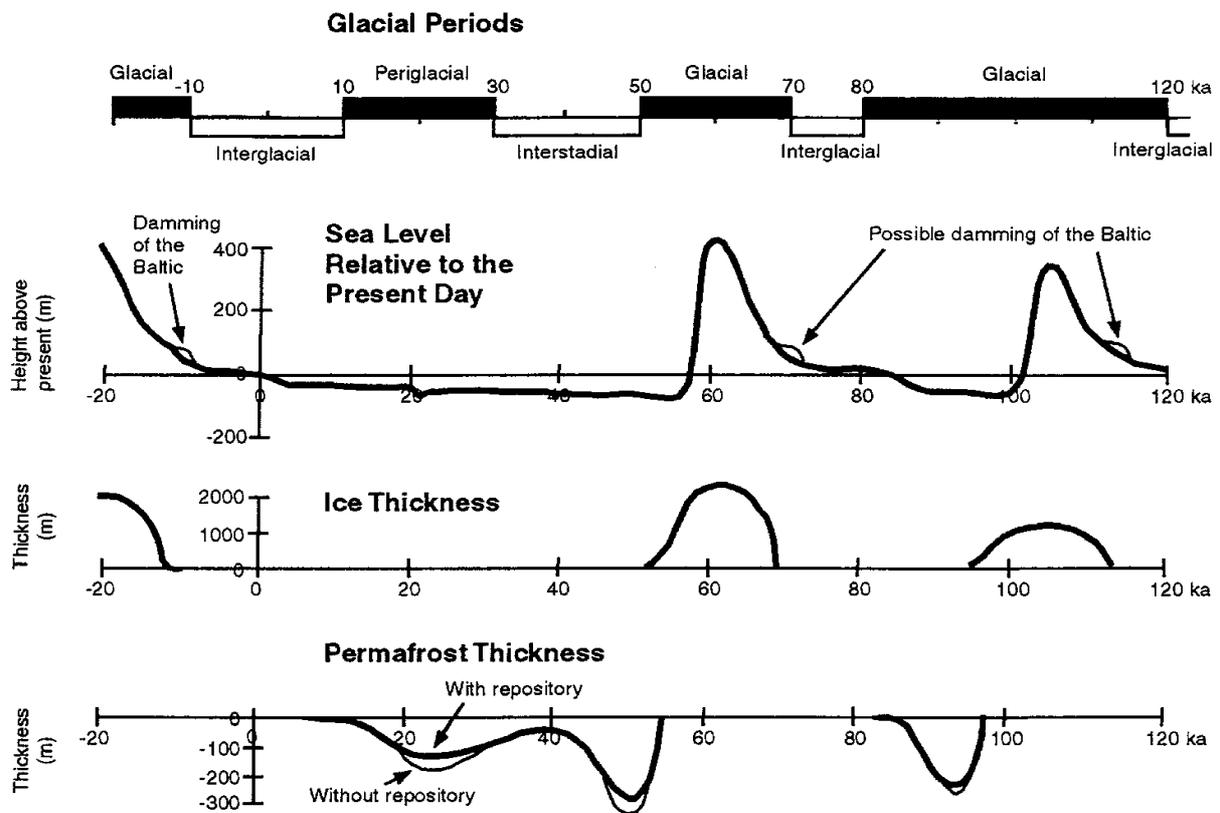


Abb. 2.4: Modellrechnungen zu früheren und zukünftigen Änderungen hydrogeologischer Bedingungen infolge wechselnder Eis- und Warmzeiten am Standort Äspö (nach [63])

Für die Beschreibung eines Eiszeit-Szenarios, in der das Endlagersystem durch Änderungen des Meerwasserspiegels, des Permafrostbereiches und der Mächtigkeit der Eisüberdeckung beeinflusst wird, müssen Schätzwerte für folgende Parameter bereitgestellt werden:

- Mächtigkeit und Gradient der Eisbedeckung,
- supra- und subglaziale Abflußmengen,
- Mächtigkeit der Permafrostzone,
- Chemismus der lokalen salinaren Wässer (Tiefen- und Meerwasser),
- Chemismus der regionalen Süßwässer (Niederschläge und Schmelzwasser),
- die Verteilung von Ansammlungen organischen Materials an der Oberfläche, soweit diese den Chemismus des einsickernden Wassers beeinflussen.

Um mögliche Auswirkungen einer Eiszeit in prognostische Langzeitsicherheitsanalysen einbeziehen zu können, muß ein entsprechendes Referenzszenario entwickelt werden. Dabei geht es darum, die langzeitliche Entwicklung des Endlagersystems um folgende Punkte zu erweitern:

- Gebirgsmechanik: Die gebirgsmechanischen Wirkungen, die aus der Druckbelastung der Eisschicht resultieren, gehören zu den wichtigsten Vorgängen im Eiszeitszenario. Die gebirgsmechanischen und die hydrologischen Vorgänge sind über den Druck der Eisschicht miteinander gekoppelt.
- regionale Hydrogeologie und Geochemie: Schwankungen des Meeresspiegels, Mächtigkeit des Permafrosts und der Eisdicke bewirken nachhaltige Veränderungen der hydrogeologischen Randbedingungen. Diese können auch das System der hochsalinaren Tiefenwässer beeinflussen. Darum muß für das regionale hydrogeologische Modell die Änderung der dichtegetriebenen Grundwasserströmung berücksichtigt werden.
- Hydrogeologie und Geochemie im Endlagerbereich: Die Änderungen des Grundwasserregimes sind im Endlagerbereich beim Rückgang der Vergletscherungen möglicherweise am größten. Das Vordringen von Grundwasser mit unterschiedlichem Chemismus - insbesondere mit hohem Oxidationspotential - in tiefe Gesteinsformationen kann zu einer stärkeren Mobilisierung von Radionukliden führen.

- Radionuklidfreisetzung und Transport: Die Parameter, die Freisetzung und Transport der Radionuklide bestimmen, können sich in glazialen Zyklen möglicherweise mehrfach ändern. Dabei ist nicht auszuschließen, daß Radionuklide vorübergehend akkumuliert und später mit entsprechend erhöhten Konzentrationen freigesetzt werden.
- Biosphäre: Die Auswirkungen eines Glazials oder Periglazials in der Biosphäre sind sehr vielfältig. Abhängig von der örtlichen Lage zum Vereisungszentrum erfolgen in unterschiedlichem Maß die Bildung und das Verschwinden von Oberflächengewässern, die Freilegung von Sedimenten bei Hebungen nach einer Eiszeit, sowie Wechsel zwischen Süß-, Brack und Salzwasser mit entsprechenden Änderungen der menschlichen Verzehrgewohnheiten, insbesondere für Fisch.

Inwieweit sich die menschliche Gesellschaft diesen Veränderungen anpaßt und was das letztendlich für Nahrungsmittelangebot und Verzehrgewohnheiten bedeutet ist noch völlig offen. Gleichwohl werden die Auswirkungen derartiger Klimaänderungen entsprechend den nationalen Endlager-Sicherheitskriterien in Frankreich bei den Planungen für ein HLW-Endlager betrachtet. So wurden Anfang der 90er Jahre für die betrachteten Endlagerformationen Szenarien entwickelt, die neben den Klimaänderungen und Eiszeiten auch damit einhergehende Gebirgshebungen und -senkungen berücksichtigen [7]. In den in England [37] und Schweden [63] durchgeführten Sicherheitsanalysen wurden ebenfalls entsprechende Modelle entwickelt und damit die resultierenden Konsequenzen der direkten Einflüsse von Eiszeiten berechnet.

2.6.2.3 Auswirkungen auf Standort und Bevölkerung

Klimaänderungen bis hin zu Eiszeiten können sich unter Umständen auf die Freisetzung und den Transport von Schadstoffen aus einem Endlager auswirken. Sie werden in jedem Fall den Standort und die in seiner Region lebende Bevölkerung betreffen; abgesehen von den überregionalen soziopolitischen Implikationen. Als wesentliche Konsequenzen für den Standort werden in den verschiedenen sicherheitsanalytischen Modellbetrachtungen angeführt:

- Änderungen der Bevölkerungsdichte
- Änderungen der Niederschlagsmengen und der Verdunstung
- Freilegung von Sediment oder Bildung von Gewässern bei Hebung/Senkung der Geländeoberfläche
- Änderungen der Bewässerung mit Grundwasser
- Änderungen der Verzehrgewohnheiten der Bevölkerung
- Verlangsamung der Sedimentation

Im Sicherheitsnachweis für die WIPP-Site [71] wurden nur diese Effekte berücksichtigt, da wegen der geographischen Lage des Standorts eine glaziale Überdeckung ausgeschlossen werden kann. In probabilistischen Rechnungen zum Nachweis der Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte wurden zukünftige Klimaänderungen über die Grundwasserneubildung als einzigem Parameter berücksichtigt. Aus standortbezogenen Untersuchungen wurden Werte für die jüngere geologische Entwicklung abgeleitet [10], [66] und darauf aufbauend die für Prognosen benötigte Wahrscheinlichkeitsdichterelation abgeleitet. Es ist festzustellen, daß mit diesem Parameter die Grundwasserströmung in einem weiten Bereich möglicher zukünftiger Zustände simuliert werden kann, in denen das Klima feuchter, der Grundwasserspiegel höher, und die Strömungen schneller als gegenwärtig sind.

2.6.3 Vulkanismus

Entsprechend den geologischen Verhältnissen hat die Berücksichtigung des Vulkanismus in sicherheitsanalytischen Abschätzungen für ein HLW-Endlager in Japan einen relativ hohen Stellenwert. Zusammen mit dem Vulkanismus sind tektonische Vorgänge wie Verschiebungen entlang von Störungszonen, Hebungen und Abtragungen sowie klimatische Änderungen wichtige Parameter. In der H12-Studie [19] wurden die zukünftigen Veränderungen dieser Bedingungen aus einer Analyse der entsprechenden Parameter in den letzten 100 000 Jahren abgeschätzt:

- dynamische Zerstörung und Veränderung des Liegendgesteins,
- Anstieg der Gesteinstemperatur,

- Bildung hydrothormaler Konvektionsschleifen mit Beeinflussung der Grundwasserströmung,
- thermische, hydrologische und geochemische Änderungen des Grundwassers durch vulkanische Gase und Wechselwirkungen mit dem Gestein bei erhöhten Temperaturen.

Diese Einflüsse wurden in entsprechenden Szenarien berücksichtigt und die Konsequenzen dafür berechnet.

2.6.4 Neotektonische Bewegungen

Neotektonische Bewegungen spielen grundsätzlich bei der geologischen und sicherheitsbezogenen Bewertung von Endlagerstandorten eine Rolle. Häufig sind sie an seismisch aktive Gebiete gebunden. In weitaus selteneren Fällen können sie auch entlang älterer geologischer Strukturen auftreten oder sich als großräumige Absenkungen bzw. Hebungen bemerkbar machen.

In Westeuropa war die neotektonische Aktivität im Tertiär (Pliozän) distraktiv und von NW nach SE orientiert. Seit dem Quartär findet eine Kompression statt, die von NNW nach SSE orientiert ist und bis in die Gegenwart nahezu unverändert andauert. Sie wird bestimmt durch das Zusammentreffen der afrikanischen und europäischen Platte. Seit dem Permotrias (250-220 Mio Jahre) beträgt die Dauer der kompressiven und distraktiven Phasen jeweils etwa 10 Million Jahre. Davon ausgenommen ist die erwähnte distraktive Phase im Pliozän, über deren Dauer noch Unsicherheit besteht. Wenn man von diesen Erkenntnissen ausgeht, ist es möglich, Hypothesen über die großtektonischen Entwicklungen aufzustellen und im Hinblick auf den Zeitrahmen von Langzeitsicherheitsanalysen zu bewerten.

Zumindest für Westeuropa wird ein Andauern der gegenwärtigen Situation, d.h. der NNW-SSE-Kompression angenommen. Entsprechend wird davon ausgegangen, daß das Ausmaß der tektonischen Bewegungen für die folgende Million Jahre klein ist. Die Tektonik in Südeuropa ist wegen der Einwirkung durch die afrikanische Platte komplizierter und stärker als in Nordeuropa. [56].

2.6.5 Resümee

Die Sichtung der vorliegenden internationalen Berichte mit Langzeitbezug hat gezeigt, daß zukünftige Veränderungen der geologischen, hydrologischen und klimatischen Bedingungen in unterschiedlichem Umfang und Detaillierungsgrad in die Sicherheitsanalysen einbezogen wurden. Dieses ist z.T. durch die unterschiedlichen geologischen und geographischen Randbedingungen in den verschiedenen Ländern begründet. So haben beispielsweise die direkten Auswirkungen einer Eiszeit in den Sicherheitsanalysen für ein Endlager in Schweden [63] einen höheren Stellenwert als in denen für ein Endlager in Japan [19]. Im Gegensatz dazu wurden in der Studie für ein HLW-Endlager in Japan die Auswirkungen von tektonischen Krustenbewegungen und des Vulkanismus relativ detailliert berücksichtigt.

Für die Vorgehensweise in Deutschland ist zu berücksichtigen, daß, wie vergangene Eiszeiten gezeigt haben, eine Eisbedeckung zumindest der norddeutschen Tiefebene sehr wahrscheinlich ist. Diese hätte entsprechend den Ausführungen in Kap. 2.6.2.2 u.a. länger anhaltende Permafrost-Perioden und andere Auswirkungen auf die hydrogeologischen Verhältnisse zur Folge, die wiederum den Radionuklidtransport signifikant beeinflussen können. Es wird deshalb als sinnvoll erachtet, Auswirkungen von Eiszeiten für deutsche Endlagerbedingungen im Detail zu untersuchen und in zukünftigen sicherheitsanalytischen Modellrechnungen entsprechend einzubeziehen.

Zukünftige Entwicklungen

Kenntnisstand

- In anderen Ländern werden Modelle zur Berücksichtigung zukünftiger Veränderungen von geologischen, hydrologischen und klimatischen Verhältnissen in Langzeitsicherheitsnachweise einbezogen.
- In deutschen Langzeitsicherheitsnachweisen wurden zukünftige Veränderungen bisher nicht berücksichtigt.

Relevanz

- Auswirkung von zukünftigen Klimaveränderungen in Deutschland können von Relevanz sein. Frühere Eiszeiten haben zu Permafrost und langzeitigen Eisbedeckungen in Norddeutschland geführt.
- Tektonische Veränderungen und vulkanische Aktivität in den nächsten Mio Jahren werden in Nordeuropa gering eingeschätzt.

Empfehlungen für weitere FuE

Untersuchungen zur Ermittlung der Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf das Endlagersystem und Bewertung hinsichtlich der Langzeitsicherheit von Endlagern

3 Verfolgung internationaler Aktivitäten

Die OECD/NEA hat verschiedene Gremien zur gegenseitigen Information der 23 OECD-Länder etabliert. Für das Thema radioaktive Abfälle und Entsorgung ist das RWMC (Radioactive Waste Management Committee) mit den beiden wichtigen ständigen Arbeitsgruppen SEDE (Site Evaluation and Design of Experiments) und PAAG (Performance Assessment Advisory Group) zuständig. In beiden Arbeitsgruppen ist ein Mitglied des Fachbereichs Endlagersicherheitsforschung vertreten und nimmt an den jährlichen Arbeitssitzungen teil. Ebenso beteiligen sich Mitarbeiter des Fachbereichs in den von PAAG und SEDE einberufenen Arbeitsgruppen wie Clay Club, IPAG und den GEOTRAP-Workshops. Die wesentlichen Ergebnisse aus den verschiedenen internationalen Aktivitäten sind im folgenden dargestellt.

3.1 Performance Assessment Advisory Group (PAAG)

Die Performance Assessment Advisory Group (PAAG) bearbeitet Fragestellungen, die im Zusammenhang mit der Langzeitsicherheit eines Endlagers stehen. Hauptzielsetzung ist, die Entwicklung gemeinsamer Ansätze, Methoden und Vorgehensweisen zur Sicherheitsbeurteilung zu diskutieren und voranzubringen. Die Arbeiten wurden sowohl in der Gruppe selbst als auch in Untergruppen durchgeführt und in speziellen Fällen durch Workshops unterstützt.

Zur Einrichtung und Pflege einer Datenbank zum Thema "Features, Events and Processes" (FEP) wurde als Plattform für die Szenarienentwicklung eine "FEP Data Base Core Group" eingerichtet (vgl. Kap. 3.10). Diese berät über Gestaltung und Benutzeroberfläche der Datenbank sowie über das Verfahren zur Aufnahme weiterer Datensätze. Im Hinblick auf die Feststellung des aktuellen Kenntnisstandes mit den bisher gewonnenen Erfahrungen bei der Szenarienentwicklung wurde ein Workshop veranstaltet. Die Ergebnisse werden in Kürze von der NEA dokumentiert.

Das Thema "Transport der Radionuklide in der Geosphäre" wird im Rahmen des NEA-Projekts GEOTRAP weitgreifend bearbeitet. In bisher vier Workshops wurden folgende Punkte behandelt: Vorgehensweise bei der Prognose von Transportvorgängen, Modellie-

rung örtlicher Variabilitäten, Charakterisierung wasserleitender Gesteine, Vertrauensbildung in Transportmodelle. Beim letzten Workshop erfolgte eine Mitwirkung im Programmkomitee, worauf in Kapitel 3.4 näher eingegangen wird. Die Ergebnisse der bisherigen vier Workshops sind in [42], [43], [45], [46] zu finden.

Die Bearbeitung der Thematik "Sorptionsvorgänge" erfolgt innerhalb von PAAG als auch in einer eigenen Untergruppe. Zum Stand der Sorptionsuntersuchungen werden Informationsblätter von den jeweiligen nationalen Labors angefordert und den Mitgliedern in geeigneter Form zur Verfügung gestellt. In einem Sorptions-Forum werden mögliche mechanistische Ansätze zur detaillierteren Beschreibung der Sorptionsvorgänge diskutiert. Ziel ist die Bereitstellung fortschrittlicher Modellansätze zur Ablösung des bisher verwendeten K_d -Konzeptes.

Zur Fragestellung der "Löslichkeitsgrenzen" werden die thermodynamischen Daten der wichtigsten radioaktiven Elemente in Datenbüchern zusammengestellt. Im Rahmen der ersten Projektphase wurden seit 1985 vier Datenbücher zu den Elementen Uran, Americium, Technetium und Neptunium/Plutonium erarbeitet, von denen bereits zwei herausgegeben wurden [74], [75]. Seit 1998 werden in einer zweiten Projektphase die Elemente Nickel, Selen und Zirkonium bearbeitet sowie ein Statusreport zur Wechselwirkung der o.g. Elemente mit organischen Komplexbildnern erstellt.

Um die jeweiligen nationalen Methoden und Vorgehensweisen vergleichen und in Grundzügen harmonisieren zu können, werden in der Arbeitsgruppe IPAG die bisher durchgeführten Langzeitsicherheitsanalysen aufgearbeitet und die Erfahrungen ausgewertet (vgl. Kap. 3.3). In der zweiten Projektphase wurden in den letzten Jahren insbesondere die Erfahrungen der Genehmigungsbehörden mit Antragsunterlagen betrachtet. Diese Ergebnisse sind in [48] dargestellt. In einer dritten Phase sollen jetzt auch die Darstellung der Sicherheitsanalyse für eine breitere Öffentlichkeit, die Verwendung von Sicherheitsindikatoren und die Maßnahmen zur Vertrauensbildungen behandelt werden.

Das Thema "Vertrauensbildung in den Sicherheitsnachweis eines Endlagers" ist eng gekoppelt mit dem Thema "Validierung der sicherheitsanalytischen Modelle". Da eine strenge Validierung von Modellen, die für großräumige Gebiete und über extrem lange Zeiträume eingesetzt werden, nicht möglich ist, wurden verschiedene diesbezügliche

Maßnahmen unter dem Begriff Vertrauensbildung diskutiert. Diese Maßnahmen können zu einer kontinuierlichen Vertrauenssteigerung in die Ergebnisse der Modellrechnungen führen; eine Validierung im strengen Sinne des Wortes ist so aber nicht möglich. Die Ergebnisse dieser Diskussionen sind in [49] zusammengefaßt.

Eine signifikante Unsicherheit bei der Sicherheitsbewertung eines Endlagers ist die an die Entwicklung der Biosphäre gekoppelte Unsicherheit. In der Biosphäre können in ferner Zukunft aufgrund veränderter Verhältnisse an der Erdoberfläche und der Ernährungsgewohnheiten der dann lebenden Menschen andere Expositionspfade als heute von Bedeutung sein. Eine Möglichkeit mit dieser Schwierigkeit fertig zu werden ist, Referenzbiosphären, die unterschiedliche zukünftige Verhältnisse repräsentieren, zu definieren und den Konsequenzberechnungen zugrunde zu legen (vgl. Kap. 3.8). Bei einer breiten Akzeptanz solcher Vorgehensweise könnte dem Vorwurf einer willkürlichen Behandlung der Biosphäre begegnet werden.

Die fachlichen Prioritäten der PAAG-Gruppe werden dem Erkenntnisfortschritt angepaßt und mit dem RWMC abgestimmt. Als Arbeitsschwerpunkte der nächsten Jahre werden der Erfahrungsaustausch zwischen Antragsteller und Genehmigungsbehörde, die Methodik des Sicherheitsnachweises, die Vorgehensweise bei der Erstellung von Antragsunterlagen und die Integration von Standorterkundung, Endlagerplanung und Sicherheitsnachweis angesehen.

3.2 Site Evaluation and Design Experiments for Radioactive Waste (SEDE)

In 1989 hat das RWMC der NEA mit der Bildung der Koordinierungsgruppe "Site Evaluation and Design of Experiments" ein internationales Forum für die Behandlung von Strategien und Methoden zur Bewertung von Endlagerstandorten geschaffen. Teilnehmer sind Experten aus verschiedenen NEA-Mitgliedsländern, insbesondere solche, die in nationalen Organisationen für planerische und genehmigungsrechtliche Belange von Endlagern zuständig sind. Dazu gehören auch die Einrichtungen aus dem FuE-Bereich. Von deutscher Seite haben in der SEDE-Gruppe Vertreter von BfS, BGR und GRS mitgewirkt. Nach mehr als 10 Jahren wurde die Arbeit mit der 10. Sitzung im Oktober 1999

nach Maßgabe des RWMC beendet. Zukünftig werden die fachlichen Aspekte von PAAG und SEDE in einer neuen Beratungsgruppe, Integration Group for the Safety Case (IG-SC), weitergeführt.

Hauptziel der Beratungen in der SEDE-Gruppe war es, das Vertrauen in die fachlichen Grundlagen für eine Standortcharakterisierung/-auswahl sowie in die Methoden zur Eignungsprüfung und Sicherheitsbewertung zu erhöhen. Im Rahmen von Auftragsvergaben wurden gezielt wissenschaftlich-technische Fragestellungen bearbeitet, die je nach Thema von verschiedenen Organisationen finanziert wurden. Dieses Finanzierungsmodell wurde insbesondere für Themen des "Clay Clubs" gewählt, um in möglichst kurzer Zeit den jeweiligen Stand von Wissenschaft und Technik vertiefend darstellen und so die Grundlagen für einen zügigen Beratungsfortschritt schaffen zu können. Wegen der in den einzelnen Ländern verfolgten Endlagerkonzepte in z. T. sehr unterschiedlichen Gesteinsformationen waren diese Themen vorrangig "problemorientiert" auf Methoden der Standortcharakterisierung und -bewertung ausgerichtet. In diesem Zusammenhang wurden auch naheliegende Aspekte der Sicherheitsanalyse behandelt. Dazu gehören die wesentlichen Parameterkennwerte der geologischen und geotechnischen Barrieren sowie die Prozesse, die in wechselseitiger Abhängigkeit Einfluß auf das Langzeitverhalten des gesamten Barriersystems haben können. Diesbezüglich sind die SEDE-Arbeiten eng verknüpft mit den PAAG-Arbeiten. In gemeinsamen Aktionen und Workshops wurde das gegenseitige Verständnis zwischen Experimentatoren und Modellierern gestärkt und eine realere Einschätzung der Felddaten bei Verwendung in konzeptuellen Modellen herbeigeführt. Dabei ging es u. a. um Qualität und Grenzen der Aussagefähigkeit dieser Daten sowie um Planungen gezielter Experimente zu sicherheitsrelevanten Parametern und Prozessen.

Die fachlichen Schwerpunktthemen der SEDE-Arbeiten waren:

- In-situ-Messungen in Untertagelabors und Feldversuche
- Rolle der Geosphäre bei der Sicherheitsbewertung
- Schnittstellen und Wechselwirkungen zwischen Geosphäre und ingenieurmäßigen Barrieren
- Spezielle Aspekte tonhaltiger Gesteine (Clay-Club)

3.2.1 In-situ-Messungen in Untertagelabors und Feldversuche

Der jährliche Informationsaustausch hatte zum Ziel, die Ergebnisse und auch die technischen Schwierigkeiten der Experimente darzulegen. In einzelnen Fällen führte das zur Konzipierung weiterführender Versuche, die z. T. im Rahmen internationaler Kooperationen durchgeführt wurden. Besondere Beispiele sind dafür die Forschungsarbeiten im Schweizer Felslabor Grimsel und neuerdings im Mt.-Terri-Tunnel, denen im Rahmen der Berichterstattung starke Aufmerksamkeit gewidmet wurde. Von deutscher Seite wurden für die Jahrestreffen ausführliche Statusberichte zu den deutschen Endlagerprojekten (BfS, BGR) und den anwendungsorientierten Forschungsarbeiten in den Untertagelabors Asse, Grimsel und Äspö (GRS, BGR) vorbereitet und verteilt.

Die gesamten Informationen zu den In-situ-Experimenten und Feldversuchen lassen sich in zwei Kategorien einteilen:

- sicherheitsbezogene Versuche in Untertagelabors
- Feldarbeiten zur Standortqualifizierung und -vorauswahl

Berichte über die Versuche in Untertagelabors betreffen die Arbeiten in der Schachtanlage Asse/Deutschland und in der Waste Isolation Pilot Plant/USA (Salzgestein), im Felslabor Grimsel/Schweiz, im Hartgesteinslabor Äspö/Schweden, in den Tono und Kawanishi Mines/Japan und im Untergrund-Labor URL/Kanada (Granit), im Hades-Untertagelabor/Belgien (Plastischer Ton), im Mont-Terri-Tunnel/Schweiz und Tournemire-Tunnel/Frankreich (Tongestein) und im Yucca-Mountain-Projekt/USA (Tuff).

Über Feldarbeiten zur Standortqualifizierung und Standortvorauswahl wurde im Rahmen des finnischen, schwedischen und französischen Programms berichtet. Dagegen standen die Schweizer Arbeiten zur Formationsauswahl für ein Endlager für hochaktive Abfälle sowie zur Erkundung des Standortes Wellenberg etwas im Hintergrund.

In Finnland und Schweden werden entsprechend den gesetzlichen Rahmenbedingungen Vorarbeiten zur Standortfindung für ein Endlager für abgebrannte Brennelemente durchgeführt. Die an die SEDE-Gruppe weitergegebenen Informationen umfaßten sowohl strategisch-sozialpolitische Aspekte als auch Angaben zur Regionalgeologie und

zu den für vertiefende Untersuchungen angewandten Meßverfahren. Während in Finnland mittlerweile ein Standort vorausgewählt wurde, konnten in Schweden bisher keine Mehrheiten für die Benennung einer Gemeinde gefunden werden.

In Frankreich hat der langjährige Mediationsprozeß dazu geführt, daß drei Standorte für die Errichtung von Untertagelabors vorausgewählt wurden. Entsprechend einer politischen Entscheidung wurde in 1998 der Standort Meuse-Haute Marne (Gemeinde Bure) festgelegt. In den Jahren bis 2002 soll das Schachtabteufen zwecks Auffahrung der untertägigen Versuchsräume erfolgen. Das geplante Versuchs- und Meßprogramm wurde vorgestellt und erläutert. In diesem Zusammenhang muß auch erwähnt werden, daß im gleichen Zeitraum die geowissenschaftlichen Erkundungsarbeiten am Standort Sellafield/England eingestellt wurden.

Diese gesammelten Informationen bildeten die Grundlage für weitergehende Überlegungen in der SEDE-Gruppe. Da die verschiedenen Untersuchungen in den genannten bzw. geplanten Untertagelabors sich thematisch z. T. überlappen bzw. ergänzen, wird unter dem internationalen Aspekt die Notwendigkeit gesehen, neben einer weiterführenden fachlichen Bewertung der laufenden Arbeiten neu geplante Untersuchungen stärker auf offene Grundsatzfragen auszurichten und entsprechend zu begründen sowie Synergismen zu nutzen. Ein "Technisches Positionspapier" soll dazu beitragen, RWMC und technische Entscheidungsgremien über den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik in der experimentellen Endlagerforschung zu informieren, um so besten Nutzen aus den Arbeiten für alle Mitgliedsländer zu ziehen [50], [51].

Entsprechend hat sich das SEDE-Sekretariat, unterstützt durch einzelne SEDE-Mitglieder, beratend an einem Seminar in Cernice (Tschechische Republik, 29.-30.11.1998) zum Thema "Underground Laboratory – an Integral Part of Developing a Deep Geological Repository" und an einem IAEA-Consultants Meeting (Wien, 15.-17.03.1999) über "Uses of the Results obtained from Investigations in Underground Reserch Laboratories" beteiligt.

Diese Arbeiten machen deutlich, daß der SEDE-Gruppe auf dem Gebiet der experimentellen Bearbeitung von geologischen Endlagerfragen auch im Hinblick auf die EU- und IAEA-Aktionen eine entscheidende Rolle zukommt. Durch die langjährige Mitarbeit von

erfahrenen Wissenschaftlern und fachlichen Entscheidungsträgern ist ein Expertengremium entstanden, das maßgeblich zur Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik beiträgt. Das Berichtswesen, das sich an wichtigen, in der Fachwelt diskutierten Themen orientiert und diesbezüglich länderübergreifend angelegt ist, leistet nach außen hin einen wesentlichen Beitrag zur Vertrauensbildung.

3.2.2 Rolle der geologischen Barriere bei der Sicherheitsbewertung

Hauptaktivität in diesem Themenfeld war die Mitarbeit im Projekt GEOTRAP (s. Kap. 3.1 und 3.4). Von der SEDE-Gruppe wurde dieses Projekt intensiv verfolgt und im Hinblick auf weiterführende Arbeiten ausgewertet. Dabei wurde deutlich, daß bisher bei den Arbeiten zur Sicherheitsbewertung häufig einzelne, als Störungen des Gesamtsystems einzustufende Ereignisse mit ihren Konsequenzen behandelt wurden. Langzeitliche und mehr großräumige Aspekte der Geosphäre blieben häufig unberücksichtigt. Entsprechend spiegelt sich die breite Wissens- und Datenbasis zur natürlichen Entwicklung geologischer Systeme in den sicherheitsanalytischen Rechenmodellen noch nicht gebührend wider. Aus diesem Umstand kann sich eine deutliche Überkonservativität ergeben, die von den eigentlichen geologischen Barriereigenschaften nur sehr eingeschränkt Gebrauch macht. Die dazu in SEDE geführte Diskussion hatte das Ergebnis, daß die Gruppe zukünftig stärkeres Gewicht auf die natürlichen Entwicklungsprozesse im Geosystem gelegt sehen will, um so eine breitere Basis für die Szenarienanalyse zu schaffen. Als erster Schritt ist vorgesehen, diesbezügliche Informationen, die in den einzelnen Mitgliedsländern verfügbar sind, zusammenzutragen und zusammenfassend darzustellen.

Besonderes Interesse haben solche geowissenschaftlichen Daten, die auf eine nachhaltige geologische Stabilität von Regionen bzw. Standorten hinweisen. In diesem Zusammenhang werden auch die paläohydrogeologischen Arbeiten verfolgt. Mit dem SEDE-Workshop zum Thema "Use of Hydrogeochemical Information in Testing Groundwater Flow Models" (1998) [44] ist auf die Bedeutung dieses Themas hingewiesen worden.

Von deutscher Seite wurden die hydrogeologischen Arbeiten am Standort Gorleben (BGR) und die Entwicklung eines schnellen Computerprogramms zur Simulierung einer dichteabhängigen Grundwasserströmung (GRS) vorgestellt.

Dabei wurde deutlich, wie wichtig gerade diese Themen für eine Standortcharakterisierung und spätere Sicherheitsanalyse sind. Nicht nur in den verschiedenen Stadien eines Genehmigungsverfahrens, sondern auch in der öffentlichen Diskussion steht die Frage nach einer möglichen Belastung des Grundwassers an vorderster Stelle.

3.2.3 Schnittstellen und Wechselwirkungen zwischen Geosphäre und ingenieurmäßigen Barrieren

In den letzten Jahren hat die Frage nach Verbleib von Gasen im Endlager einen immer größeren Stellenwert erhalten. Daher wird in einer Anzahl von nationalen Programmen die Migration der Gase im Endlagernahbereich und das Auftreten sogenannter Zweiphasenflußphänomene (Gas – Wasser) untersucht. Da die meisten Arbeiten vorwiegend gesteins- und konzeptspezifisch, z. T auch abfallspezifisch sind, hat die SEDE-Gruppe hier die Notwendigkeit für einen übergreifenden Review gesehen, um den Stand des Wissens zu dokumentieren und Hinweise auf zukünftige Forschungsarbeiten zu geben. Damit sollen Grundlagen für ein verbessertes Systemverständnis geschaffen werden, wie es für eine sicherheitsanalytische Modellierung eines geologischen Endlagersystems gefordert wird. Als erster Schritt hat die SEDE-Gruppe zusammen mit der EU einen Statusbericht zum Thema “Gas Migration and Two-Phase Flow through Engineered and Geological Barriers for a Deep Repository for Radioactive Waste” [58] erarbeitet (s. auch Kapitel 3.7). Daran waren von deutscher Seite das ISTec und die GRS (Review) beteiligt. Darauf aufbauend hat die SEDE-Gruppe für das späte Frühjahr 2000 einen “Gas“-Workshop initiiert, der gemeinsam von NEA, EU und ANDRA ausgerichtet wird.

Aus sicherheitstechnischer wie auch sicherheitsanalytischer Sicht sind die Gebirgseigenschaften und die im Nahfeld ablaufenden Vorgänge von besonderem Interesse. Deshalb haben Fragestellungen, die sich um die Auflockerung der Gesteine drehen, in den SEDE-Beratungen einen besonderen Stellenwert gehabt. Das Thema wurde unter Federführung der NAGRA strukturiert und auf der 9. SEDE-Sitzung 1998 eingehend behandelt. Die in Tabelle 3.1 dargestellte Synthese soll zukünftig für weiterführende Beratungen zur Identifizierung noch notwendiger FuE-Arbeiten herangezogen werden. Unter dem Sicherheitsaspekt sind neben Fragen der Endlagerauslegung wiederum Grundwasser- und Gasausbreitung im Gebirge sowie der Radionuklidtransport von besonderer Bedeutung.

Tabelle 3.1: Excavation Disturbed Zones (EDZ) in verschiedenen Wirtsgesteinen
 (Vorlage diskutiert in NEA-SEDE und präsentiert von A.Gautschi, NAGRA)

Gesteinstyp	Auflockerung Rißbildung	Permeabilitäts änderungen^a	Geochemische Änderungen^b	Selbstheilung^c	Bemerkungen
Kristalline Gesteine, vulkanische Gesteine	Reaktivierung bestehender Klüfte und Risse, Bildung neuer Risse	mehrere Größenordnungen	gering, Oxidation an Rissen, Salzanreicherungen	keine	unbedeutend in ungesättigter Zone
Plastischer Ton	keine	gering	Oxidation, Sulfatausscheidung, Salzanreicherung	sehr schnell (plastisches Kriechen)	gleitender Übergang
Tongesteine	Reaktivierung vorhandener Texturen, Bildung neuer Risse	mehrere Größenordnungen	Oxidation an Rissen, Sulfatausscheidungen, Salzanreicherung	abhängig vom Quellvermögen	gleitender Übergang
Steinsalz	Bildung neuer Risse	mehrere Größenordnungen	Salzmetamorphosen	ja (visko-plastisches Kriechen, Kinetik?)	Umlösungen durch Feuchteinfluß in Betriebs-/Nachbetriebsphasen

a. Im Vergleich mit ungestörtem Gebirge

b. während der Einlagerungsphase, ggf. in der Nachbetriebsphase wegen Zement/Porenwasser - Wechselwirkung

c. in der Nachbetriebsphase

Unter Beteiligung von SEDE fand 1988 in Carlsbad/USA ein von US DOE und UKEA organisierter Workshop zum Thema "Uses of Backfill in Nuclear Waste Repositories" statt. Es wurde deutlich, daß die Komponente "Versatz" in den Endlagerkonzepten sowohl eine geochemische als auch eine geotechnische Sicherheitsbarriere darstellt. Arbeiten zur Auswahl und Qualifizierung von Verfüll- und Verschlusssystemen sowie die Ermittlung der sicherheitsrelevanten Daten für Langzeitbewertungen wurden als zukünftiger thematischer Schwerpunkt für die SEDE-Beratungen gesehen, insbesondere da auch bei PAAG ein deutliches Interesse vorliegt.

Die Frage der Wärmebelastung der Wirtsgesteine durch hochaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente ist in einigen nationalen Programmen intensiv untersucht worden. Besonders berichtet wurde in diesem Zusammenhang von den Versuchen im Felslabor Grimsel, in der Asse und in der Yucca-Mountain Site. Planungen für einen Erhitzerversuch im Tongestein laufen im Rahmen des Mont Terri-Projektes in der Schweiz. Auf der Basis dieser experimentellen Daten wird in der SEDE die Möglichkeit bzw. Notwendigkeit gesehen, deutlicher herauszuarbeiten, welche Auswirkungen erhöhte Wärme im Endlager auf die geologischen Barrieren haben kann und wie diese in Langzeitmodellen zu behandeln sind. Ansatzpunkt für eine diesbezügliche Initiative wäre, die Ergebnisse bisheriger In-situ-Aufheizversuche zusammenzustellen und zu bewerten.

3.2.4 Spezielle Aspekte tonhaltiger Gesteine (Clay-Club)

Als Arbeitsgruppe in SEDE hat sich der sogenannte "Clay Club" etabliert. Jährlich findet eine besondere Fachsitzung statt, an der vorwiegend Vertreter derjenigen Länder teilnehmen, die Ton/Tongestein als Wirtsgestein für Endlager ausgewählt haben. Über die Aktivitäten und Ergebnisse wird in SEDE berichtet. Der thematische Rahmen spannt sich von ursprünglich hydrogeologischen und geochemischen hin bis zur Behandlung sicherheitsanalytischer Fragestellungen. Dabei geht es zunehmend darum, welche Barriereigenschaften dieser Gesteine sich in den Langzeitmodellen mit welchem Vertrauensgrad darstellen lassen. Folgende Themen haben für die Weiterentwicklung der nationalen Endlagerkonzepte große Bedeutung:

- Entwicklung von Methoden und Strategien zur Überprüfung wesentlicher Parameter/Effekte durch In-situ-Versuche
- Weiterentwicklung des Prozeßverständnisses zum Wasser-/Gas- und Schadstofftransport durch die Gesteinsbarriere
- Vergleich des erreichten Standes von Wissenschaft und Technik mit anderen geowissenschaftlichen/geotechnischen Anwendungsgebieten.

Unter einzelnen Arbeiten und Aktionen ist die regelmäßige Ergänzung des "Catalogue of Characteristics of Argillaceous Rocks" zu nennen. Mittlerweile gibt das Dokument eine ausgezeichnete Referenzliste über die Tongesteine ab, die weltweit zur Endlagerung radioaktiver Abfälle untersucht werden. Eine Überarbeitung ist für das Jahr 2000 geplant, um eine höhere Konsistenz zwischen den nationalen Beiträgen und einen stärkeren Anwendungsbezug auch für Externe zu erreichen.

Da die genaue Analyse des Porenwassers im Ton von entscheidender Bedeutung für verschiedene sicherheitsbezogene Fragestellungen ist, wurde ein Expertenbericht zum Thema "Extraction of Water and Solutes from Argillaceous Rock – Methods and Current Interpretations" erstellt (vgl. auch Kap. 2.5.2). Von deutscher Seite wurden dazu Beiträge aus der Grundlagenforschung geliefert.

Im Rahmen von "topical sessions" wurden folgende Themen behandelt und in der Expertenrunde diskutiert:

- Fluidtransport auf Störungen und Klüften in Tongesteinen
- Erkennung sedimentärer und struktureller Heterogenitäten und Diskontinuitäten in Tongestein
- "Aufheizungs"-bedingte Problemstellungen, wie z. B. die Änderungen der Gesteinseigenschaften bei Temperaturen unter 100 °C, die Illitisierung der Tonminerale in einem hohen pH-Milieu und das durch Gasdrücke mögliche "fracturing".

Die Diskussion dieser Themen ergab, daß die Einflüsse auf ein Endlager im Tonstein weiter behandelt werden müssen, da eine Reihe von Prozessen in ihren Abläufen noch ziemlich unbekannt und die diesbezüglichen Datenbasen für eine Sicherheitsbeurteilung noch zu unsicher sind. Dazu gehören neben den thermischen Aspekten die hydraulische Ent-sättigung durch die normalen Vorgänge wie z.B. die Grubventilation.

Die große Variabilität der Tongesteine macht es erforderlich, die für eine Sicherheitsana-lyse wichtigen "Features, Events und Processes" gut strukturiert darzustellen und mit den verfügbaren Referenzen zu belegen. Aus diesem Grund haben SEDE/Clay-Club be-schlossen, einen FEP-Katalog (FEPCAT-Projekt) zu entwickeln. Ziel ist, eine international breite und wissenschaftlich gestützte Datenbasis für Langzeitsicherheitsanalysen zu schaffen. Damit sollen auch eine weitgehend abgestimmte Terminologie entwickelt und fachliche Prioritäten für die Behandlung offener Fragen ausgewiesen werden. Eine enge Verknüpfung zu der NEA-FEP-Datenbank (s. Kap. 3.10) wird angestrebt.

3.2.5 Integration Group for the Safety Case (IGSC)

Die Diskussion in NEA/RWMC ist in den letzten drei Jahren dahin gelaufen, daß man sich zu einer gewissen Umstrukturierung entschlossen hat. Insbesondere in 1999 wurden davon auch die beiden Gruppen PAAG und SEDE tangiert. Der RWMC hat für seine zukünftige Arbeit sechs strategische Themengebiete identifiziert:

- Übergreifende "waste management" –Themen
- Endlagerung von langlebigen radioaktiven Abfällen
- Management von "Decommissioning- und Dismantling"-Komponenten einschließ-lich sehr gering radioaktiver Abfälle
- Öffentliche Wahrnehmung und öffentliches Vertrauen
- Internationale Empfehlungen und Verträge
- Systemanalysen und Technologiefortschritte

Entsprechend hat der RWMC eine neue Arbeitsstruktur entwickelt. Folgende Gruppen sind geplant:

- RWMC-Regulatorenguppen
- Integrationsgruppe für die Endlagersicherheit (IGSC)
- Forum für das Vertrauen Beteiligter (FSC)
- Programm zum Austausch wissenschaftlicher und technischer Informationen über nukleare Decommissioning-Projekte

In den verschiedenen Beratungen, die innerhalb der SEDE-Kerngruppe und mit dem RWMC sowie dem NEA-Sekretariat stattgefunden haben, stellte sich heraus, daß IGSC die Teile von PAAG und SEDE fortführen soll, die vorrangig dem Sicherheitsnachweis von Endlagern dienen. Die SEDE-Mitglieder sind im Rahmen einer Fragebogenaktion in dieser Sache angesprochen worden. Unter dem Aspekt von

- nationalen Prioritäten für den standortbezogenen Sicherheitsnachweis,
- nationalen Prioritäten bezüglich Standortcharakterisierung und –bewertung sowie
- potentiellern Nutzen jenseits der nationalen Interessen

wurden folgende Themen für die zukünftigen Arbeiten identifiziert:

- Untertageexperimente
- Transport von Radionukliden in der Geosphäre
- Stabilität tiefer geologischer Formationen
- Einflüsse von Gas auf die Barriereigenschaften
- Verschuß- und Versiegelungssysteme
- Tonsteinformationen (Clay-Club)

Mit der Jahressitzung in 1999 haben PAAG und SEDE offiziell ihre Arbeiten eingestellt.

Der RWMC wird auf seiner Frühjahrssitzung in 2000 darüber abschließend beraten. Für Sommer 2000 ist ein Workshop geplant, auf dem die zukünftigen Arbeiten von IGSC stärker herausgearbeitet und die Arbeitsmethoden festgelegt werden.

3.3 Integrated Performance Assessment Group (IPAG)

Die "Working Group on Integrated Performance Assessments of Deep Repositories" wurde von der PAAG im Jahr 1994 einberufen. Sie hat in den Jahren 1995 und 1996 einen internationalen Vergleich von Langzeitsicherheitsanalysen (Performance Assessments, PAs) durchgeführt, wobei 10 Organisationen die Ergebnisse ihrer neuesten PAs eingebracht haben. Von deutscher Seite war dies die Studie "Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagerkonzepten für wärmeerzeugende radioaktive Abfälle" aus dem Projekt Sicherheitsanalyse Mischkonzept [9].

Die Arbeit der IPAG wurde vom Sekretariat der NEA koordiniert, wobei zunächst ein Fragenkatalog erarbeitet und von den teilnehmenden Organisationen beantwortet wurde. Die in zwei Arbeitstreffen erzielten Resultate wurden eingehend diskutiert und auf dem letzten Treffen im April 1996 in Washington D.C. in einem Abschlußbericht [41] zusammengestellt.

Der Abschlußbericht enthält neben der Zusammenfassung der auf den Fragenkatalog vorgelegten Antworten die in den Arbeitstreffen ausgearbeiteten Beobachtungen und Empfehlungen zu den diskutierten Themen. Dazu folgende Detailinformationen:

Im Jahr 1991 wurde eine gemeinsame Stellungnahme mehrerer internationaler Organisationen [12] zur Frage: "can long-term safety be evaluated?" verabschiedet. Die seitdem erzielten Fortschritte wurden von IPAG behandelt. Sie betreffen beispielsweise die Identifizierung relevanter FEPs, die Bearbeitung großer dreidimensionaler Untersuchungsgebiete, die Anwendung von Qualitätsmanagement-Methoden, die Anwendung probabilistischer Methoden und den Transport durch geklüftete Medien.

International ist der Standard von Performance Assessments nach Ansicht von IPAG hoch. Dennoch wurden Anregungen für zukünftige PAs formuliert, die beispielsweise zu einem engeren Zusammenspiel zwischen Standorterkundung, Errichtung eines Endlagers und unterstützenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten führen sollen. Auch die Zusammenarbeit zwischen Antragstellern und Genehmigungsbehörden auf technischem Gebiet sowie die Präsentation der Ergebnisse von PAs sollten verbessert werden.

Um einen internationalen Vergleich von PAs zu gewährleisten, sollten deren Ergebnisse in englischer Sprache veröffentlicht werden. Es wurden Empfehlungen ausgearbeitet, welchen Inhalt und Umfang diese Veröffentlichungen haben sollten. Ferner wurde der PAAG empfohlen, in Zukunft den Vergleich von Sicherheitsanalysen intensiver zu fördern, beispielsweise indem aktuell veröffentlichte Analysen bei PAAG-Sitzungen vorgestellt werden.

Die Rolle der Geosphäre sollte in Zukunft stärker berücksichtigt werden, beispielsweise bei der Wechselwirkung von Standorterkundung und Performance Assessment. IPAG schlägt vor, diese Arbeiten stärker zu integrieren, um schneller zu Ergebnissen in Sicherheitsanalysen zu kommen. Es hat sich gezeigt, daß das bisherige iterative Verfahren zu langsam ist, um effektiv arbeiten zu können. Ein internationaler Workshop über die in PAs verwendete Computercodes zur Berechnung des Radionuklidtransports in der Geosphäre wurde angeregt.

Weiterhin wurden als wichtige Themen diskutiert:

- Rückverfolgbarkeit und Transparenz in PAs,
- Behandlung der örtlichen und zeitlichen Variabilitäten und der Unsicherheiten,
- "Stylized presentations", z.B. in Form von Standard-Biosphären,
- formale Prozeduren zur Behandlung von FEPs (features, events and processes),
- natürliche Analoga.

IPAG hat wertvolle Hinweise für zukünftige Sicherheitsanalysen und zukünftige F+E-Arbeiten gegeben. Die Beachtung der Empfehlungen von IPAG sollte dazu führen, daß zukünftige Analysen effektiver durchgeführt, notwendige F+E-Arbeiten frühzeitig in Angriff genommen und die Berichte klarer formuliert werden. In den Berichten sollten u.a. alle in der PA beachteten Grenzen, z.B. durch gesetzliche Regelungen vorgegebene, beschrieben werden.

Um die Empfehlungen von IPAG in zukünftigen Sicherheitsanalysen zu berücksichtigen, sind folgende F+E-Arbeiten denkbar:

- Entwicklung von formalisierten Prozeduren zur Auswahl von FEPs und zur Entwicklung von Szenarien,
- Arbeiten zur Entscheidungsfindung über die Anwendung deterministischer und/oder probabilistischer Rechenverfahren,
- Studie zur Behandlung von Unsicherheiten und Variabilitäten: "expert judgement", nicht-quantifizierbare Unsicherheiten, usw.
- Entwicklung von stilisierten Verfahren, z.B. von Referenz-Biosphären oder Human-Intrusion-Szenarien.

Nach Abschluß der hier dargestellten Arbeiten wurde von der NEA ein neuer Arbeitskreis IPAG II eingesetzt, in dem Vertreter von Genehmigungsbehörden einen ähnlichen Vergleich von Sicherheitsanalysen unter dem Blickwinkel der Begutachtung durchgeführt haben.

Auf Empfehlung von RWMC und PAAG wurde Anfang des Jahres 2000 die dritte Phase IPAG-III begonnen. Diese Phase zielt auf die Erarbeitung von Ansätzen und Argumenten, die einer Vertrauensbildung bei Langzeitsicherheitsnachweisen von Endlagern dienen. Vor diesem Hintergrund sollen von deutscher Seite u.a. die durchgeführten Langzeitsicherheitsanalysen zu den Endlagern Morsleben und Konrad ausgewertet und die Ergebnisse in IPAG-III eingebracht werden.

3.4 GEOTRAP

Nach Abschluß des INTRAVAL-Projektes wurde als Nachfolgeveranstaltung zur Bearbeitung von Fragestellungen zur Radionuklidmigration in der Geosphäre das Projekt GEOTRAP initiiert. Es dient dem Informationsaustausch und der Diskussion gegenwärtiger Methoden der Datenerhebung, der Modellierung von Strömung und Transport von Radionukliden in geologischen Formationen sowie der Überprüfung von Modellierungen, die für Standortuntersuchungen oder Sicherheitsanalysen für tiefe geologische Endlager benutzt werden. Diese gemeinsam von der PAAG- und der SEDE-Gruppe der OECD/NEA getragene Veranstaltung wird als jährlicher Workshop mit unterschiedlichen Themen durchgeführt. Folgende Workshops fanden während der Projektlaufzeit statt:

- Field Tracer Experiments: Role in the Prediction of Radionuclide Migration, 28 - 30. August 1996 in Köln (GRS) [42],
- Modelling the Effects of Spatial Variability on Radionuclide Migration, 9. - 11. Juni 1997 in Paris (ANDRA) [43],
- Characterisation of Water-Conducting Features and their Representation in Models for Radionuclide Migration, 10. - 12. Juni 1998 in Barcelona (ENRESA) [45],
- Confidence in Models of Radionuclide Transport for Site-Specific Performance Assessment, 14. - 17. Juni 1999 in Carlsbad, New Mexico (USDOE/CAO) [46].

3.4.1 Beiträge und Mitwirkung

Auf dem Workshop "Modellierung räumlicher Variabilitäten" wurde das Poster "A Case Study on the Influence of Sorption Inhomogeneities on the Migration of Contaminants" vorgestellt. Beim Workshop "Vertrauen in Transportmodelle für Radionuklide" wurde im Programmkomitee bei der Vorbereitung und als Leiter der Arbeitsgruppe "Implications of Simplifications in Geosphere-Transport Modelling in Performance Assessment" mitgewirkt.

In dieser Arbeitsgruppe wurden die Vor- und Nachteile von Vereinfachungen, ihre Rechtfertigung und insbesondere ihre Auswirkung auf die Vertrauensbildung in Modellierungen untersucht. Es wurde festgestellt, daß der Grad der Vereinfachung bzw. die angemessene Detaillierung der Modelle von dem aktuellen Endlagerkonzept und dem speziellen Standort abhängen. Infolge der Vielzahl und der Komplexität der beteiligten Prozesse und infolge der großräumigen Ausdehnung und der langen Zeiträume ist man bei Sicherheitsanalysen grundsätzlich auf Vereinfachungen angewiesen. Während man bei Design- oder Optimierungsmodellierungen alle wesentlichen Effekte berücksichtigen muß, kann man sich bei Sicherheitsanalysen auf die wesentlichen Effekte beschränken. Diese Vereinfachungen müssen auf jeden Fall durch den Nachweis der Konservativität oder durch den Nachweis, daß die vereinfachten oder vernachlässigten Effekte von untergeordneter Relevanz sind, mit überzeugenden Argumenten gerechtfertigt werden. Diese Vernachlässigung von Effekten in Sicherheitsanalysen kann die Vertrauensbildung sowohl positiv als auch negativ beeinflussen. Durch Vereinfachung kann die Transparenz der Modellierung erhöht und damit das Vertrauen in die Modellierung vergrößert werden.

Umgekehrt wird bei Vernachlässigungen, deren Auswirkungen auf Sicherheitsanalysen nicht völlig klar sind, die Glaubwürdigkeit in die Modellierung verringert. Außerdem hängt der Vertrauensgrad bei Vereinfachungen vom Ziel der Analysen und vom Auditorium ab.

Auf demselben Workshop wurde über "The Transport Model for the Safety Case of the Konrad Repository and Supporting Investigations" vorgetragen. In diesem Beitrag wurde die Modellierung des Radionuklidtransportes durch das Deckgebirge und die zugehörigen Maßnahmen zur Vertrauensbildung in die Modellierung vorgestellt.

3.4.2 Auswertung der Erkenntnisse aus den Workshops bezüglich der Modellierung des Radionuklidtransportes in Granit

In Deutschland wurden Rechenprogramme zur Durchführung von integralen Sicherheitsanalysen vornehmlich für die Endlagerung radioaktiver Abfälle im Salinar entwickelt. Aufbauend auf vorhandenen Grundelementen wurde in jüngster Zeit mit der Entwicklung von Rechenmodulen für Endlager im Granit begonnen (vgl. Kap. 2.4 und [28]). Die GEO-TRAP-Workshops wurden hinsichtlich neuer Erkenntnisse zur Modellierung der Radionuklidmigration im Fernfeld eines Endlagers im Granit ausgewertet und berücksichtigt.

Es wurden zwei Aspekte identifiziert, die für eine Programm-Weiterentwicklung relevant sind. Es handelt sich dabei erstens um Prozesse, die beim Transport durch poröse Medien nicht auftreten oder bisher noch nicht berücksichtigt werden, und zweitens um die Festlegung der effektiven Parameter für die Transportmodellierung.

Bei der Transportmodellierung durch poröse Medien werden Advektion, Dispersion, Diffusion, der radioaktive Zerfall und die elementspezifische Sorption der Radionuklide an der Gesteinsmatrix berücksichtigt. Häufig werden für geklüftete Medien Klufnetzwerkmodelle benutzt. Dabei werden als mögliche Transportwege die einzelnen, sich schneidenden Klüfte betrachtet. Der Transport in den Klüften wird im allgemeinen analog zum Transport durch poröse Medien durch Advektion, Dispersion, Diffusion, radioaktiven Zerfall und elementspezifische Sorption beschrieben. Nur in wenigen Fällen wird das lineare Strömungsgesetz nach Darcy durch ein nicht-lineares Kluffströmungsgesetz ersetzt. Folgende Parameter bzw. Prozesse sind wesentliche Bestandteile der Modelle:

- Topographie der Klüfte: Orientierung, Größe, Häufigkeit, Öffnungsweiten, benetzte Oberfläche
- räumliche Variabilität: Permeabilität, Porosität, "Channelling"
- Matrixdiffusion: diffusives Eindringen der Radionuklide in die Gesteinsmatrix mit Sorption
- Ausfällung von Mineral- und Schadstoffphasen
- Komplexbildung: Einfluß auf Radionuklidtransport und Rückhaltung
- Kolloidbildung: Einfluß auf Radionuklidtransport und Rückhaltung
- Geochemisches Milieu: Einfluß auf Sorption und Ausfällung

Da weder Strömung noch Transport auf der mikroskopischen Ebene modelliert werden können, und da häufig vereinfachte Modelle zur Anwendung kommen, werden bei der Modellierung des Radionuklidtransportes sogenannte effektive Parameter benötigt. D.h., daß die Modellparameter nicht direkt aus Feldversuchen gewonnen werden können, sondern separat ermittelt werden müssen. Dazu ist es nötig, entweder die effektiven Parameter durch Hochskalieren in die benötigte Skala oder aber durch Modellkalibrierung in einer Skala, die für die Langzeitsicherheit relevant ist, zu bestimmen. Bei ihrer Ableitung spielen auch standortspezifische Parameter durchaus eine Rolle. Die effektiven Parameter hängen wesentlich von der betrachteten Skalierung ab und können folgendermaßen klassifiziert werden:

- Parameter, die sich aus der Homogenisierung bei der Hochskalierung ergeben
 - Homogenisierung von Prozessen z.B. Dispersivität
 - Homogenisierung von Parametern z.B. Porosität
- Parameter, die sich aus Vereinfachungen ergeben; z.B. Übergang von drei- auf ein-dimensionale Modellierung

Zwecks Weiterentwicklung des Rechenprogrammes CHETMAD, das die Matrixdiffusion senkrecht zur Transportrichtung berücksichtigt, wird der Einbau räumlicher Variabilitäten in Erwägung gezogen, die z.B. auch den Einfluß von Kolloiden und Komplexbildnern auf den Radionuklidtransport betreffen.

Grundsätzlich gibt es für die in Langzeitsicherheitsanalysen zu betrachtenden sehr langen Zeiträume auch zeitliche Abhängigkeiten der Prozesse und Parameter. Auf die generelle Behandlung derartiger zeitlicher Variabilitäten wurde bereits in Kap. 2.6 eingegangen.

3.5 WIPP Peer-Review

Anfang des Jahres 1996 hat das Department of Energy (DOE) die beiden internationalen Organisationen Nuclear Energy Agency (NEA) und International Atomic Energy Agency (IAEA) gebeten, einen Review der Genehmigungsunterlagen für die Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) durchzuführen. Dieser Review wurde im Herbst 1996 und Frühjahr 1997 durchgeführt und beinhaltete unter anderem eine einwöchige Anhörung der Beteiligten in Carlsbad. Die Ergebnisse des Reviews [40] wurden in einem gemeinsamen Papier von den beiden internationalen Organisationen herausgegeben.

Zur Durchführung des Reviews wurde eine Arbeitsgruppe als International Review Group (IRG) bestehend aus sechs Experten aus verschiedenen Ländern und vier Mitarbeitern der NEA und der IAEA eingesetzt. Das Arbeitsprogramm und die Zielsetzung wurden als Terms of Reference zwischen DOE sowie NEA und IAEA abgestimmt und sind Bestandteil des Reviewdokuments. Die Arbeitsgruppe hat die Unterlagen gesichtet und einen Fragenkatalog als Vorbereitung einer einwöchigen Anhörung erstellt. Nach Durchführung der Anhörung wurden die erzielten Ergebnisse dokumentiert.

Grundlage des Reviews waren die von DOE erstellten Genehmigungsunterlagen: Compliance Certification Application (CCA), bestehend aus einem Hauptband und etwa fünfzig Anhängen in insgesamt zwanzig Ordnern [69]. Die Arbeit der Gruppe sollte sich zunächst auf den Hauptband beschränken. Der Hauptband enthält jedoch keine in sich geschlossene Darstellung des Sicherheitsnachweises. Zur geschlossenen Bewertung des durchgeführten Sicherheitsnachweises war daher teilweise auch eine Durchsicht der Anhänge erforderlich.

Die Waste Isolation Pilot Plant befindet sich im Staate Neu Mexiko in einer flach gelagerten Salzlagerstätte in etwa 650 m Tiefe. Sie soll die Transuranabfälle aus der Kernwaffenproduktion und anderen militärischen Aktivitäten aufnehmen. Das Gesamtvolumen der zur Einlagerung vorgesehenen Abfälle wird mit 175 000 m³ angegeben.

3.5.1 Aufgabe und Zielsetzung

Die Aufgabe der internationalen Review Gruppe war die Erarbeitung einer Stellungnahme zum Langzeitsicherheitsnachweis der WIPP im Hinblick auf die Sinnfälligkeit der Vorgehensweise, den Stand der Technik und die Übereinstimmung mit internationalen Standards und Praktiken.

Die gewählte Vorgehensweise war im Hinblick auf das übergeordnete Ziel der CCA zu bewerten, die Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen nachzuweisen. Ein rein formaler Vergleich war nicht erforderlich, da er Aufgabe der Genehmigungsbehörde ist. Die Prüfung, inwieweit die durchgeführten Analysen wissenschaftlich fundiert sind und dem Stand der Technik entsprechen, war somit Hauptaufgabe der Gruppe. Dabei sollten auch die verwendeten Daten überprüft und die Vollständigkeit der berücksichtigten Effekte kontrolliert werden.

3.5.2 Genehmigungsgrundlage

Die gesetzlichen Randbedingungen wurden durch das Land Withdrawal Act (LWA) geschaffen, das u.a. die Environmental Protection Agency (EPA) als Genehmigungsbehörde festlegt. Als Regelwerk wurden die Verordnungen 40 CFR 191 und 40 CFR 194 vorgegeben, von denen die erste den Regelungsbedarf definiert und die zweite diesen im Detail darstellt.

Die Genehmigungskriterien für die WIPP-Anlage weisen einige Besonderheiten auf. Zunächst wird zwischen einer gestörten und einer ungestörten Entwicklung unterschieden. Bei der gestörten Entwicklung wird der Einschluß der Abfälle durch Forderung nach einer Begrenzung der Freisetzung in die Umgebung definiert, wobei hier probabilistische

Kriterien zur Anwendung kommen. Bei der ungestörten Entwicklung wird außerdem die Einhaltung einer Individualdosis und einer begrenzten Grundwasserkontamination gefordert. In beiden Fällen wird die Einhaltung nur in den ersten 10 000 Jahren gefordert. Für den nachfolgenden Zeitraum bestehen keinerlei Begrenzungen.

3.5.3 Einzelergebnisse

Die separate Behandlung und Analyse von gestörter und ungestörter Entwicklung ist für einen Sicherheitsnachweis eine durchaus geeignete Vorgehensweise. Die Anwendung unterschiedlicher Bewertungskriterien für beide wird von der IRG für nicht sinnvoll gehalten.

Ein probabilistischer Ansatz für den Nachweis zur Erfüllung des Einschlußkriteriums wird von der IRG befürwortet, da hierdurch die Streubreiten von Parametern, Unsicherheiten in den Annahmen und der Zufallscharakter von Ereignissen berücksichtigt werden können. Ein vollständiger Verzicht auf die Darstellung deterministischer Ergebnisse der Modellrechnungen wird jedoch bemängelt, da sich sonst das Verständnis über das komplexe Verhalten des Endlagersystems nicht ausreichend entwickeln läßt.

Der Sicherheitsnachweis wird entsprechend den Vorgaben der Verordnungen auf die ersten 10 000 Jahre begrenzt. Für den darüber hinausgehenden Zeitbereich finden sich keinerlei Argumente und Erläuterungen, die auf das Verhalten des Systems und die möglichen Auswirkungen auf die Biosphäre hinweisen. Dies wird in anderen Ländern als ein wesentliches Element eines vertrauensvollen Sicherheitsnachweises angesehen.

Die Betrachtung menschlicher Einwirkungen wird entsprechend den Vorgaben der Verordnungen auf die bisher praktizierten Techniken im Umfeld des Standorts (geologische Exploration) beschränkt. Wegen der möglichen Willkür bei der Festlegung von Szenarien für menschliches Einwirken wird eine Festlegung von Referenzszenarien von der IRG begrüßt. Eine solche Festlegung sollte aber ausreichend begründet werden. Darüber hinaus wäre auch die Betrachtung weiterer Szenarien im Sinne einer zusätzlichen Vertrauensbildung zu begrüßen.

Die Genehmigungsunterlage CCA ist auf die Erfüllung der EPA-Verordnungen ausgerichtet, die keine umfassende Argumentation zum Thema Langzeitsicherheit fordert. Daher stellt die CCA keinen vollständigen Sicherheitsnachweis dar, wie er in anderen Ländern verstanden wird.

Bei der Salzlagerstätte handelt es sich um eine langzeitstabile Formation, so daß die meisten zerstörenden natürlichen Ereignisse und Prozesse ausgeschlossen werden können. Um das potentielle Auftreten von Laugeneinschlüssen unterhalb der Einlagerungsformation begrenzen zu können, sollten weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

Bei den Vorgängen im Nahbereich des Endlagers handelt es sich um komplexe und gekoppelte Vorgänge, die noch nicht vollständig verstanden sind. Dies sind die Verformungen aufgrund der Hohlräumstellung, die Entwicklung von Gasdrücken und die chemischen Wechselwirkungen. Dem unzureichenden Verständnis wird durch eine entsprechend ungünstige Auswahl von Parameterwerten Rechnung getragen.

Insbesondere die Homogenität der Verhältnisse innerhalb der Einlagerungskammern ist zu hinterfragen, da die Prozesse der Mobilisierung oftmals von kleinräumigen Eigenschaften bestimmt werden. Eine umgehende Homogenisierung dieser Eigenschaften kann nicht ohne weiteres angenommen werden, so daß dazu weiterführende Analysen durchzuführen sind. Insbesondere die Einstellung eindeutiger chemischer Bedingungen in den Einlagerungskammern durch Magnesiumversatz ist nur dann voll wirksam, wenn weitgehend homogene Bedingungen im Einlagerungsbereich vorliegen.

Der eingebrachte Magnesiumversatz wird bei Kontakt mit zutretender Lauge deutlich quellen. Dies führt zur Volumenabnahme, zur Gasaufnahme und zu einer Behinderung der Austauschvorgänge mit Einstellung homogener Verhältnisse. Die Auswirkungen dieser Vorgänge auf das Gesamtsystem sind zu untersuchen und zu bewerten. Insgesamt wird festgestellt, daß die physikalischen Auswirkungen der chemischen Reaktionen mit dem Versatz noch nicht ausreichend betrachtet worden sind.

Die umfangreichen und qualitativ hochwertigen gebirgsmechanischen Daten rechtfertigen das Vertrauen in die Modellrechnungen und die Auslegung der geotechnischen Barrieren. Die IRG ist zuversichtlich, daß ein Schachtverschluß mit entsprechenden Langzeiteigenschaften errichtet werden kann. Allerdings waren die Analysen aufgrund der Vielzahl der Unterlagen nicht hinreichend nachvollziehbar.

Die Angaben zum Aktivitätsinventar der Abfälle sind nicht in allen Fällen konsistent. Beispielsweise sind die Angaben zu den Cäsium-Isotopen bei Betrachtung der Spaltproduktausbeuten nicht kompatibel, so ist davon auszugehen, daß die Angaben zum langlebigen Isotop deutlich unterschätzt sind. Dies hat jedoch nach Aussagen der DOE keinen signifikanten Einfluß auf das Endergebnis des Sicherheitsnachweises.

Die Vorgänge im Nahbereich des Endlagers werden durch eine Zweiphasenmodellierung beschrieben, in denen die wesentlichen Prozesse der Wechselwirkung zwischen beiden Phasen berücksichtigt sind. Die Kopplung mit gebirgsmechanischen Prozessen ist über eine funktionale Abhängigkeit realisiert, deren Konservativität möglicherweise nicht gewährleistet ist. Hierzu sollen nach Ansicht der IRG weiterführende Untersuchungen durchgeführt werden.

Die räumliche Variabilität der hydraulischen Eigenschaften der Culebra-Formation sind nach dem Stand der Technik berücksichtigt worden. Die Behandlung einiger spezieller Eigenschaften wie etwa die Instationarität der Strömung ist nicht vollständig nachvollziehbar. Ein einfacherer und besser nachvollziehbarer Ansatz wäre nach Ansicht der IRG vorzuziehen.

Die Genehmigungsunterlagen sind insgesamt schwer nachvollziehbar. Die Erläuterungen und Begründungen für die gewählten Vorgehensweisen sind auf viele Einzeldokumente verteilt und wiederholen sich in vielfältiger Weise. Eine vollständige Prüfung der Unterlagen ist somit extrem zeitaufwendig. Für eine mehr technische Leserschaft wäre ein zusammenfassendes Dokument mit einer in sich geschlossenen Darstellung des Sicherheitsnachweises sehr nützlich.

3.5.4 **Schlußfolgerungen**

Besonderheiten des Endlager-Sicherheitsnachweises sind:

- Die WIPP-Anlage liegt in einer Gegend mit Minerallagerstätten, die aktiv und intensiv ausgebeutet werden.
- Der Langzeitsicherheitsnachweis für das Endlager wird in erheblichem Umfang durch Vorgaben des Regelwerkes eingeschränkt.
- Die Unterlagen sind streng auf die Erfüllung der EPA-Vorgaben ausgerichtet und stellen keinen vollständigen Sicherheitsnachweis dar.

Von der IRG wurde dazu im Rahmen ihres Auftrages festgestellt:

- Die Genehmigungsunterlagen sind speziell darauf ausgerichtet, die Anforderungen aus dem EPA-Regelwerk zu erfüllen. Es wurden keine Anzeichen gefunden, daß diese Anforderungen nicht erfüllt werden. Insoweit ist die Unterlage als Genehmigungsunterlage geeignet.
- Die Annahmen und Rechenmodelle sind in ihrer Mehrheit technisch einwandfrei und basieren auf detaillierten und gut dokumentierten Untersuchungen und entsprechen dem Stand der Technik. Bezüglich der Abfallcharakterisierung insbesondere bei den Inventarangaben, der zeitlichen Entwicklung des Magnesiumoxid-Versatzes im Einlagerungsort, den Annahmen zur Homogenität des Quellterms, sowie der Speziation der Radionuklide im Nahbereich sind die basierenden Untersuchungen weniger belastbar.
- Die verwendeten Methoden für die Sicherheitsbewertung und insbesondere die Szenarienanalyse und die Methoden zur Durchführung probabilistischer Analysen sind in voller Übereinstimmung mit sonstigen internationalen Vorgehensweisen. Die Szenarienanalyse ist jedoch im Hinblick auf menschliche Einwirkungen durch das Regelwerk eingeschränkt. Einzelne Vorgehensweisen wie etwa die Berücksichtigung von Modell- und Szenarienunsicherheiten sowie die Darstellung von Zwischenergebnissen wie z.B. der deterministischen Analysen weichen von den Praktiken anderer Länder ab.

Als allgemeine Erfahrung des Reviews ist festzuhalten:

- Die WIPP-Genehmigungskriterien basieren hauptsächlich auf Kollektivdosisbetrachtungen innerhalb der ersten zehntausend Jahre und sind somit nicht direkt vergleichbar mit den Regeln, die in anderen Ländern angewendet werden. Durch zusätzliche mündliche Informationen über Abschätzungen der individuellen Risiken wurde der Review-Gruppe verdeutlicht, daß die WIPP-Anlage auch individuellen Risikokriterien, wie sie international Verwendung finden, genügt.
- Die Dokumentation der WIPP-Analyse wurde als sehr umfangreich jedoch nicht ausreichend gut strukturiert und transparent angesehen, da das Nachvollziehen von Sachverhalten selbst für erfahrene Sicherheitsanalytiker schwierig war.

3.6 DECOVALEX

Die zwei aufeinanderfolgenden, internationalen Gemeinschaftsprojekte DECOVALEX I und II (DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments in nuclear waste isolation) aus den Jahren 1991 bis 1994 und 1995 bis 1999 dienten zur Entwicklung von Modellen für gekoppelte thermisch-hydraulisch-mechanische Prozesse (THM-Modelling) in geklüftet porösen Gesteinen. Im Verlauf der Projekte hat sich das Interesse der beteiligten Institutionen von der Modellierung kleinskaliger, gut kontrollierter Laborexperimente auf die Simulation komplexer, realistischer In-situ-Versuche verlagert.

Auf dem abschließenden Workshop von DECOVALEX II im März 1999 wurden unter anderem die letzten Ergebnisse zu Task 1 - hydromechanische Modellierung der geplanten Schachtabenkung in Sellafield, UK und Task 2 - Modellierung des In-situ-T-H-M-Experiments in der Kamaishi Mine, Japan vorgestellt. Diese Arbeiten waren von besonderem Interesse, da sie den aktuellen Kenntnisstand bei der Simulation von T-H-M-Prozessen wiedergeben. Aus den Präsentationen ergab sich folgendes Bild:

- Die T-H-M-Vorversuche im Labor lassen sich mit gekoppelten Modellen und kalibrierten Materialparametern zufriedenstellend beschreiben.

- Für den T-H-M-Versuch in-situ konnte kein gekoppeltes Modell erfolgreich erstellt werden. Lediglich die Temperaturverteilung wurde hinreichend genau wiedergegeben.
- In beiden Tasks stellte bereits die Charakterisierung von geklüftetem Fels sowohl in mechanischer als auch in hydraulischer Hinsicht trotz umfangreicher Messungen ein erhebliches Problem dar.

Nach Abschluß des zweiten Projekts hat DECOVALEX III, in dem nunmehr T-H-M-Prozesse verstärkt auch unter dem Aspekt der Langzeitsicherheit von Endlagern untersucht werden, am 1. Juli 1999 begonnen. In den Tasks 1 und 2 werden wieder eine Palette von verschiedenen gekoppelten Prozessen in In-situ-Versuchen - diesmal im Grimsel und in Yucca Mountain - simuliert. Task 3 zielt darauf ab, die Relevanz von gekoppelten T-H-M-Prozessen in Bezug auf Performance Assessment zu untersuchen. Im Gegensatz zu den Tasks 1 und 2 stehen dabei langfristig zu erwartende Effekte im Vordergrund. Zu diesem Zweck werden drei Benchmarktests definiert, bei denen der Einfluß verschiedener physikalischer Phänomene und insbesondere deren Kopplung auf einer abstrakteren Ebene untersucht werden sollen:

- Wiederaufsättigung der Bentonitverfüllung in der Umgebung heißer Abfallbehälter
- Skalenabhängigkeit der T-H-M-Prozesse
- Langzeitverhalten eines generischen Endlagers unter eiszeitlichen Bedingungen; Simulation von Vergletscherungs-/Schmelzyklen

3.7 NEA-Statusreport Gasmigration und Zweiphasenfluß

In der Nachbetriebsphase eines Endlagers für radioaktive Abfälle können sich Gase durch verschiedene Prozesse in beträchtlichen Mengen bilden. Die Gasbildung kann zu einem Druckaufbau und bei beschränkter Dichtheit der Endlagerbarrieren zu einer Ausbreitung der Gase führen (vgl. auch Kap. 4.3.1). Wenn in einem Endlager Wirtsgestein oder technische Barrieren mit Flüssigkeit gesättigt sind, können sich die Gase über Zweiphasenströmungen im Endlagersystem und in der Geosphäre ausbreiten. Zweiphasenströmungen können außerdem als Folge der Austrocknung des Wirtsgesteins durch die

Bewetterung während des Betriebes und der späteren Wiederaufsättigung nach dem Verschuß auftreten. Im Vergleich zu reinen Einphasenströmungen ist die Modellierung solcher Strömungsvorgänge sowohl unter mathematischen als auch physikalischen Aspekten erheblich kompliziert, weil zum einen stark nichtlineare, gekoppelte Gleichungssysteme zu lösen sind und zum anderen temperatur- und druckabhängige Sättigungs-, Entsättigungseffekte und Phasenübergänge und ggf. noch weitere Effekte zu berücksichtigen sind. Es ist daher notwendig, die potentiellen Auswirkungen der Gasbildung und des Gastransports auf das Verhalten der einzelnen Barrieren zu untersuchen und ihre Bedeutung für die Endlagersicherheit wirtsgesteins- und konzeptspezifisch zu bewerten.

3.7.1 Stand des Wissens zu Gasmigration und Zweiphasenfluß

Seit einigen Jahren wurden bzw. werden auf internationaler Ebene zum Teil mit der Unterstützung der Kommission der Europäischen Union in verschiedenen nationalen Programmen eine Reihe von FuE-Programmen mit dem Ziel durchgeführt, die komplexen Vorgänge und Zusammenhänge bei den Zweiphasenströmungen zu verstehen und ihre Bedeutung für die Sicherheitsnachweise zu bewerten. Diese Arbeiten haben zu einer beträchtlichen Verbesserung des Verständnisses der relevanten Prozesse und Verbreiterung der experimentellen Datenbasis geführt, woraus sich die Notwendigkeit für eine Bestandsaufnahme des erreichten Wissens ergab. Dieses Ziel wurde mit dem internationalen Statusbericht [58], der gemeinsam von Experten aus Belgien, Deutschland, Großbritannien, Spanien und den USA unter der Schirmherrschaft der EU und der OECD/NEA erarbeitet wurde, erreicht.

Der Statusbericht enthält eine zusammenfassende Darstellung der bis Januar 1999 publizierten Arbeiten zum Themenkomplex der Gasausbreitung und der Zweiphasenströmungen in Endlagersystemen in unterschiedlichen geologischen Formationen. Zusätzlich werden die bisher erstellten konzeptuellen und physikalischen Modelle und ihre gegenseitige Kopplung identifiziert. Außerdem enthält der Bericht eine Bewertung des aktuellen Stands der Modellierung und der Konsequenzen, die eine Gasbildung im Endlager haben kann. Schließlich werden die noch ungelösten Probleme aufgeführt und Empfehlungen für zukünftige FuE-Arbeiten gegeben.

Viele der auftretenden Phänomene hängen unmittelbar mit der betrachteten geologischen Formation zusammen, in der das Endlager eingerichtet wird. Insofern wurden die einzelnen Fragestellungen jeweils getrennt für die Wirtsgesteinskategorien

- wassergesättigte, geklüftete Festgesteine,
- ungesättigte geklüftete Festgesteine,
- Tone,
- Schieferton und
- Steinsalz

behandelt. Thematisch werden die verschiedenen Endlagerkonzepte für HLW und LLW/ILW abgehandelt und vor dem Hintergrund einer möglichen Gasbildung bewertet.

3.7.1.1 Tonbarrieren

Für Tone wie z.B. Bentonit, die als Baumaterialien für geotechnische Barrieren oder zur direkten Einbettung der Abfallgebinde bei Einlagerung ("Bentonite-Buffer") in Betracht kommen, liegen umfangreiche Ergebnisse aus Permeabilitätsmessungen vor. Sie lassen darauf schließen, daß feuchtesättigte Tone derart hohe Sperrdrücke für Gase entwickeln, daß Zweiphasenflüsse, die mit einer Verdrängung der Flüssigkeit verbunden sind, nicht möglich sind. Dieses wird durch die extrem niedrigen Partikelabstände in derartigen Materialien erklärt. Die beobachteten Sperrdrücke werden als Summe des äußeren Flüssigkeitsdrucks und des Bentonit-Schwelldrucks interpretiert. Die hohen Eindringdrücke für vorkompaktierten Bentonit ergeben sich daher aus den großen Schwelldrücken, die bei diesem Material beobachtet werden.

Die Meßergebnisse mit kontrolliertem, durchflußgeregeltem Gasfluß durch frisch eingebautes gequollenes Material werden mit einer druckinduzierten Dilatation analog dem Hydrofracturing erklärt, bei der das Gas als einzelne Phase durch ein Netzwerk aus miteinander verknüpften Rissen strömt, die sich unter den hohen aufgebrauchten Drücken gebildet haben. Bei diesem Durchflußmechanismus ist die Wasseraufnahme des Gases sehr gering, so daß das Material kaum austrocknet. Wenn der Gasstrom unterbrochen wird, fällt der Druck auf einen endlichen Schwellenwert ab, und nach dem Wiedereinset-

zen ergibt sich ein Sperrdruck, der signifikant niedriger als der von frischem Material ist. Dieser Unterschied ist durch zurückgebliebene gasgefüllte Poren entlang der anfänglichen Strömungspfade erklärbar; jedoch ist der Strömungsmechanismus im Druckbereich zwischen dem Schwellenwert und dem anfänglichen Sperrdruck noch ungeklärt.

Mit dem konzeptuellen Modell des Gastransports durch druckinduzierte Mikrorisse lassen sich zwar die experimentellen Ergebnisse für anfänglich gesättigte Tone am besten beschreiben, aber die Diskussion darüber, welcher der geeignetste Ansatz für die Modellierung ist, ist noch nicht abgeschlossen. Vor allem ist die Kenntnis über die Anzahl, Größe und räumliche Verteilung der Wegsamkeiten für die Gasausbreitung und die Dilation bei einer Gasinjektion noch unzureichend. Die experimentellen Ergebnisse werden als Auflockerung der Proben durch die Gasinjektion interpretiert. Obwohl dies mit der Vorstellung im Einklang steht, daß sich ein Netzwerk von Wegsamkeiten für Gase ausbildet, läßt sich die Strömung nicht als unmittelbare Verdrängung des Porenwassers beschreiben, wie sie nach gängiger Meinung der Bodenmechanik ablaufen sollte. Wenn die Annahme richtig ist, daß die Gasimprägnation nur in Auflockerungsrissen erfolgt, stellt sich die Frage, wie weit der beobachtete Gastransport durch die experimentellen Randbedingungen beeinflusst wurde.

Die numerischen Modellierungen gehen vielfach von der Annahme aus, daß isotherme Bedingungen vorliegen und daß die Tone zu Beginn der Gasströmung vollständig hydratisiert und wassergesättigt sind. Entsprechend eingestellt waren auch die Randbedingungen in den meisten Experimenten. Wegen ihrer vermutlich großen Bedeutung sollten Temperatur- und Wiederaufsättigungseffekte Schwerpunkt der zukünftigen Untersuchungen sein. Der Vergleich der Gastransportmechanismen in Bentonit-Buffern, Tongesteinen und Schiefertönen läßt noch keine Aussage darüber zu, ob die Gasausbreitung in den drei Medien nach denselben Mechanismen abläuft.

3.7.1.2 Zementbarrieren

Verglichen mit Tonen entspricht Zementstein eher einem idealen porösen Medium, da die Porenstruktur in einer festen Phase relativ starr ist. Da Wasser die Struktur der Calciumsilikat-Hydrate im Zement wesentlich bestimmt, haben Trocknung oder Aufsättigung

einen entsprechenden Einfluß auf seine Permeabilität. Dies ist auch die Ursache dafür, daß sich die Einphasen-Permeabilitäten bei Durchströmung mit Wasser und Gas unterscheiden.

Die Permeabilität des Zementsteins ist stark von der Zusammensetzung und den Bedingungen bei der Aushärtung abhängig und liegt in einem weiten Bereich zwischen 10^{-20} bis 10^{-12} m^2 . Es ist möglich, über entsprechende Rezepturen die Permeabilität kontrolliert einzustellen, um das Entweichen von Korrosionsgasen zu erleichtern. Es besteht jedoch ein direkter Zusammenhang zwischen den permeabilitätsbestimmenden Größen Porosität und Porenstruktur und der Festigkeit, so daß eine hohe Permeabilität bei gleichzeitig hoher Festigkeit nicht erzielt werden kann. Wegen der großen Bandbreiten wird empfohlen, die für sicherheitsanalytische Modelle erforderlichen Daten direkt an den in Frage kommenden Materialien zu bestimmen.

Die meisten der bisher publizierten Daten beziehen sich auf Anwendungen im Bereich des konventionellen Bauwesens, d.h. unter trockenen Bedingungen. Dagegen sind an ganz- oder teilgesättigten Zementsteinen noch keine detaillierten Untersuchungen durchgeführt worden. Messungen des Kapillardrucks in Abhängigkeit von der Sättigung liegen offenbar noch nicht vor. Das beobachtete Verhalten von Zweiphasenströmungen in Zementwerkstoffen wird im allgemeinen durch konventionelle Modelle beschrieben, wie z.B. dem von Brooks-Corey für die relative Permeabilität. Die Gültigkeit der Kontinuumsmodelle zur Beschreibung von Zweiphasenflüssen wird in der Regel unterstellt; es wurde aber noch nicht nachgewiesen, daß diese Annahme richtig ist.

3.7.1.3 Gastransport und Zweiphasenströmungen in der Geosphäre

Nach heutigem Kenntnisstand kann davon ausgegangen werden, daß Zweiphasenströmungen sowohl in gesättigten als auch ungesättigten **geklüfteten Festgesteinen** prinzipiell mit den vielfach für poröse Medien angewendeten Modellen beschreibbar sind. Die Modellierung wird dadurch vereinfacht, daß Verformungen der Gesteinsmatrix - im Gegensatz zum Salz und vermutlich auch zum Ton - keine Rolle spielen und unberücksichtigt bleiben können.

Als bisher noch ungelöste Frage wird angesehen, wie groß ein Elementarvolumen in den Modellen anzunehmen ist, mit dem ein für das jeweilige Gestein repräsentatives Kluftnetzwerk hinreichend beschrieben wird. Auch ist festzustellen, daß es noch keine konzeptuellen Modelle gibt, mit denen makro- und mikroskopische Vorgänge in ihrer wechselseitigen Abhängigkeit erfaßt werden können. Offen sind z.T. auch die Meßverfahren zur Bestimmung der Zweiphasenflußparameter in Kluftnetzwerken.

Die Ausbreitung von Gasen in **Tonsteinen** erfolgt grundsätzlich in derselben Weise wie durch kompaktierten Ton in geotechnischen Barrieren, d.h. es gibt einen Schwellenwert für den Gasdruck, oberhalb dessen Wegsamkeiten durch Dilatationen im Porenraum entstehen. Für Sicherheitsnachweise müssen quantitative Aussagen zu folgenden Punkten bekannt sein:

- der Minimaldruck für das Auftreten eines Gasstromes,
- Wechselwirkungen zwischen Gas und Ton, wie z.B. Trocknung oder chemische Reaktionen,
- das Ausheilen von Rissen nach einer Durchströmung mit Gas,
- die Wirkungen von Heterogenitäten und Anisotropien auf das Verhalten des Tons.

Die Anzahl der publizierten Daten zum Zweiphasenfluß in Tonsteinen ist im Vergleich zu den anderen Wirtsgesteinen am niedrigsten. Tonsteine nehmen im Hinblick auf ihre Gasdurchlässigkeit eine Mittelstellung zwischen plastischen Tonen und geklüfteten Festgesteinen ein, wobei noch diskutiert wird, ob ihr Verhalten eher das von plastischen Tonen oder brüchigen Gesteinen widerspiegelt. Wenn ein wassergesättigter Schiefer-ton keine natürlichen Heterogenitäten enthält, über die der Gastransport möglich ist, ist dieses Material wegen der extrem niedrigen Partikelabstände - ähnlich wie plastischer Ton und kompaktierter Bentonit - praktisch solange undurchlässig, bis durch einen ansteigenden Gasdruck Risse induziert werden.

Demgegenüber besitzen **Salzgesteine** eine Reihe weiterer materialspezifischer Eigenschaften, die bei der Gasausbreitung eine Rolle spielen können. Die Gasbildung ist wegen der Wasserundurchlässigkeit und der niedrigen Feuchtegehalte in einem Endlager im Steinsalz unter ungestörten Bedingungen vergleichsweise sehr niedrig. Möglich ist ein zeitlich begrenzter Gastransport durch Auflockerungszonen im Gebirge oder durch Salz-

grus, der als Hohlraumversatz oder als Baumaterial für Strecken- und Schachtverschlüsse verwendet werden kann. Dieser Transport dauert so lange an, bis der Salzgrus durch die Gebirgskonvergenz kompaktiert und wieder die Dichte des ungestörten Gebirges erreicht.

Eine hinreichend genaue Beschreibung von Zweiphasenströmungen in kompaktiertem Salzgrus erscheint aus heutiger Sicht grundsätzlich mit den konventionellen Konzepten möglich. Bei der Modellierung des Gastransports durch geringpermeablen, verdichteten Salzgrus können Gleitströmungsanteile durch eine Klinkenberg-Korrektur quantitativ berücksichtigt werden. Die eigentlichen Probleme bei der Modellierung ergeben sich aus einer stark nichtlinearen Abhängigkeit der Strömungsparameter Permeabilität, Porosität und Kapillardruck von der Kompaktion des Salzgruses. Daneben besteht auch eine enge Kopplung zwischen Fluidrücken und Kompaktionsverhalten. Bei Laugenzutritt sind darüberhinaus die Lösungs- und Umlösungseffekte im Steinsalz zu berücksichtigen.

In gesättigten geologischen Formationen kann die Löslichkeit der Gase in Wasser eine bedeutende Rolle spielen. Ihre Berücksichtigung setzt die Kenntnis entsprechender Daten voraus, wie die effektiven Diffusionskoeffizienten für die in der Wasserphase des Wirtsgesteins gelösten Gasspezies, die Grundwasser-Strömungsgeschwindigkeit und die Gasbildungsraten. Für die meisten der betrachteten Szenarien muß aber davon ausgegangen werden, daß die Lösungskapazität des Grundwassers nicht zur vollständigen Aufnahme der im Endlager gebildeten Gase ausreicht und sich freie Gasphasen ausbilden.

3.7.1.4 Ansätze zur Modellierung von Gastransport und Zweiphasenströmungen

Die bisher durchgeführten Modellierungen des Gastransports und der Zweiphasenströmungen basieren größtenteils auf dem geläufigen klassischen Continuum Approach für poröse Medien. Dieser stellt eine Erweiterung des Darcyschen Gesetzes dar, in der die Zweiphaseneffekte durch Einbeziehung der Funktionen für Kapillardruck und relative Permeabilität beschrieben werden. Ein wesentlicher Grund für die Bevorzugung dieses Modellansatzes besteht darin, daß dieser gegenwärtig der einzige ist, mit dem sich einigermaßen detaillierte Berechnungen für größere Gebiete durchführen lassen. Für

Modellierungen des Zweiphasenflusses in geklüfteten Gesteinen wird der klassische Continuum Approach derart erweitert, daß die Gesteinsmatrix und die Risse getrennt durch mittlere Porositäten bzw. Permeabilitäten beschrieben werden ("Dual Porosity" und "Dual Permeability Model").

Die Beschreibung der Zweiphasenflüsse von Gas und Lauge in einem Endlager im Salinar mit dem Continuum Approach bedingt einen relativ hohen Aufwand zur Entwicklung salzspezifischer Spezialmodelle, weil hier die Lösungs- und Umlösungsprozesse von Salz und Wasser berücksichtigt werden müssen. Dabei müssen die komplexen Phasenverhältnisse zwischen festem Salz, Lauge und Gas modelliert werden, wobei im Fall der wärmeerzeugenden Abfälle auch noch die Temperaturabhängigkeiten zu berücksichtigen sind. Hinzu kommt, daß der Salzgrusversatz durch die Gebirgskonvergenz kompaktiert wird, wodurch seine Porosität und absolute Permeabilität abnehmen sowie die Kapillardruck-Sättigungsbeziehung und die sättigungsabhängige relative Permeabilität verändert werden. Insofern ist die Entwicklung gekoppelter Modelle, mit denen die Möglichkeit des Continuum Approach zur Einbeziehung dieser Effekte erweitert wird, ein Thema aktueller Forschung.

Mit zunehmendem Verständnis der Zweiphasenströmungen und ihren Abhängigkeiten von der Endlagerentwicklung traten auch die Grenzen des Continuum Approach für derartige Modellierungen klarer hervor. Der Continuum Approach wird insbesondere dann ungeeignet, wenn die Diskretisierung eines numerischen Modells gröber ist als die der Teilbereiche, für die Eigenschaften und ablaufende Prozesse durch Mittelwerte hinreichend genau wiedergegeben werden können. Dieses hat sich beispielsweise bei der Beschreibung von Wasser-Eindringen in ungesättigtes Gestein oder von Wegsamkeiten-Bildung gezeigt. Die Ursachen für die beschränkte Anwendbarkeit des Continuum Approach sind physikalischer und mathematischer Natur und werden in dem Status Report eingehend behandelt. Aus diesen Einschränkungen folgt aber nicht zwangsläufig, daß sich für diese Fälle kein angemessenes makroskaliges Modell entwickeln läßt. Ein solches würde sich aber von den konventionellen Zweiphasenmodellen unterscheiden und eventuell phänomenologisch begründet sein.

Der konventionelle Continuum Approach ist auch dann ungeeignet, wenn er unvollständig ist, d.h. wenn in der Realität Prozesse ablaufen, die nicht in dem zugrundeliegenden konzeptuellen Modell enthalten sind. Zu diesen Prozessen zählt beispielsweise ein Wassertransport in Form mit der Gasströmung mitgerissener Blasen. Für solche Prozesse werden andere Modellansätze verfolgt, die u.a. Kluft-Netzwerkmodelle, die Integration der numerischen Untersuchungen des Zweiphasenflusses in Einzelrissen, salzspezifische Transportphänomene und schließlich besondere Ansätze zur Behandlung spezifischer Effekte in ungesättigten Formationen umfassen. Diese Modellansätze helfen aber, ein grundlegendes Verständnis für die Zweiphasenfluß-Vorgänge zu entwickeln und Experimente zu interpretieren. Für den direkten Gebrauch in Sicherheitsanalysen sind sie jedoch noch nicht geeignet.

3.7.1.5 Vertrauensbildung in die Modelle

Die Vertrauensbildung in die Modelle des Gastransports und der Zweiphasenströmungen ist eine Aufgabe, die sich für alle betrachteten Wirtsformationen gleichermaßen stellt. Ein erster Schritt ist, aufzuzeigen, daß die ablaufenden Prozesse vollständig verstanden und die Ergebnisse aus Simulationen und Experimenten in einfachen Fällen kompatibel sind. Solche einfachen, in der Regel kleinskaligen Experimente laufen mit klar definierten Parametern unter kontrollierten Bedingungen ab und liefern Daten, die mit den Ergebnissen von entsprechend skalierten Simulationsrechnungen verglichen werden können.

Für die Modelle, die in Sicherheitsanalysen verwendet werden, muß eine Vertrauensbildung erreicht werden, die auch den Größenmaßstab von Endlagersystemen miteinschließt. Da Experimente dieser Größe weit über den Labormaßstab hinausgehen, ergibt sich das Problem der Übertragbarkeit auf realistische Maßstäbe. Daher müssen Möglichkeiten gesucht und genutzt werden, in Feldversuchen Daten zu ermitteln, die sich mit den Ergebnissen von Simulationsrechnungen vergleichen lassen. Solche Daten können entweder mit oberirdisch durchgeführten Untersuchungen oder in Untertagelabors ermittelt werden. Dabei besteht das grundsätzliche Problem, das natürliche System ausreichend genau zu charakterisieren. Was bleibt ist eine nicht geringe Unsicherheit bezüglich der Parameterwerte und der Randbedingungen, die bei der Modellsimulation von Experimenten verwendet werden.

In Anbetracht dieser grundsätzlichen Schwierigkeit wurde versucht, Daten aus anderen Bereichen, in denen eine Gasmigration stattfindet, zu gewinnen, so z.B. aus natürlichen Analoga oder von existierenden anthropogenen Systemen. Daraus konnten in einigen Fällen Datensätze abgeleitet werden, deren Qualität aber ebenfalls nicht für eine zufriedenstellende Modellierung ausreichte. Bei den natürlichen Analoga waren vor allem die Beschreibung des Gebirges, die Quellterme und die Randbedingungen mit großen Unsicherheiten behaftet. Dennoch können aus der Betrachtung solcher Systeme bzw. Analoga Informationen gewonnen werden, die sich für die Vertrauensbildung bei der Übertragung der Modelle auf reale Maßstäbe heranziehen lassen. Werden damit Modellsimulationen durchgeführt, deren Ergebnisse wenigstens teilweise konsistent mit den natürlichen Analoga sind und zeigen, daß die wichtigsten Strömungsprozesse hinreichend verstanden sind, wird das Vertrauen in das Modell mehr oder weniger stark untermauert. Das Vertrauen steigt, je mehr Daten aus verschiedenen, unabhängigen Quellen einbezogen werden.

3.7.2 Mögliche Auswirkungen auf die Entwicklung von Endlagersystemen

Ein wesentlicher Teil des Status Reports enthält eine Zusammenfassung darüber, wie Gastransport und Zweiphasenströmungen in Sicherheitsanalysen für Endlager bisher berücksichtigt wurden. Dazu wird zum einen eine Übersicht über 14 verschiedene publizierte Sicherheitsanalysen, und zum anderen eine generische Analyse über die möglichen Auswirkungen in verschiedenen Endlagerkonzepten gegeben. Die betrachteten Wirtsgesteine, Abfallkategorien und Endlagerkonzepte sind in Tabelle 3.2. aufgelistet.

Tabelle 3.2: Betrachtete Endlagerkonzepte

Wirtsgestein	Abfallkategorie	Behältermaterial	Versatz	Verschlusmaterial
Kluftgestein	LLW/ILW	Stahl/Beton	Flüssigzement	Bentonit/Sand
Kluftgestein	Abgebrannter Brennstoff	Kupfer	Bentonit	nicht festgelegt
Tuff	Abgebrannter Brennstoff	Stahl	kein	nicht festgelegt
Ton Schieferton	LLW/ILW	C-Stahl	Flüssigzement	nicht festgelegt

Tabelle 3.2: Betrachtete Endlagerkonzepte

Wirtsgestein	Abfallkategorie	Behältermaterial	Versatz	Verschlußmaterial
Ton Schieferon	Abgebrannter Brennstoff/HLW	Edelstahl	Bentonit	nicht festgelegt
Salz	Abgebrannter Brennstoff	Stahl	Salzgrus	Bentonit Bitumen
Salz	HLW-Glas	Stahl	Salzgrus	Bentonit Bitumen

In den folgenden Unterkapiteln werden die wichtigsten Aussagen zum Gastransport und Zweiphasenfluß für die verschiedenen generischen Endlagerkonzepte dargestellt. Dabei wird nicht auf die Studien zum Tuff eingegangen, da diese sehr spezifisch für das Endlager in Yucca Mountain sind.

3.7.2.1 Abgebrannte Brennelemente und HLW in Steinsalz

Für abgebrannte Brennelemente wird die Streckenlagerung unter Verwendung doppelwandiger Behälter aus rostfreiem Stahl und der Versatz der Resthohlräume mit Salzgrus favorisiert. Die Endlagerung von verglastem HLW in Edelstahlkokillen erfolgt dagegen in tiefen, vertikalen Bohrlöchern. Die Bohrlöcher werden mit Salzgrus versetzt und mit einem Salzgrus-Pfropfen gegenüber der Grubenatmosphäre abgeschlossen.

Bei geringer Behälterabschirmung ist eine gewisse radiolytische Gasbildung zu erwarten, wogegen dickwandige Behälter ein im Vergleich größeres Potential für die Bildung von Korrosionswasserstoff besitzen. Beide Gasbildungsmechanismen erfordern Feuchtigkeit, die aber im Salzgestein unter ungestörten Bedingungen sehr niedrig ist. Dadurch wird das Feuchteangebot zum bestimmenden Parameter für die Gasbildung bzw. die Gasbildungsraten.

Bei einem Laugenzutritt dagegen ist - neben anderen physikalisch/chemischen Eigenschaften - vor allem der Laugentyp für die Gasbildung bestimmend. Möglicherweise führt eine erhöhte Gasbildung bei der Streckenlagerung zu einem Druckaufbau, durch den die Lauge verdrängt wird und die Gasbildung wieder zurückgeht. Für die Bohrlochlagerung

zeigen die Modellrechnungen, daß sich Gas- und Flüssigphase infolge der vertikalen Orientierung der Bohrlöcher schnell trennen. Dadurch können nur flüchtige Radionuklide durch den Bohrlochverschluß hindurchtreten. Nur bei sehr hohen Laugenzuflüssen kann der Fall eintreten, daß das gebildete Gas kontaminierte Lauge aus dem Bohrloch auspreßt. Die Höhe, bis zu der Gasdruck bei einem Laugenzufluß ansteigt, und die mit der Laugenverdrängung gekoppelte Ausbreitung der Gase werden gegenwärtig in Modellrechnungen untersucht. Die Ergebnisse hängen stark von den Auslegungsparametern und den unterstellten Szenarien ab.

Bei der Modellierung müssen die rheologischen Eigenschaften des Salzes berücksichtigt werden, die eine Ausheilung von Rissen bewirken. Entsprechend gilt für Salzversatz, daß alle Hohlräume einschließlich der Porosität des Versatzmaterials und gefördert durch die Gebirgskonvergenz verschwinden. Der Aufbau eines deutlichen Gasdrucks kann allerdings die Konvergenz verringern. Die Kopplung der gegenläufigen Effekte Konvergenz, Gasbildung und Zweiphasenfluß macht die Modellierung dieser Vorgänge verhältnismäßig kompliziert. Dazu kommt eine starke Nichtlinearität der beschreibenden Gleichungen. Zusätzliche Effekte ergeben sich aus der Löslichkeit des Wirtsgesteins und die zu berücksichtigenden Umlösungsprozesse, durch die auch die Zusammensetzung der Lauge verändert werden kann. Die Löslichkeit wird durch die Temperatur- und Druckgradienten mitbeeinflusst und kann außerdem die Transportkenngrößen des Salzes im Endlagerbereich ändern.

Nach heutigem Kenntnistand ist der Druckaufbau unter ungestörten Bedingungen gering und stellt kein Problem für die Auslegung des Endlagers und den Sicherheitsnachweis dar. Die Programme zur Modellierung der komplexen gekoppelten Vorgänge bei einem Laugenzutritt sind dagegen noch in der Entwicklung und Prüfung.

3.7.2.2 LLW/ILW in Kluftgestein

Bei der anaeroben Korrosion von eingelagerten Metallen und der mikrobiellen Zersetzung von organischen Abfallbestandteilen entstehen erhebliche Gasmengen, die zur Bildung einer freien Gasphase führen und aus dem Endlager entweichen. Trotz der vorher aufgeführten Problemstellungen mit dem Zweiphasenfluß in Zementsteinen scheint es

grundsätzlich möglich, zementartigen Versatz zu verwenden, dessen Permeabilität ausreicht, um die gebildeten Gase aus dem Nahbereich abströmen zu lassen. In diesem Zusammenhang ergeben sich für das Nahfeld zwei Fragestellungen, deren Klärung als vorrangig angesehen wird:

- In welchem Umfang wird das gebildete CO₂ durch Karbonatbildung bei Reaktionen mit dem Versatz verbraucht
- Werden durch die Gasbildung Wegsamkeiten im angrenzenden Gebirge geschaffen, über die Grundwasser bzw. gelöste Schadstoffe bei Umgehung der geotechnischen Barrieren transportiert werden kann.

Der Gastransport aus dem Endlager wird ohne Aufbau kritischer Überdrücke ablaufen, weil weder die Permeabilitäten noch die Kapillardrücke im Wirtsgestein ein Hindernis für den Gastransport bei den erwarteten Gasbildungsraten darstellen. Wie in Kap. 3.7.1.3 ausgeführt, bestehen Unsicherheiten bei der funktionalen Beschreibung der relativen Permeabilitäten für Kluftgesteine. Wenn die Kopplung zwischen der Gas- und Wasserphase die Modifizierung der bisher verwendeten Ansätze erforderlich macht, müssen eventuell die Vorstellungen über den Druckaufbau revidiert werden.

Die größte Unsicherheit besteht in der Tatsache, daß nicht hinreichend bekannt ist, in welchem Maße das gebildete Gas die Grundwasserbewegungen und damit den Radionuklidtransport beeinflussen kann. Deutliche Kluftweiten und niedrige Kapillardrücke in kristallinen Gesteinen können der Ausbildung von Gaspolstern und dem Auspressen von kontaminiertem Wasser entgegenstehen. Zwei andere Mechanismen zur Beeinflussung der Grundwasserbewegungen bedürfen dagegen noch weiterer Untersuchungen:

- Instabilitäten im Gasstrom durch die Klüfte können Grundwasserbewegungen verursachen, wenn Gasströmungskanäle verschwinden bzw. sich neu bilden.
- Wenn der Gastransport ganz oder teilweise durch die Bewegung kleiner Blasen erfolgt, kann Grundwasser mitgerissen werden. In diesem Fall können auch Schadstoffe, die sich an den Phasengrenzen akkumuliert haben, mittransportiert werden.

Ein weiterer wichtiger Prozeß bei diesem Endlagertyp ist die Freisetzung radioaktiver Gase, wie $^{14}\text{CH}_4$, ^3H und ^{222}Rn , aus den Abfällen. Diese Gase werden mit dem ebenfalls gebildeten inaktivem Wasserstoff und Methan in die Biosphäre transportiert. Dazu kommt eventuell noch Radon aus dem Gestein, da vor allem Kristallingesteine deutliche Uran- und Radiumgehalte aufweisen können, bei deren Zerfall kontinuierlich neues Radon entsteht. Ort und Zeitpunkt des Austritts dieser Schadstoffe werden durch den Gas-transport bestimmt. Bei langen Transportzeiten können Radon (HWZ 3,8 d) und eventuell Tritium (HWZ 12,3 a) im Gegensatz zu Radiokohlenstoff (HWZ 5730 a) bereits vor Eintritt in die Atmosphäre zerfallen sein. Die aus der Freisetzung der radioaktiven Gase resultierende potentielle Strahlenexposition ist ggf. in einer Gesamtanalyse zu berücksichtigen.

Prognosen zum Austrittsort und -zeitpunkt der Gase sind grundsätzlich schwierig, da beide durch Einzelheiten der Wirtsgesteinsstruktur beeinflußt werden, die im allgemeinen nicht bekannt sind. Daher wird in einigen Fällen unterstellt, daß das Gas sofort nach Entstehung an der Oberfläche austritt. Für eine Bewertung der radiologischen Sicherheit kann es angezeigt sein, plausible Abschätzungen über die Fläche zu machen, über die sich der Gasaustritt verteilt. Wasserstoff und Methan können mit der Umgebungsluft explosive Gemische bilden, wenn sie entsprechend konzentriert sind. Dies wird in der freien Atmosphäre aber nicht als Sicherheitsproblem angesehen.

3.7.2.3 Abgebrannte Brennelemente in Kluffgesteinen

Im Vergleich zu LLW/ILW ist die Gasentwicklung bei der direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente niedrig. Behälter mit Kupferummantelung korrodieren in dem erwarteten chemischen Milieu sehr langsam. Entsprechend sind die Gasbildungsraten sehr gering. Größere Gasmengen werden nur gebildet, wenn Wasser - etwa infolge eines herstellungsbedingten Defekts - in die Behälter eintritt und eine anaerobe Korrosion der darin enthaltenen Eisenwerkstoffe ermöglicht. Bei Behältern aus C-Stahl, sind die Gasbildungsraten auch unter ungestörten Bedingungen höher. Die Kluffgesteine, die für derartige Endlager in Frage kommen, sind generell in der Lage, die geringen Gasmengen ohne nennenswerten Druckaufbau aufzunehmen. Ein Teil der gebildeten Gase kann auch in dem vorhandenen Wasser gelöst und wegtransportiert werden. Für dieses Konzept müssen nur die Transportmechanismen näher untersucht werden, bei denen aufwärts-

strömendes Gas Wasser und eventuell Radionuklide mitnimmt, oder sich die an den Gas/Wasser-Phasengrenzen bzw. freien Bentonitpartikeln adsorbierten Radionuklide mit diesen ausbreiten.

Im Nahfeld stellt Bentonit die wesentliche Barriere für die Gasausbreitung dar. Nach experimentellen Ergebnissen ist der Gas-Eintrittsdruck für gesättigte, weiche Tone beträchtlich. Bei Aufbau eines hohen Druckes wird ein gesättigter Ton - möglicherweise durch Mikrorißbildung - aufgelockert. Sofern sämtliches Gas, das in den Ton eingedrungen ist, in diesem Dilatanzvolumen gespeichert wird, stellt sich die Frage nach der Übertragbarkeit der experimentellen Erkenntnisse mit ihren Randbedingungen auf ein reales System. Gegenstand weiterer Untersuchungen sind

- eventuelle Beeinflussungen des Langzeitverhaltens von Bentonit durch Gasdruck und Gastransport einschließlich der Rißausheilung und
- mögliche Wechselwirkungen zwischen Gasstrom und den Radionukliden, die im Porenwasser gelöst sind.

In neueren Experimenten wurden derartige Rißausheilungsvorgänge beobachtet, allerdings ist der Mechanismus dafür noch nicht verstanden. Es ist auch zu berücksichtigen, daß durch die Wärmeproduktion der Abfälle gekoppelte thermo-hydro-mechanische Vorgänge ausgelöst werden. Dabei ist davon auszugehen, daß der Bentonit in der Kontaktzone zum Abfall zunächst dehydratisiert und entsättigt wird und diese Änderungen nach dem Abklingen der Wärmeproduktion wieder verschwinden. Bei einer Wiederaufsättigung können sich Schwelldrücke aufbauen. Daneben können Gas- und Dampftransportvorgänge eine Rolle spielen.

3.7.2.4 Abgebrannte Brennelemente und HLW in Tonstein und Schiefertone

Die Korrosionsraten der bei diesem Konzept betrachteten Edelstahlbehälter sind so niedrig, daß sich keine freie Gasphase ausbildet. Nur unter sehr konservativen Annahmen über die Gasbildungsraten ist von der Bildung einer Gasphase auszugehen. Im Fall des HLW ergeben sich auch dafür keine Drücke, die den Gebirgsdruck übersteigen. Im Fall der direkten Endlagerung mit wesentlich größeren Stahlbehältern kann eine erhöhte

Gasbildung mit Überschreitung des Gebirgsdrucks und Bildung von Wegsamkeiten nicht ausgeschlossen werden. Letztere ermöglichen eine Gasausbreitung in der Endlagerformation

Durch die Wärmeleistung der Abfälle kann sich an der Kontaktfläche zum Bentonit eine Temperatur von maximal 130°C einstellen. Durch den größeren Actinoidengehalt dauert die Wärmeabgabe der abgebrannten Brennelemente erheblich länger an als bei HLW. In diesem Temperaturniveau können einzelne Eigenschaften des Bentonits, insbesondere seine Durchlässigkeit, verändert und Wasser/Dampf-Phasenübergänge mit anschließender Dampfströmung erzeugt werden. Die Entstehung einer Dampfphase im gesättigten Bentonit ist nicht möglich, da der Siedepunkt von Wasser in größeren Teufen und bei entsprechendem hydrostatischen Druck bei 150-200°C liegt. In ungesättigtem Bentonit sind die Verhältnisse schon bei erheblich geringeren Temperaturen anders. Siedevorgänge können im Nahbereich dazu führen, daß sich 1. Strömungskanäle ausbilden, über die später die Korrosionsgase abströmen, 2. die Wärmeleitfähigkeiten verringert werden und 3. zyklische Verdampfung und Kondensationsvorgänge ablaufen. Durch letztere wird die Gasbildungsrate erhöht, und es können sich Strömungskanäle ausbilden, die Gasströmungen in die Geosphäre begünstigen.

3.7.2.5 ILW in Tonformationen

Bei der Endlagerung von ILW in Tonformationen werden Gase durch anaerobe Korrosion, Radiolyse und mikrobielle Zersetzung gebildet. Dementsprechend hängt die Gasbildungsrate vom Metallinventar, der Art der Abfallmatrix und vom lokalen Wasserangebot ab. Unter entsprechenden Randbedingungen können sich Gasdrücke aufbauen, die den Gebirgsdruck übersteigen, Risse im Wirtsgestein verursachen und dadurch Wegsamkeiten für die Ausbreitung dieser Gase schaffen.

Der Prozeß der Wiederaufsättigung läuft wegen der niedrigen Permeabilität des Wirtsgesteins langsam ab und begrenzt dadurch die vom Wasserangebot abhängige Gasbildung durch anaerobe Korrosion und mikrobielle Zersetzung. Es wird davon ausgegangen, daß sich das gebildete Gas entweder über die Auflockerungszone (EDZ) im Gebirge, durch Heterogenitäten im Gestein mit erhöhter Permeabilität oder durch Risse, die durch

den Gasdruck gebildet wurden, ausbreitet. Diese Vorgänge sind aber noch nicht im einzelnen verstanden, und es sind auch noch keine Modelle und Daten zu deren Beschreibung verfügbar.

Wenn durch die Gasbildung am Anfang der Nachbetriebsphase Risse im Wirtsgestein gebildet werden, bedeutet dieses eine Schädigung der natürlichen Gesteinsbarriere. Ob sich diese Schädigung später auf die Ausbreitung der Radionuklide auf dem Wasserpfad auswirkt, hängt davon ab, wie weit diese später wieder verschlossen werden, nachdem die Gasbildung beendet ist. Neuere Untersuchungsergebnisse aus In-situ-Versuchen haben gezeigt, daß die Rißausheilung offenbar relativ schnell erfolgt.

Gasmigration und Zweiphasenfluß	
Tone und Tonformationen	
Kenntnisstand	<ul style="list-style-type: none"> - Gastransport erfolgt im aufgesättigtem Zustand über druckinduzierte Mikrorisse. Eine Beschreibung ausschließlich über Zweiphasenflußmodelle ist deshalb nicht sinnvoll. - Es ist noch unklar, ob der Gastransport in Tongesteinen nach demselben Mechanismus wie im Bentonit abläuft.
Relevanz	gering, falls die Mikrorißbildung reversibel ist. Die Reversibilität ist aber noch nicht abgesichert.
Empfehlungen für weitere FuE	Untersuchung von: <ul style="list-style-type: none"> - Mechanismen der Mikrorißbildung/-ausheilung sowie der Auswirkung auf das Durchlässigkeitsverhalten von Tonstein und Bentonit (THM). - Wechselwirkungen zwischen Gasstrom und im Wasser gelösten Radionukliden.
Zement	
Kenntnisstand	<ul style="list-style-type: none"> - Beschreibung des Gastransports über Zweiphasenflußmodell scheint möglich. - Einzelne Meßreihen existieren bereits. Die Datenlage insbesondere für verschiedene Sättigungszustände ist allerdings noch unzureichend.
Relevanz	stark abhängig von den Auslegungsparametern und unterstellten Szenarien
Empfehlungen für weitere FuE	<ul style="list-style-type: none"> - Untersuchung des Zweiphasenflusses in Zementstein bei unterschiedlicher Wassersättigung. - Untersuchung der Auswirkungen chemischer Reaktionen auf die Zweiphaseneigenschaften von Zementen über lange Zeiträume.

Gasmigration und Zweiphasenfluß	
Geklüftetes Gestein	
Kenntnisstand	<ul style="list-style-type: none"> - Beschreibung des Gastransports über Zweiphasenflußmodell möglich. - Vereinzelt Messungen zum Zweiphasenfluß im Kristallin existieren. Die funktionale Beschreibung der relativen Permeabilitäten ist noch unsicher. - Einzelne Prozesse, wie die Auswirkung des Mitreißens von Wasser durch Gasblasenbewegung ("Entrainment") sind noch unklar.
Relevanz	für den Standort Äspö gering, da dort weder Permeabilitäten noch Kapillardrücke ein Hindernis für den Gastransport darstellen.
Empfehlungen für weitere FuE	<ul style="list-style-type: none"> - Untersuchung der Auswirkung von Effekten wie "Entrainment" auf Grundwasser und Nuklidtransport - Anwendung geostatistischer Modelle bei der Modellierung von Strömungs- und Transportvorgängen. - Untersuchung der Übertragbarkeit auf andere kristalline Formationen
Salzgrus	
Kenntnisstand	<ul style="list-style-type: none"> - Beschreibung des Gastransports mit Zweiphasenflußmodell bis zu einem bestimmten Kompaktionsgrad möglich. Kopplung von Zweiphasenflußprozessen mit Konvergenz und Umlösung ist zu berücksichtigen. Entsprechende Rechenprogramme sind derzeit in Entwicklung. - Auswirkungen der Gase auf das chemische Milieu sind noch unklar.
Relevanz	stark abhängig von den Auslegungsparametern und unterstellten Szenarien
Empfehlungen für weitere FuE	<ul style="list-style-type: none"> - Kopplung relevanter Prozesse an die bestehenden Zweiphasenflußmodelle. - Untersuchung des Zweiphasenfluß bei niedrigen Porositäten

3.8 BIOMASS

Das Projekt BIOMASS (Biosphere Modelling and Assessment Methods) läuft von 1996 bis 2001 und wird von der IAEA koordiniert. Die Arbeiten sind in drei Themengebiete aufgeteilt, die von jeweils unterschiedlichen Gruppen bearbeitet werden:

- Radioactive Waste Disposal
- Environmental Releases
- Biospheric Processes

Für die Langzeitsicherheitsanalyse sind hauptsächlich die Arbeiten des ersten Themengebiete relevant. Darum werden ausschließlich diese Arbeiten behandelt, deren Ziel die Erstellung von robusten und praktikablen Referenz-Biosphären für Langzeitsicherheitsanalysen ist. Sie setzen auf den im vorangegangenen Projekt BIOMOVs II erzielten Ergebnissen auf. Die Bearbeitung erfolgt in sechs verschiedenen Arbeitsgruppen.

In den meisten Langzeitsicherheitsanalysen wird die Dosis als Maß für die menschliche Gefährdung durch ionisierende Strahlung verwendet. Zur Ermittlung der Dosis ist es notwendig, eine Personengruppe mit ihren Eßgewohnheiten zu charakterisieren und ihre Größe zu definieren. Diese Aufgabe wurde in der Arbeitsgruppe 1, "Critical Groups", verfolgt. Letztendlich konnte jedoch keine kritische Gruppe definiert werden. Stattdessen wurde eine Anleitung zur Festlegung der Gruppen von strahlenexponierten Personen gegeben. Es wurde als nicht sinnvoll angesehen, eine strahlenexponierte Gruppe unabhängig von dem zu betrachtenden Biosphärensystem zu definieren.

Zwei prinzipiell unterschiedliche Wege werden für die Definition der strahlenexponierten Gruppe vorgeschlagen, der A-Priori- und der A-Posteriori-Ansatz. Im A-Priori-Ansatz werden die Eigenschaften einer strahlenexponierten Gruppe vor Durchführung der Biosphärenrechnung definiert. Dieser Ansatz hat den Vorteil, daß die Beschreibung konsistent und transparent ist. Der Nachteil ist, daß die Auswahl der Eigenschaften in gewisser Weise willkürlich ist. Außerdem ist im Einzelfall schwer nachzuweisen, daß die berechnete Exposition konservativ ist. Bei dem A-Posteriori-Ansatz, werden alle denkbaren Expositionspfade in das Biosphärenmodell integriert und normierte Expositionen für jeden Pfad berechnet. Unter Verwendung geeigneter Sampling-Methoden werden Individuen mit maximaler Exposition ermittelt, wobei unrealistische Kombinationen von Expositionspfaden ausgeschlossen werden. Bei dieser Methode ist der Nachweis, daß maximale Expositionen für Individuen ermittelt werden, einfacher, der Aufwand allerdings erheblich höher.

Ziel der Arbeitsgruppe 2, "Application of Data to Assessment Models" war die Ableitung von Eingangsdaten und deren Bandbreiten für die Biosphärenmodelle. Bisher wurde von der Gruppe eine Anleitung zur Bereitstellung diesbezüglicher Daten erstellt. Ein wichtiger Bestandteil ist das Datenprotokoll, das eine strukturierte Vorgehensweise zur Ableitung und zur Reduktion, bzw. Charakterisierung von Unsicherheiten der Daten darstellt. Als

sehr wichtig wird die sorgfältige Dokumentation aller Arbeitsschritte bei der Datenfestlegung angesehen. Der Schwerpunkt derzeitiger Arbeiten liegt in der Bereitstellung von Daten für fünf ausgewählte Referenzbiosphären.

Als wesentliche Basis für die Entwicklung einer Referenzbiosphäre wird der "Assessment-Kontext" angesehen, d.h. eine genaue Beschreibung der folgenden Punkte:

- Zweck der Sicherheitsanalyse
- Endpunkt der Sicherheitsanalyse
- Art des Endlagersystems
- Art des Standorts, wie z.B. Küstenstandort oder Binnenland
- Quellterm in die Biosphäre, Kopplung zwischen Geosphäre und Biosphäre
- zu betrachtende Zeiträume
- Annahmen zur Gesellschaft, wie z.B. Größe und technologischer Entwicklungsgrad

In der Arbeitsgruppe 3, "Alternative Assessment Contexts", wurde der Assessment-Kontext von fünf verschiedenen Referenzbiosphären (ERBs) unterschiedlicher Komplexität erarbeitet. Dabei ändern sich die Bedingungen, d.h. die bestimmenden Prozesse, bei den Biosphären ERB1, 2A und 2B zeitlich nicht. Für ERB3A und 3B werden dagegen zukünftige Veränderungen in der Biosphäre angenommen.

- ERB1: Grundwasserbrunnen: Das Wasser wird aus einem Brunnen entnommen und ausschließlich als Trinkwasser verwendet.
- ERB2A: Das Wasser wird einem Brunnen entnommen. Gegenüber ERB1 werden zusätzliche Expositionspfade entsprechend einer landwirtschaftlich genutzten Region im Landesinneren berücksichtigt. Basis ist ein gemäßigtes Klima.
- ERB2B: Im Unterschied zu ERB2A wird das Wasser aus dem Aquifer direkt in den landwirtschaftlich genutzten Boden freigesetzt.
- ERB3A: Generische Biosphäre.
- ERB3B: Standortsspezifische Biosphäre. Die zukünftigen Veränderungen der Biosphären werden auf Basis der Erkenntnisse aus Untersuchungen zukünftiger Veränderungen an den Standorten Äspö und Harvell berücksichtigt werden.

In Arbeitsgruppe 4, "Identification and Justification of Biospheric Systems", wurden die für Langzeitsicherheitsanalysen relevanten Teilsysteme identifiziert. Die Arbeitsgruppe hat einen Leitfaden für das Vorgehen erarbeitet. Im ersten Schritt wird der "Assessment-Kontext" im Hinblick auf System-Identifikation und Rechtfertigung überprüft. Im zweiten Schritt wird festgelegt, ob zukünftige Veränderungen in der Biosphäre behandelt werden sollen. Wenn ja, werden die verursachenden Mechanismen identifiziert und die Auswirkungen auf die Biosphäre abgeschätzt. Im dritten Schritt wird ein Ansatz zur Beschreibung der zukünftigen Veränderungen der Biosphäre ausgewählt. Diese Vorgehensweise wird auf die in Arbeitsgruppe 3 erarbeiteten "Assessment-Kontexte" für die fünf ausgewählten Biosphären angewandt.

Darauf basierend erarbeitet die Arbeitsgruppe 5, "Biosphere System Description" eine genaue Beschreibung der Referenzbiosphären. Sie ist die Grundlage für Arbeitsgruppe 6 "Model Development". Die Modelle sollen in drei Stufen entwickelt werden. Die erste Stufe beinhaltet konzeptuelle Modelle auf Basis der Biosphären FEP-Liste, die im Projekt BIOMOVS II erstellt wurde. Die primären Komponenten des Biosphärensystems werden identifiziert und in einer Matrix als Diagonalelemente aufgeführt. Alle Wechselwirkungen zwischen den Komponenten werden dargestellt. Der Datenbedarf wird dokumentiert und anhand des Datenprotokolls von der Arbeitsgruppe 2 zusammengestellt. Die konzeptuellen Modelle werden dann in mathematische Modelle umgesetzt. Auf die Berechnungen der ausgewählten Referenzbiosphären folgt als letzter Schritt die Ableitung der Modelle, die in Langzeitsicherheitsanalysen verwendet werden sollen.

Fazit: Die Entwicklung der Biosphäre 1 ist abgeschlossen und als Entwurf dokumentiert. Die Beschreibungen der Biosphären 2A und 2B liegen als Entwurf vor. Für Biosphäre 2A sind das konzeptuelle und mathematische Modell bereits erstellt. Geeignete Parameter müssen noch festgelegt werden. Für die Biosphärenmodelle 3A und 3B liegen noch keine Beschreibungen vor. Es ist zu erwarten, daß die in Langzeitsicherheitsanalysen zu verwendenden Modelle für die fünf Referenzbiosphären nicht vor Abschluß des Biomass-Projekts im Jahr 2001 vorliegen werden.

3.9 Internationaler Kenntnisstand zur Szenarienanalyse

3.9.1 Methoden der Szenarientwicklung

Erster Schritt der Szenarientwicklung ist die Festlegung einer systematischen Vorgehensweise zur Ableitung von Szenarien. In Anlehnung an die Formulierung in [39] wird der Begriff Szenario in der Endlager-Sicherheitsanalyse wie folgt definiert: Ein Szenario ist eine Möglichkeit für die zukünftige Entwicklung des Endlagersystems und stellt sich als eine Kombination von sogenannten FEPs (Features, Events und Processes) dar. Features sind in diesem Zusammenhang die Eigenschaften oder Randbedingungen des Endlagersystems, die die Freisetzung oder den Transport der Schadstoffe durch Endlagernahbereich und Geosphäre beeinflussen. Events steht für natürliche oder anthropogene Vorgänge, die in relativ kurzem Zeitrahmen ablaufen und Processes für entsprechende Vorgänge, die sich über einen längeren Zeitraum erstrecken und gemeinsam die Endlagersicherheit mitbestimmen.

Die Methode der Szenarientwicklung ist wesentlich für die Vollständigkeit und Belastbarkeit einer Langzeitsicherheitsanalyse für Endlager. In den Programmen verschiedener Länder kamen in der Vergangenheit methodisch unterschiedliche Ansätze zur Anwendung. Als Beitrag zur Entwicklung eines gemeinsamen Verständnisses führte die GRS eine Reihe von Arbeitsgesprächen mit Vertretern von auf dem Gebiet der Endlagerung arbeitenden deutschen Institutionen durch. Gegenstand waren Fragen der Terminologie, des Methodenvergleichs sowie der Betrachtung zukünftiger menschlicher Handlungen. Die Ergebnisse dieser Arbeitsgespräche sind in [4] dargestellt und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Eine Langzeitsicherheitsanalyse erfolgt in zwei Schritten, die im Kern folgendes enthalten sollten:

- 1. Szenarienanalyse:
Hierbei werden FEPs, welche die zukünftige Entwicklung des Endlagersystems und seiner Umgebung beeinflussen können, identifiziert und zu Szenarien verknüpft. Die Vielzahl der Szenarien werden zu Gruppen zusammengefaßt, und für die einzelnen Gruppen werden repräsentative Szenarien gebildet.

- 2. Konsequenzanalyse:
Hierbei werden der Ablauf der Szenarien mit Hilfe von Rechenmodellen simuliert und die berechneten Schadstofffreisetzungen mit den gültigen Schutzziele verglichen.

Demzufolge bestimmt die Szenarienanalyse maßgeblich den Gegenstand der Konsequenzanalyse und somit den Umfang der gesamten Sicherheitsanalyse.

Der internationale Stand der Entwicklung und Diskussion zur Szenarienanalyse wurde zu Beginn der 90er Jahre von einer Arbeitsgruppe der OECD/NEA in [39] zusammengefaßt. Hierin werden im wesentlichen 3 Aspekte angesprochen:

- Szenarien liefern durch Betrachtung potentieller zukünftiger Entwicklungen den Rahmen zur Durchführung der Sicherheitsanalysen.
- Szenarien bestimmen die Vorgehensweise bei Datenbeschaffung und Modellbildung.
- Die Diskussion über Szenarien bildet eine wichtige Grundlage für die Kommunikation zwischen Antragstellern und Genehmigungsbehörden.

Der Bericht [39] gibt einen Überblick über die zum Zeitpunkt des Erscheinens international gebräuchlichen Methoden der Szenarienentwicklung. Sämtliche beschriebenen Methoden gehen von der Identifikation und Sammlung der FEPs aus, die die zukünftige Entwicklung des Endlagersystems beeinflussen können.

3.9.2 NEA Workshop zur Szenarientwicklung

Seit Fertigstellung des Berichts [39] wurden die Methoden zur Szenarientwicklung im Rahmen einer Reihe nationaler Programme weiterentwickelt. Nachdem im Rahmen der Arbeitsgruppe IPAG [47] und IPAG2 [48] unter anderem Fragen der Einordnung von Szenarianalysen in das Gesamtsystem von Langzeitsicherheitsanalysen betrachtet wurden, hat die OECD/NEA 1999 einen Workshop in Madrid organisiert, auf dem die internationale Diskussion fortgeführt wurde.

Im Vorlauf hat die NEA einen Fragebogen an interessierte Teilnehmer verschickt, mit dem u.a. folgende Punkte abgefragt wurden:

- Wie sind Szenarien definiert,
- wie wird bei der Szenarientwicklung vorgegangen,
- werden formalisierte Vorgehensweisen benutzt,
- inwieweit ist eine systematische Szenarientwicklung gesetzlich vorgeschrieben,
- welchen Stellenwert hat die Szenarientwicklung in der Langzeitsicherheitsanalyse,
- wie wird die Vollständigkeit der Szenarien gewährleistet,
- wie werden Eintrittswahrscheinlichkeiten für Szenarien behandelt.

Die Antworten wurden im Auftrag der NEA von T. Sumerling ausgewertet. Es stellte sich heraus, daß in allen Mitgliedsländern im wesentlichen gleiche Vorgehensweisen bei der Szenarientwicklung angewendet werden. Unterschiede entstehen durch besondere Anforderungen der in einzelnen Ländern unterschiedlichen Genehmigungskriterien und der Bedeutung in den jeweiligen Bewertungskonzepten zur Langzeitsicherheit.

Im ersten Teil des Workshops wurden die einzelnen Vorgehensweisen bei der Szenarientwicklung vorgestellt und diskutiert, wie sie derzeit in den Mitgliedsländern praktiziert werden. Die Vorträge werden demnächst in einem Proceedings-Band veröffentlicht.

In allen Fällen wird von einer nationalen oder internationalen FEP-Liste ausgegangen, aus der durch geeignete Verfahren die für konkrete Standorte relevanten FEPs selektiert und weiter diskutiert werden. Das Vorgehen hierbei und die Dokumentation der

Ausschluß- bzw. Bewertungskriterien für FEPs werden z.T. durch geeignete Computerprogramme unterstützt. Aus den als wesentliche Einflußgrößen erkannten Ereignissen und Prozessen werden durch Kombinationen Szenarien abgeleitet.

Die teilweise in der Vergangenheit praktizierte Methode der Total System Simulation, d.h. die Modellierung des Gesamtsystems, um die Vielzahl möglicher Entwicklungen in einem Modell zu erfassen, wird gegenwärtig nicht mehr verfolgt.

Im zweiten Hauptteil der Veranstaltung wurden vier Arbeitsgruppen gebildet, die sich mit unterschiedlichen Themen befaßten. Die Arbeitsgruppe 1 behandelte die Fragen, inwiefern eine systematische Szenarienentwicklung die Vertrauensbildung erhöhen kann, was die Szenarien mit der Realität zu tun haben, welche Vereinfachungen akzeptabel sind und wie ihre Wahrscheinlichkeit abgeschätzt werden kann. Die Arbeitsgruppe 2 erörterte Aspekte der Genehmigungsverfahren, einschließlich Empfehlungen, Erwartungen der Genehmigungsseite sowie Möglichkeiten und Vorteile von Referenzszenarien bzw. stilisierten Szenarien. Die Arbeitsgruppe 3 diskutierte, ob eine Vollständigkeit von FEP-Listen und Szenarien erreichbar ist und machte Angaben zur Transparenz der Verfahren. Die Arbeitsgruppe 4 befaßte sich mit Fragen der Modellierung von Szenarien, der Nachvollziehbarkeit, der Dokumentation und der Verbindung von Szenarienentwicklung zur gesamten Sicherheitsbewertung.

3.10 FEP Datenbank der NEA

Das Vertrauen in die Szenarienanalyse hängt eng mit der Vorstellung zusammen, daß die erzeugten Szenarien vollständig sind. Hier stellt sich die grundsätzliche Frage, inwiefern eine solche Vollständigkeit anzustreben bzw. erreichbar ist und wie sie gegebenenfalls demonstriert werden kann. Um das Vertrauen in die Szenarienanalyse zu erhöhen, betreibt die OECD/NEA eine FEP-Datenbank. In ihr werden neben den generischen, sogenannten IFEPs (internationale FEPs) die PFEPs, d.h. projektspezifische FEPs abgelegt. Letztere werden von den Mitgliedern der Arbeitsgruppe aus nationalen Projekten an die Datenbank übermittelt. Zur Zeit steht diese in der geschützten Version 1.1 allen

Mitgliedern zur Verfügung. Beiträge können nur von Mitgliedern der sogenannten Core Group eingebracht werden. Es wurde ein Vorschlag über die generelle Zugänglichkeit der Datenbank für Mitgliedsländer der OECD erarbeitet.

Auch in Zukunft soll die Entwicklung der FEP-Datenbank weiter betrieben werden. Insbesondere sollen weitere projektspezifische Datenbasen aufgenommen werden. Dabei ist geplant, den FEP-Katalog mit Daten aus den folgenden Studien zu erweitern:

- NEA Clay Club FEP-Katalog
- FEP-Katalog für ein konzeptuelles Endlager Mol (1994)
- Mol 2000 von SCK-CEN
- SR-97-Studie von SKB
- FEP-Katalog von ENRESA aus dem SPA-Projekt
- Assessment of HLW/SF/ILW in Opalinus Clay, NAGRA
- Yucca Mountain von USDOE

Auch sollen Handhabung, Zugriff und Ausgabemöglichkeiten weiter verbessert werden. Darüberhinaus ist an eine praktische Anwendung im Rahmen eines konkreten Projekts gedacht.

4 Bewertung bisheriger und geplanter Vorhaben

Das BMWi (ehemals BMBF) fördert anwendungsorientierte Grundlagenforschung zur Endlagerung radioaktiver Abfälle als Vorsorge zum Schutz von Mensch und Umwelt. Themenbereiche wurden im Förderkonzept des BMBF zur Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen (1997 - 2001)“ dargelegt und erläutert.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts wurden geplante, laufende und abgeschlossene Projekte bewertet und wo möglich, bezüglich neuer Modellansätze und Daten für Langzeitsicherheitsanalysen ausgewertet. Arbeiten von hoher Relevanz wurden bereits in Kap. 2 beschrieben. Weitere Arbeiten, die in Augenschein genommen bzw. bewertet wurden, werden im folgenden kurz behandelt. Sie sind in Teil B “Verbesserung von Instrumentarien für die Sicherheitsbewertung von Endlagern” des Förderkonzepts aufgeführt und in sieben Themenbereiche unterteilt. Die Bezeichnungen der folgenden Unterkapitel entsprechen den Titeln der sieben Themenbereiche.

4.1 Szenarienentwicklung

Auf den internationalen Kenntnisstand zur Szenarienanalyse wurde in Kap. 3.9 bereits eingegangen. Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurde die „Studie zur Entwicklung von Grundlagen für ein Verfahren zur Auswahl von Endlagerstandorten und Beurteilung ihrer Langzeitsicherheit“ (Gruppe Ökologie - Gesellschaft für ökologische Forschung und Beratung mbH, PanGeo - geowissenschaftliches Büro, sowie Dr. Habler und Partner, 1994) begutachtet. Die wichtigsten Punkte stellen sich wie folgt dar.

Der wesentliche Gedanke der Studie besteht darin, daß die Vorgehensweise zur Planung und Durchführung der Endlagerung radioaktiver Abfälle darin bestehen muß, die einzelnen Schritte strukturiert in einer zeitlichen Abfolge vorzunehmen und dabei zunächst die Methoden für den Sicherheitsnachweis zu entwickeln, um eine Aussicht auf gesellschaftliche Akzeptanz zu haben. Struktur und Methoden streng folgend soll dann ein Standort ausgewählt, untersucht und im Hinblick auf die Langzeitsicherheit bewertet werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die Fakten sachlich und weitgehend korrekt dargestellt sind. Probleme wurden richtig erkannt, und auch die angeführten Kritikpunkte sind zumeist berechtigt, ein Teil davon ist heute jedoch als überholt anzusehen.

Den Kern der Studie bilden die Kapitel 4 und 5, mit Ausführungen zur Methode der Langzeitsicherheitsanalyse, wie sie in Deutschland angewandt wird und zur Vorgehensweise bei Auswahl und Eignungsnachweis von Endlagerstandorten. Dabei werden Grundlagen für zukünftige Verfahrensweisen entwickelt.

Die Kritik an der Methode der Langzeitsicherheitsanalyse fordert - obwohl einige Punkte sachlich begründet sind - doch erheblichen Widerspruch heraus. So wird angeführt, das Bewertungssystem für die Ergebnisse der Sicherheitsanalyse sei für Zeiträume über 10 000 Jahre in sich nicht schlüssig und der angelegte Maßstab nicht eindeutig definiert. Aus beiden Einwänden kann jedoch allenfalls die Notwendigkeit zum Überdenken der Bewertungsmaßstäbe (teilweise ist dies bereits geschehen) gefolgert werden, keinesfalls aber die Unbrauchbarkeit der Methode an sich.

Ferner wird als einzig akzeptable Vorgehensweise die probabilistische Sicherheitsanalyse angesehen, für die jedoch ein für die Anwendung nicht ausreichender Entwicklungsstand festgestellt wird. Dem ist entgegenzuhalten, daß deterministische Rechnungen ein unerläßliches wissenschaftliches Werkzeug für die Verständnisbildung sowie für Sensitivitätsanalysen darstellen. Überdies wird die probabilistische Methode seit geraumer Zeit erfolgreich eingesetzt und ständig weiterentwickelt.

Als weitere Argumente gegen die Methode werden Modellunsicherheiten, die Unvollständigkeit der Datenbasis sowie die Nichtnachweisbarkeit der Konservativität ins Feld geführt. Aus derartigen Einwänden kann wohl die Notwendigkeit zur Weiterentwicklung der Modelle abgeleitet werden, keineswegs aber die Unzulässigkeit des methodischen Ansatzes.

In der Studie wird ein Bewertungskatalog aus neun Punkten aufgestellt, anhand dessen die Methode der Sicherheitsanalyse beurteilt wird. Die Autoren kommen zu dem Schluß, daß diese keines der neun Kriterien erfülle und daher ungeeignet sei. Dieser Auffassung

muß jedoch entschieden widersprochen werden. Bei näherem Hinsehen beziehen sich die meisten Kritikpunkte nämlich nicht auf die methodischen Ansätze, sondern lediglich auf den Umgang mit Kenntnislücken sowie Bewertungsmaßstäbe.

Die Studie propagiert als Alternative die Entwicklung eines neuen, auf modernen statistischen Verfahren beruhenden probabilistischen Ansatzes, mit dessen Hilfe der Umgang mit Datenunsicherheiten auf eine exaktere Grundlage zu stellen wäre. An mehreren Stellen entsteht der Eindruck, als könne mangelhafte Datenqualität und -dichte durch ein derartiges Verfahren kompensiert werden. Dies ist selbstverständlich nicht der Fall. Auch das beste statistische Verfahren kann nur Unsicherheiten erfassen, nicht aber fehlerhafte Datensätze korrigieren oder fehlende ergänzen. Letzteres bleibt eine von der Methode der Sicherheitsanalyse völlig unabhängige Forschungs- und Expertenaufgabe.

Bei der Frage nach zukünftigen Vorgehensweisen für Standortauswahl und Eignungsnachweis stellen die Autoren die gesellschaftliche Akzeptanz eindeutig in den Vordergrund ihrer Forderungen. Das derzeitige Konzept des Sicherheitsnachweises für einen Endlagerstandort anhand einer Langzeitsicherheitsanalyse, die sich an Grenzwerten für Individualdosen orientiert, wird als ungeeignet kritisiert, da die Einhaltung des Kriteriums nicht nachzuweisen sei. Auch ist wegen der langen Prognosezeiträume die Richtigkeit eines Eignungsnachweises nicht überprüfbar, so daß der Nachweis stets nur subjektiv akzeptiert werden könne. Hier müssen das Konzept der Nachweisführung und im Zusammenhang damit die Sicherheitskriterien deutlich weiterentwickelt werden, um breitere Akzeptanz zu erreichen.

Die Autoren der Studie fordern, daß das Verfahren zu Standortauswahl und Eignungsnachweis transparent, strukturiert und breit akzeptiert sein müsse. Diese Punkte sehen sie bei dem durch die Regelungen von Atomgesetz und Strahlenschutzverordnung festgelegten Verfahren nicht erfüllt. Die Vorschläge für ein verbessertes Verfahren lassen sich zu folgenden Schwerpunkten zusammenfassen, wobei in Klammern einige Anmerkungen angefügt sind:

- Einführung einer strukturierten Vorgehensweise in 7 Arbeitsschritten (ein derart starres Verfahren birgt jedoch die Gefahr, neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen nicht gerecht zu werden),

- Verwendung von Ausschlußkriterien zur Entscheidungsfindung,
- Erweiterung der Schutzziele über den Schutz der Biosphäre vor ionisierenden Strahlen hinaus,
- Einführung des Kriteriums „Isolationszeitraum“ und des Konzepts „Nuklidfalle“ (unter „Nuklidfalle“ wird eine Formation verstanden, aus der Nuklidtransport nur durch Diffusion möglich ist, der Nachweis dafür ist jedoch kaum zu erbringen. Das Konzept befreit nicht von der Notwendigkeit eines Sicherheitsnachweises mittels Modellrechnungen),
- Klarstellung der Relevanz von Konservativität sowie von Szenarien, die bislang vernachlässigt wurden (Konservativität ist bei komplexen Systemen nicht immer nachweisbar, daher greift man heute zunehmend auf probabilistische Unsicherheitsanalysen zurück).

Insgesamt stellt die Studie eine sachliche Zusammenfassung der heute in Deutschland angewandten Verfahren zu Standortauswahl und Eignungsnachweis dar, die mit zum Teil berechtigter, zum Teil aber auch deutlich überzogener Kritik durchsetzt ist. Insbesondere ist die negative Beurteilung der international breit anerkannten Methode „Sicherheitsanalyse“ nicht zu akzeptieren. Die Vorschläge zur Verfahrensstrukturierung stellen jedoch eine Grundlage für weitere Diskussionen und Verfahrensentwicklungen dar.

4.2 Verhalten der Wirtsgesteinsformation

Die GRS ist an Forschungsvorhaben beteiligt, die sich mit wissenschaftlichen Fragestellungen zum Verhalten von Steinsalz- und Tonformationen als Wirtsgesteine für Endlager beschäftigen.

In einem vorangegangenen Projekt wurden die gebirgsmechanischen Parameter von Hauptanhydrit und Grauem Salztou bestimmt und die Spannungs- und Deformationseigenschaften im Gebirge untersucht. Die Kenntnis darüber ist für die Beurteilung der Langzeitsicherheit eines Endlagers im Steinsalz von wesentlicher Bedeutung, da in den Sicherheitsanalysen angenommen wird, daß ein Zutritt von Salzlaugen in ein Endlager über den Hauptanhydrit möglich ist.

Das Projekt "Untersuchung der Barrierewirksamkeit des Gesteinsverbandes Steinsalz/Anhydrit/Salzton (Bariton)" [14] wurde mit dem Ziel gestartet, die Durchlässigkeit und das mechanische Verhalten des Gebirgsverbandes Steinsalz/Anhydrit/Salzton und deren zeitliche Änderungen zu ermitteln. Dabei spielen natürliche und künstliche Klüfte eine Rolle, da sie mechanische und/oder hydraulische Schwächezonen darstellen. Für diese Projekt wurden In-situ-Messungen in einem bergbaulich gering beanspruchten Bereich des Salzbergwerks Bernburg durchgeführt. Für die Identifikation der gestörten Gebirgsbereiche konnten seismologische Methoden angewandt werden, da infolge von Spannungsumlagerungen weitere seismische Ereignisse auftreten. Die Gebirgsqualität in intakten Bereichen wurde mit seismischen Laufzeit- und Amplitudenmessungen abgeschätzt. Anhand von Strömungsmessungen mit Gas und Lauge wurde die Permeabilität im Übergangsbereich von Steinsalz zu Anhydrit zu $<10^{-21} \text{ m}^2$ bestimmt. Auch Bereiche mit Klüften wiesen dabei keine erhöhte Permeabilität auf. Die 1 bis 2 m tief ins Gebirge reichende Auflockerungszone einer 3 Jahre zuvor aufgefahrenen Strecke im Anhydrit wurde mit Schallemissionsmessungen untersucht, wobei die sehr hochfrequenten seismischen Signale unterschiedlicher Energie anzeigten, daß die Auflockerungszone von der Entstehung neuer bzw. Ausbreitung vorhandener Mikrorisse herrührt. Prinzipiell führt dies auch zu einer Erhöhung der Permeabilität, wie Labormessungen an Anhydritproben, die eine Zunahme der Permeabilität von 3-4 Größenordnungen lieferten, zeigen.

Basierend auf den Ergebnissen des FuE-Projekts Bariton soll in dem bereits laufenden Nachfolgeprojekt "Untersuchung des Barriereverhaltens von Anhydrit bei großräumigen Spannungsumlagerungen (BARIAN)" überprüft werden, ob größere tektonisch bzw. bergbaubedingte Spannungsumlagerungen zu einer erhöhten Permeabilität im Übergangsbereich von Steinsalz zu Anhydrit führen. Insbesondere soll die Durchlässigkeit in Abhängigkeit von der Rißdichte quantitativ bestimmt werden. Dazu werden In-situ-Messungen in einem bergbaulich stärker beanspruchten Bereich des Salzbergwerks Bernburg durchgeführt. Die Feldmessungen werden von einem Laborprogramm begleitet, in dem die Eignung einer alternativen Meßmethode zur Bestimmung des räumlichen und zeitlichen Spannungsfeldes der vor Ort herrschenden Maximalspannung untersucht sowie Messungen und Modellrechnungen zum quantitativen Zusammenhang der spannungsabhängigen Mikrorißbildung mit der Gesteinspermeabilität durchgeführt werden.

Der langzeitsichere Einschluß hochradioaktiver Abfälle in Ton- bzw. Tonsteinformationen ist in Deutschland bisher nicht untersucht worden. Im Fall der Endlagerung wärmeproduzierender hochradioaktiver Abfälle führt der Temperaturanstieg im Nahfeld der Abfälle zu einer Entsättigung des Porenraumes, wodurch sowohl die mechanischen als auch die hydraulischen Gesteinseigenschaften verändert werden.

Um die für Langzeitsicherheitsanalysen notwendigen konstitutiven Beziehungen für das Materialverhalten zu ermitteln und abzusichern, ist das thermische, mechanische und hydraulische Gesteinsverhalten sowohl im Labor als auch in situ zu untersuchen. In den Laboruntersuchungen ist insbesondere die potentielle Kopplung der vorgenannten Parameter zu berücksichtigen. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Wechselwirkung zwischen Gebirgsspannungszustand und Porosität/Permeabilität.

Über die petrophysikalischen Untersuchungen hinaus ist die Untersuchung und Modellierung der Diffusion, Migration und Sorption von Gasen und Lösungen in Tonformationen im Hinblick auf die Ausbreitung von Radionukliden von Bedeutung. Die relevanten Parameter sind im Ausgangszustand sowie unter den physiko-chemischen Randbedingungen des Endlagers (Druck, Temperatur, Feuchtigkeit) zu ermitteln.

Zur Überprüfung der ermittelten Stoffansätze und der Vertrauenswürdigkeit numerischer Simulationen ist ein geeignetes In-situ-Aufheizexperiment (oder ggf. auch ein Ventilationsexperiment) in einem Untertagelabor (z. B. Mont Terri oder Tournemire) durchzuführen. Die zu erwartenden Ergebnisse sind durch vorlaufende Modellrechnungen auf Basis der ermittelten Stoffansätze und Parameterwerte zu prognostizieren.

In einem ersten Schritt beteiligt sich die GRS an einem Erhitzerversuch in Mont Terri. Aufgabe der GRS ist es, die thermisch induzierte Gasfreisetzung aus dem Opalinus-Ton zu untersuchen und andererseits die durch den Aufheizprozeß beeinflusste Fluidverteilung im Ton durch geoelektrische Messungen zu ermitteln.

Im Rahmen des von der ANDRA im Untertagelabor Est geplanten Forschungsprogramms sollen zwei größere In-situ-Experimente (MODEX-TER&VEN) zur Untersuchung der Auswirkungen des Wärmeeintrages infolge der Einlagerung hochradioaktiver Abfälle sowie der Bewetterung von Strecken auf das Verhalten der viskoplastischen Cal-

lovo-Oxford-Tonsteinformation durchgeführt werden. Die Experimente bieten eine gute Gelegenheit, vorhandene bzw. zu entwickelnde Material- und Rechenmodelle, die zur Analyse des gekoppelten thermisch-hydraulisch-mechanischen (THM) Verhaltens von Tonsteinformationen benötigt werden, bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit zu überprüfen.

Aktuelle Arbeiten und offene Fragestellungen zur Wirtsgesteinsformation Granit wurden bereits in den Kapiteln 2.4 und 3.4 diskutiert.

4.3 Chemische und physikalische Effekte im Nahfeld

4.3.1 Erzeugung und Verbleib von Gasen in einem Endlager im Salinar

Der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik in Deutschland bezüglich der Produktion, des Verbleibs und der Auswirkung der Gasbildung in einem Endlager für radioaktive Abfälle in salinaren Formationen wurde in einem von der GRS für BfS und PTE organisierten Workshop diskutiert. Dieser fand im Mai 1996 in Braunschweig statt. Das Programm des Workshops war in die drei Themenbereiche

- Entstehung und Freisetzung von Gasen im Endlager
- Verhalten und Wirkung der Gase im Endlager
- Modellierung des Gasverhaltens in Endlager-Sicherheitsanalysen

untergliedert. Die Ergebnisse dieses Workshops wurden in [35] zusammengefaßt und veröffentlicht.

4.3.1.1 Entstehung und Freisetzung von Gasen

Die aktuellen Untersuchungsergebnisse haben die bereits bestehende Einschätzung bekräftigt, daß die Wasserstoffbildung durch anaerobe Metallkorrosion der dominierende Gasproduktionsmechanismus bei Laugenzutritt ist. Die Geschwindigkeit der Umsetzung hängt vom lokalen Feuchteangebot und der Temperatur ab. Bei Baustählen

finden auch in natürlich gering feuchtem Steinsalz gewisse Umsetzungen statt, die mit vergleichsweise niedriger Geschwindigkeit ablaufen. An zweiter Stelle rangiert nach heutigem Kenntnisstand die mikrobielle Gasproduktion, für die jedoch keine neuen Untersuchungsergebnisse vorgestellt wurden.

Eine γ -radiolytische Wasserstoffproduktion tritt nur bei der Bohrlochlagerung von HLW-Kokillen auf und stellt insgesamt kein Sicherheitsproblem dar. Die Bildungsraten sind im wesentlichen bekannt und nur für Lauge im Kontakt mit HLW von eventuellem Einfluß auf die Sicherheit, wogegen dieser Effekt in festem Steinsalz vernachlässigbar ist. Es ist noch nicht geklärt, ob im Zusammenhang mit Langzeiteffekten und Laugenzutritts-Szenarien auch die α -radiolytische Wasserstoffbildung eine Rolle spielen kann. Die im Endlager gebildeten Gase beeinflussen offenbar auch das dortige chemische Milieu. Es ist aber derzeit noch weitgehend unbekannt, welche Bedeutung dieser Erscheinung im Hinblick auf die Langzeitsicherheit von Endlagern zuzumessen ist.

4.3.1.2 Verhalten und Wirkung der Gase im Endlager

Die verfügbaren Permeabilitäts- und Diffusionsdaten für Steinsalz und Salzgrus sind mittlerweile in ausreichendem Umfang bekannt; nur im Bereich sehr niedriger Salzgrusporosität sollten die Datenbasis und die formelmäßige Beschreibung noch verbessert werden (vgl. auch Kap. 2.1).

Auch in einem ungestörten Endlager findet wegen der im Salzgestein vorhandenen geringen Feuchte eine langsam ablaufende Gasbildung durch anaerobe Korrosion statt. Langfristig geschwindigkeitsbestimmend für diesen Vorgang ist die Nachlieferung von Feuchte aus entfernteren Gebirgsbereichen. Der Transportprozeß, der Feuchte über lange Zeiträume (ca. 10^5 Jahre) hinweg an die Metalle eventuell heranführt, muß noch weiter aufgeklärt und - wenn sicherheitsrelevant - quantitativ beschrieben werden. Das gleiche gilt auch grundsätzlich für andere korrosive Medien wie H_2S und HCl .

Die in den eingesetzten Rechencodes für Langzeitsicherheitsanalysen implementierten Materialeigenschaftsrelationen wurden z.T. seit mehr als 10 Jahren nicht mehr geändert und entsprechen eventuell nicht mehr dem aktuellen Stand des Wissens. Daher sollten das verwendete Stoffgesetz für Steinsalz, die Permeabilitäts/Porositätsrelation für Salzgrus etc. unter diesem Aspekt überprüft werden.

Der Kenntnisstand über die Ausdehnung und Eigenschaften der Auflockerungszonen im Salzgestein und über die Vorgänge, die zu ihrer Ausheilung führen, ist noch unzureichend, wie bereits in Kap. 2.2 ausgeführt wurde.

4.3.1.3 Modellierung des Gasverhaltens in Sicherheitsanalysen

Die Gasproduktion kann sich je nach den vorliegenden Bedingungen sowohl positiv als auch negativ auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers im Salinar auswirken (vgl. auch Kap. 3.7.2). Es ist daher zweckmäßig, diese Tatsache bereits bei der Auslegung des Endlagers im Hinblick auf eine Optimierung zu berücksichtigen. Nach Ansicht der Workshop-Teilnehmer stellt die Gasbildung für den Fall des ungestörten Endlagers nach allen bisher vorliegenden Ergebnissen kein Problem dar.

Die Auswirkung der gebildeten Gase auf das chemische Milieu und die ablaufenden chemischen Reaktionen - und damit u.a. auch auf die Mobilität der Schadstoffe - unter gestörten Endlagerbedingungen ist noch nicht ausreichend bekannt. Dieselbe Feststellung trifft auch auf einzelne Einflußgrößen für die Zweiphasenströmung in porösen bzw. aufgelockerten salinaren Medien zu. Dies sind beispielsweise der kritische Gasdruck, die relativen Permeabilitäten und der Kapillardruck. Der Stand des Wissens zur Zweiphasenströmung ist ausführlich in Kap. 3.7.1 dargestellt.

Die Modellierung des Gastransports im ungestörten Endlager als einphasiger Konvektionsprozeß stellt kein Problem mehr dar. Die Rechencodes zur Beschreibung von Zweiphasenströmungen, die für die Modellierung des Gas- und Laugentransports bei Laugenzutritt-Szenarien erforderlich sind, sind im Prinzip verfügbar. Sie müssen jedoch noch derart ergänzt werden, daß die endlagerspezifischen Wechselwirkungen des Gas-

transports mit Gasbildung und geomechanischen und chemischen Prozessen berücksichtigt werden können. Die hierbei anstehenden Arbeiten sollten sich an den Anforderungen eines Genehmigungsverfahrens für ein Endlager im Steinsalz orientieren.

4.3.2 Quellterme für Glas, LWR-Brennstoff und zementierte Abfälle

Die in einem Endlager eingelagerten radioaktiven Abfälle werden unterschiedlich konditioniert. Hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente werden in Borosilikatglas gebunden und in Stahlkokillen eingeschlossen, LWR- und HTR-Brennelemente ohne Wiederaufarbeitung in Pollux-Behältern ohne Füllmaterialien oder in Stahlkokillen verpackt, die meisten anderen Abfälle werden zementiert in Fässern eingelagert. Zur Modellierung der Radionuklidfreisetzung aus diesen Abfallbinden werden Quellterme verwendet.

Das Institut für Nukleare Entsorgungstechnik (INE) des Forschungszentrums Karlsruhe ist vom Bundesamt für Strahlenschutz beauftragt worden, für alle zu erwartenden Gebindetypen Quellterme zu formulieren. Der Auftrag [3] hat die Erstellung eines integrierten Nahfeldmodells für alle im Salzstock Gorleben einzulagernden Abfallarten zum Ziel, wobei die veröffentlichten Daten zusammengestellt, experimentelle Untersuchungen durchgeführt und die Quellterme zur Verwendung in Langzeitsicherheitsanalysen mathematisch formuliert werden sollen. Die Entwicklung der Quellterme sollte bis Ende des Jahres 1999 beendet werden. Da die Arbeiten aber noch nicht abgeschlossen sind, werden im folgenden nur die vorläufigen Ergebnisse vorgestellt und diskutiert. In [64] werden die bisher in Langzeitsicherheitsanalysen mit dem Programmpaket EMOS verwendeten Quellterme beschrieben.

In Fachgesprächen am 10.12.97, 4.8.98, 24.9.98 sowie 22.07.99 wurden die experimentellen Ergebnisse und die Ergebnisse der Modellierungen für alle Abfallarten diskutiert. Ferner wurden die vorläufigen Quellterme für abgebrannte LWR-Brennelemente und für HAW-Glas von INE vorgestellt und mit Vertretern des BfS und der GRS Braunschweig erörtert. Der Quellterm für abgebrannte HTR-Brennelemente und die Arbeiten zu abgebrannten Brennelementen aus Forschungsreaktoren wurden von Vertretern des Forschungszentrums Jülich, an dem in der Vergangenheit die Untersuchungen zu abge-

branntem HTR-Brennstoff vorgenommen wurden, vorgestellt. Weitere Fachgespräche sind bis zum Abschluß des Projektes geplant.

Der neue Quellterm für **HAW-Glas** liegt nach dreimaliger Überarbeitung im Entwurf vor. Er setzt sich additiv aus einer Vorwärtsrate, welche die Korrosion der Glasmatrix in Abhängigkeit von der Siliziumkonzentration in Lösung beschreibt und einer zeitlich konstanten Langzeirate zusammen. Beide Raten verwenden wie der alte Quellterm eine experimentell ermittelte, temperaturabhängige Rate der Glasauflösung, wobei die Vorwärtsrate explizit an die Siliziumkonzentration in Lösung gekoppelt ist. Beide Raten enthalten eine Temperaturabhängigkeit, die über einen Arrheniusterm beschrieben wird. Die Langzeirate resultiert ebenfalls aus der Korrosion des Glases, über deren Mechanismen in diesem Fall aber keine Angaben gemacht werden. Sie läuft parallel zur Vorwärtsrate ab und sichert die Konservativität des Ansatzes.

Verglichen mit dem alten Quellterm für HAW-Glas ergibt sich nach ersten Rechnungen mit vorläufigen Parameterwerten insgesamt eine Verlangsamung der Radionuklidfreisetzung. Zu Beginn des Prozesses ist die Freisetzungsrates ähnlich wie beim alten Quellterm. Die Vorwärtsrate nimmt jedoch mit zunehmender Siliziumkonzentration in der Lösung schnell ab. Wird die Sättigungskonzentration von Silizium erreicht, so hört dieser Prozeß ganz auf. Eine Freisetzung von Radionukliden ist danach nur noch über die Langzeirate möglich, die einen viel kleineren Wert hat als die Vorwärtsrate. Vorläufige Modellrechnungen zeigen, daß in einem Einlagerungsbohrloch wegen der geringen Laugemengen nur weniger als 1 Prozent der Glasmasse durch die Vorwärtsrate aufgelöst dagegen die Hauptmenge der Radionuklide durch die Langzeirate freigesetzt werden können. Da diese Rate gegenüber dem alten Quellterm ca. einen Faktor 10 kleiner ist, sind auch die Freisetzungsraten um diesen Faktor kleiner.

Der neue Quellterm für **zementierte Abfälle** ist in ähnlicher Weise eine Weiterentwicklung des alten Quellterms. Während im alten Quellterm angenommen wird, daß angreifende Lösung unbegrenzt zur Verfügung steht, wird im neuen Quellterm von der Begrenztheit der Lösungsmenge und damit vor allem von Löslichkeitseffekten Kredit genommen. Da aber bereits im alten Quellterm Sorption und Löslichkeiten berücksichtigt werden können, bewirkt der neue Quellterm qualitativ keine wesentlichen Änderungen. Aufgrund der neuen Parameterwerte sind aber geringere Freisetzungen zu erwarten. Der

neue Quellterm wurde noch nicht schriftlich vorgestellt, so daß auch noch keine Rechnungen vorliegen.

In beiden Quelltermen wird eine kongruente Auflösung der Zementmatrix angenommen. Im alten Quellterm läuft die Zementkorrosion mit konstanter Rate so lange ab, bis der gesamte Zement korrodiert ist und damit alle Radionuklide freigesetzt sind. Im neuen Quellterm wird angenommen, daß die Zementkorrosion nur eine kurze Zeit abläuft. Nach diesem Zeitpunkt stellt sich bei leichtlöslichen Radionukliden eine Gleichverteilung zwischen den gelösten und den an den Korrosionsprodukten sorbierten Nukliden ein. Bei den schwerlöslichen Nukliden wird die gelöste Konzentration durch die Löslichkeit begrenzt. Sorption und Löslichkeit reduzieren also den Anteil der mobilen Radionuklide und damit die Freisetzungsmengen.

Der neue Quellterm für **abgebrannte LWR-Brennelemente** hat den bislang verwendeten Quellterm im wesentlichen bestätigt. Es wurden aber mehrere Parameterwerte für die Korrosion der Matrix, die instantane Freisetzung und die Korrosion von Metallen neu bestimmt, so daß von diesen neuen Werten eine geringere Radionuklidfreisetzung aus einem Abfallgebinde zu erwarten ist. Rechnungen mit dem neuen Quellterm wurden noch nicht durchgeführt.

Der Quellterm beschreibt im wesentlichen zwei Mechanismen: eine schnelle Freisetzung der Radionuklide, die sich im Gasraum, dem sogenannten "Gap" befinden und leicht flüchtig sind, sowie eine langsame Freisetzung der in der Brennelementmatrix fixierten Nuklide über Korrosionsvorgänge. Bei einer Lagerung der Brennelemente in Bohrlöchern ist zu erwarten, daß das chemische Milieu wegen der geringen Laugenmengen nach ca. 100 Jahren von reduzierenden zu oxidierenden Bedingungen wechselt, wodurch sich einige Parameterwerte ändern. Ansonsten ist der Quellterm auf Bohrloch- und Streckenlagerung gleichermaßen anwendbar.

Der bislang verwendete Quellterm für **abgebrannte HTR-Brennelemente** kann auch in Zukunft verwendet werden. Für den nur geringen Gesamtbestand an abgebrannten Brennelementen (ca. 629.000 Kugeln aus dem Thorium-Hochtemperatur-Reaktor THTR und 291.000 Kugeln aus dem Versuchsreaktor AVR) ist mit eventuell aktualisierten Parameterwerten eine konservative Bewertung der Radionuklidfreisetzung möglich.

Am Forschungszentrum Jülich wurden Daten zu anderen zu entsorgenden Brennelementen zusammengestellt. Dabei handelt es sich z.B. um abgebrannte Brennelemente aus Forschungsreaktoren, die von aluminischen Claddings umgeben sein können. Für diese Abfälle werden auch die Möglichkeiten der direkten Endlagerung geprüft und sofern notwendig, die Quellterme weiterentwickelt. Eine Beschreibung des bisherigen Standes der Arbeiten zur Einwirkung konzentrierter Salzlauge auf die Alu-Brennelemente von Materialtestreaktoren wird in Kapitel 4.3.3 gegeben.

Zusammenfassend ist zu sagen, daß die hier dargestellten Untersuchungen zu Quelltermen das gesamte Spektrum der Abfälle abdecken, die für ein Endlager mit nennenswert wärmeentwickelnden Abfällen vorgesehen sind. Bei den Quelltermen für HAW-Glas, abgebrannte LWR-Brennelemente und Zement wurden die bislang verwendeten Modelle abgesichert und erweitert. Aus den experimentellen Ergebnissen konnten Parameterwerte abgeleitet werden, die gegenüber den aktuellen Werten generell zu einer langsameren Radionuklidfreisetzung aus diesen Abfällen führen. Bei abgebrannten HTR-Brennelementen gibt es keinen Bedarf zu einer Überarbeitung des Quellterms, jedoch wird die Datenbasis aktualisiert.

4.3.3 Diverse Arbeiten zum Nahfeld

Nachstehend werden verschiedene FuE-Vorhaben, die in den Jahren 1997 -1999 abgeschlossen wurden und Endlagernahbereichsprozesse zum Inhalt hatten, in ihrer Bedeutung für Langzeitsicherheitsanalysen bewertet.

- FKZ 02 C 0405: "Erstellung einer Datenbasis zur Modellierung der Wechselwirkung von chrom-, kupfer- und nickelhaltigem Deponiegut mit Lösungen des Salzgesteins einer UTD" (Prof. W. **Voigt**, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Anorganische Chemie)

Für die Festlegung von Quelltermen (Mobilisierungsraten) zur Modellierung der Schadstoffausbreitung im Nahfeld eines Endlagers ist neben Eluationsversuchen die geochemische Modellierung - zum Beispiel mit EQ3/6 - ein geeignetes Werkzeug. Ausgangspunkt der Arbeiten war die Datenbasis von Harvie, Møller und

Weare (HMW), die die Wechselwirkung der Ionen des hexären Systems ozeanischer Salzablagerungen (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- und SO_4^{2-}) bei Raumtemperatur beschreibt. Diese Datenbasis wurde um die Ionen Cu^{2+} , Ni^{2+} , Cr^{3+} , CrO_4^{2-} und $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ und ihre Wechselwirkungskoeffizienten mit den ursprünglichen Ionen ergänzt.

Die Erweiterung geschah in der Hauptsache durch Auswertung von Literaturdaten. Für Systeme mit fehlenden oder nur sehr ungenauen Daten wurden eigene isopiestic Messungen (vergleichende Dampfdruckmessungen zur Bestimmung von Aktivitätskoeffizienten) bzw. Löslichkeitsuntersuchungen durchgeführt. Die Wechselwirkungskoeffizienten und Löslichkeitsprodukte wurden anhand von binären und tertiären Systemen ermittelt. Eine Kontrolle der Parameter erfolgte durch Vergleich mit Messungen an höheren Systemen, d. h. Systeme mit mehr Komponenten.

Zum Ergebnis wird gesagt, daß die Zuverlässigkeit der Parameter für Kupfer und Nickel zuverlässig und so für die Modellierung der Schadstoffausbreitung verwendbar sind. Da magnesiumhaltige Chromatlösungen zur Hydrolyse mit Niederschlagsbildung neigen, konnten die entsprechenden Daten nicht zuverlässig gemessen werden, so daß die Modellierung von chromhaltigen Abfällen nicht als gesichert gelten kann.

Zusammenfassend ist zu sagen, daß für die Modellierung der Schadstoffausbreitung unter normalen Temperaturbedingungen (Raumtemperatur) die Datenlage für Kupfer und Nickel befriedigend ist. Für radioaktive Abfälle mit nennenswerter Wärmeproduktion, die in dem Vorhaben aber nicht behandelt wurden, bleibt die Modellierung von nickelhaltigen Abfällen offen. Kupfersulfat, Nickelsulfat und andere Sulfate bilden mit Magnesiumsulfat Mischkristalle, die ein großes Rückhaltepotential darstellen. Für eine Verwendung in der Ausbreitungsmodellierung müssen diese Prozesse aber noch quantifiziert werden.

- FKZ 02 E 8725: "Elektrochemische und radiochemische Korrosionsuntersuchungen an UO_2 in endlagerrelevanten Elektrolytsystemen" (Prof. G. **Marx**, Freie Universität Berlin, Institut für Anorganische und Analytische Chemie)

Mit elektrochemischen Methoden wurden die Grundlagen der Korrosion von UO_2 untersucht. Es wurde eine Methode entwickelt, Abtragsraten von UO_2 in verschiedensten Elektrolytsystemen, bei Vorliegen einer Kalibrierungskurve, ausschließlich durch Potentialmessung zu bestimmen.

Untersucht wurde der Einfluß von Carbonatkonzentration und der Temperatur auf die Korrosionsrate. Dabei wurde festgestellt, daß sich bei der Korrosion generell eine Deckschicht bildet, die die Korrosion behindert. Die Ergebnisse zeigen, daß Carbonat durch Komplexbildung die Deckschicht verringert und damit die Korrosion beschleunigt. Eine Temperaturänderung im Bereich von 5 bis 55°C zeigte dagegen keinen signifikanten Einfluß.

Zur Annäherung an realistische Verhältnisse wurde auch der Verlauf der Korrosion bei Kontakt mit Feinkorn-Baustahl untersucht. Dabei kommt es zu einem reduzierenden Milieu mit Reduktion der Korrosionsraten. Weiterhin wird $\text{Fe}(\text{OH})_3$ gebildet, an dem das durch Korrosion von Urandioxid gebildete Uran(VI) adsorbiert wird. Diese Adsorption ist wie die Speziation des U(VI) stark pH-abhängig. Das Maximum der Adsorption liegt bei pH 7 bis 9.

Diese Ergebnisse haben zur Erstellung eines Quellterms für LWR-Brennstoff durch das INE nur in geringem Maße beigetragen.

- FKZ 02 E 8654: "Untersuchungen zur Radionuklidfreisetzung durch Einwirkung konzentrierter Salzlauge auf Alu-MTR-Brennelemente", Dr. J. **Fachinger**, Forschungszentrum Jülich, Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik)

MTR-Brennelemente bestehen meist aus einer Brennstoffschicht - einer metallischen Uran-Aluminiumlegierung -, die vollständig von einem Aluminiummantel umgeben ist. In der vorliegenden Arbeit sollte eine erste Orientierung für die Beurteilung des Langzeitverhaltens eines Endlagers im Salinar mit direkt endgelagerten MTR-Brennelementen gegeben werden. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Das Hüllmaterial (Aluminium) hat bei 90°C und Mg-reicher und damit Fe-reicher Lauge eine Standzeit von wenigen Monaten. Auch bei niedrigeren Temperaturen und reiner NaCl-Lauge ergeben sich Standzeiten, die wegen Lochkorrosion nicht deutlich länger sind. In granitischen Wässern zeigte sich dagegen nur eine sehr langsame Korrosion.
- Die Korrosion von MTR-Brennelementabschnitten in magnesiumreichen Lauge wurde durch die Anwesenheit von Grauguß beschleunigt. Dies steht im Gegensatz zu UO₂-Brennelementen, bei denen die Anwesenheit von Eisen die Reaktion verlangsamt.
- In Gegenwart von Grauguß kam es zu einer relativ schnellen Desintegration der Brennelementabschnitte, jedoch lag die Freisetzung der meisten Radionuklide unter 10%, die der Actinoiden unter 1%.
- Sehr geringe Freisetzungsraten ergaben sich bei Korrosionsversuchen mit Granitwässern. Hier waren jedoch die betrachteten Versuchszeiträume zu kurz, um belastbare Aussagen zu erhalten.

Insgesamt kann man sagen, daß die Korrosion von MTR-Brennelementabschnitten verglichen mit der von UO₂-Brennelementen nahezu instantan verläuft. Zur Erklärung der trotz schneller Desintegration geringen Konzentration der Radionuklide in der Lösung wurden erste Versuche zur Remobilisierung der an den Korrosionsprodukten des Aluminiums sorbierten Radionuklide unternommen. Die Versuche bestätigen eine starke Immobilisierung durch Sorption. Aus begleitenden Versuchen zur Sorption von Radionukliden an genau definierten Oxiden von Al und Fe(III) konnten Adsorptionswärmen ermittelt werden. Die Sorptionsexperimente sollen unter Variation verschiedenster Parameter in einem Folgevorhaben fortgeführt werden.

Unterauftrag zum Vorhaben 02 E 8855 2

Instrumentarium zur Bestimmung von elementspezifischen Löslichkeitsgrenzen aus Löslichkeitsprodukten bei Anwesenheit von Hydroxylapatit, (Dr. R. **Gauglitz**, Freie Universität Berlin, Institut für Anorganische und analytische Chemie)

Im Rahmen des BMBF-Projekts "Bestimmung von Löslichkeitsprodukten endlagerrelevanter Elemente in gesättigten Salzlösungen in Gegenwart von Hydroxylapatit" sollten Löslichkeitsprodukte u. a. von Uranmineralien ermittelt werden. Ein Ab-

schlußbericht zu diesem Experimentalvorhaben liegt leider nicht vor. Im sicherheitsanalytischen Rechenprogramm EMOS werden jedoch Löslichkeitsgrenzen benötigt, die sich durch Umrechnung aus den Löslichkeitsprodukten ermitteln lassen. Dafür sind drei Schritte notwendig:

- Charakterisierung des chemischen Milieus
- Ermittlung der Phosphat-Konzentration in Lösung bedingt durch die Anwesenheit von Hydroxylapatit
- Berechnung der löslichen Mengen des betrachteten Elements unter Berücksichtigung hoher Ionenstärken

Vor diesem Hintergrund wurde ein Unterauftrag an Dr. Gauglitz (FU-Berlin) vergeben. Ziel des Auftrages war es, entsprechend den oben angegebenen Punkten eine Vorgehensweise zur Bestimmung von Löslichkeitsgrenzen aus Löslichkeitsprodukten zu erarbeiten und am Beispiel des Urans sowie ggf. anderer relevanter Elemente zu demonstrieren. Dies sollte auf der Basis des o. g. BMBF-Projekts erfolgen.

Im Bericht wurden zuerst die in der Literatur gefundenen Löslichkeitsprodukte für Uranphosphate den im experimentellen Vorhaben ermittelten gegenübergestellt. Es ergaben sich starke Schwankungen, die erklärungsbedürftig sind. Weiterhin wurden Speziationsrechnungen von Uran mit einer kommerziellen Datenbasis zur Ermittlung der Löslichkeit durchgeführt.

Zusammenfassend ist festzustellen:

A) System ohne Hydroxylapatit

- Unter oxidierenden Bedingungen liegen die Löslichkeitsgrenzen von Uran zwischen 10^{-4} und 10^{-7} mol/l.
- Unter reduzierenden Bedingungen liegen die Löslichkeitsgrenzen von Uran zwischen 10^{-10} mol/l und 10^{-16} mol/l.
- Die Löslichkeit ist bei pH 6 - 7 am geringsten.
- Das löslichkeitbestimmende Mineral ist immer Schöplit.

B) System mit Hydroxylapatit

- Unter oxidierenden Bedingungen wird die Löslichkeitsgrenze um ca. eine Zehnerpotenz reduziert.
- Unter reduzierenden Bedingungen liegt die Löslichkeitsreduktion bei ca. drei bis sechs Zehnerpotenzen.
- Je nach den weiteren Bedingungen treten unterschiedliche löslichkeitbestimmende Mineralien, wie Triuranylphosphat, Hydrogenuranylphosphat, Autunit, Saleit, Schöpit, Ningyoit, Uraninit auf.

Abschließend wurden allgemeine Aussagen zur Abschätzung von Löslichkeitsgrenzen aus Expertenwissen gemacht und es wird auf dabei auftretende Probleme hingewiesen.

Das Ziel des Unterauftrages wurde nicht erreicht. Eine Vorschrift zur Ermittlung von Löslichkeitsgrenzen aus Löslichkeitsprodukten konnte nicht angegeben werden. Als Ergebnis zur Verwendung in Langzeitsicherheitsanalysen zählt lediglich die Aussage über die Löslichkeitsreduktion, die bereits auf Basis von EQ3/6-Rechnungen mit älteren Daten gemacht wurde und nicht auf den Ergebnissen der Experimente beruht.

4.4 Verhalten von geotechnischen Barrieren

Nachfolgend wird im wesentlichen auf die Ergebnisse des Projektes DEBORA [59] eingegangen, das im Jahr 2000 zum Abschluß kommt.

Ziele des DEBORA Projekts waren die Ermittlung der mechanischen und hydraulischen Eigenschaften von Verschlusssystemen aus Salzgrus unter Wärmeeinfluß sowie die Untersuchung der Wechselwirkungen des Verschlusses mit dem umliegenden Steinsalzgebirge. Die Gültigkeit der in den Rechenprogrammen verwendeten Modellansätze sollte sowohl durch In-situ- als auch durch Laborversuche überprüft werden. Von besonderem Interesse waren dabei die konstitutive Gleichung der temperatur- und druckabhängigen Salzgruskompaktion und die vom Kompaktionsgrad abhängige Permeabilität und Porosität.

Es wurden zwei In-situ-Versuche durchgeführt. Das erste Experiment ist schematisch in Abbildung 4.1 dargestellt und zielte auf die Untersuchung eines mit Salzgrus verfüllten Ringspalts um eine simulierte HAW-Kokillensäule ab. Das zweite Experiment bildete die Verhältnisse im Bohrlochverschluß oberhalb einer simulierten Kokillensäule nach. Mit den beiden In-situ-Experimenten liegt eine abgeschlossene und ausgewertete, großmaßstäbliche Untersuchung der oben genannten Stoffgesetze vor.

Der Vergleich zwischen Messungen und Modellergebnissen zeigt, daß der derzeit verwendete Ansatz für die Salzgruskompaktion noch einige Unzulänglichkeiten aufweist. Die thermomechanischen Modellrechnungen zu den DEBORA-Versuchen lieferten zu große Kriechverformungen und damit einhergehend zu niedrige Spannungen im Salzgrus. Darüber hinaus ergab der vom Prinzip her ähnlich angelegte aber im größeren Maßstab durchgeführte VVS-Versuch für versetzte Strecken, daß auch die Temperaturabhängigkeit des Kompaktionsvorganges von den Modellansätzen noch nicht ganz richtig erfaßt wird.

Die prognostizierten und die gemessenen Konvergenzraten der DEBORA-Versuche stimmen im Porositätsbereich unterhalb von 20% gut überein. Diese für Langzeitsicherheitsanalysen wichtige Größe kann demnach recht gut vorhergesagt werden. Um allerdings das Porenraumvolumen genauer angeben zu können, müßte die Kompaktion zu Beginn der Versuche besser beschrieben werden.

Durchströmungstests zur Bestimmung der Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung wurden in allen Experimenten durchgeführt. Die In-situ-Versuche erstreckten sich auf Porositätswerte bis zu 8 %. Daten für eine noch stärkere Kompaktion bis zum festen Steinsalz lieferten die Laborversuche. Die Messungen decken insgesamt einen Bereich von 25 % bis 1 % Porosität ab.

Die auf verschiedenen Wegen gewonnenen Daten sind überraschend gut miteinander vereinbar. In der doppellogarithmischen Darstellung liegen alle Werte mit sehr geringer Abweichung auf einer Geraden. Die Steigung dieser Geraden - ein charakteristischer Parameter für die Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung - ist dabei konsistent mit den von Müller-Lyda et al. ([34], vgl. auch Kap. 2.1) zusammengetragenen Daten für Salzgrus.

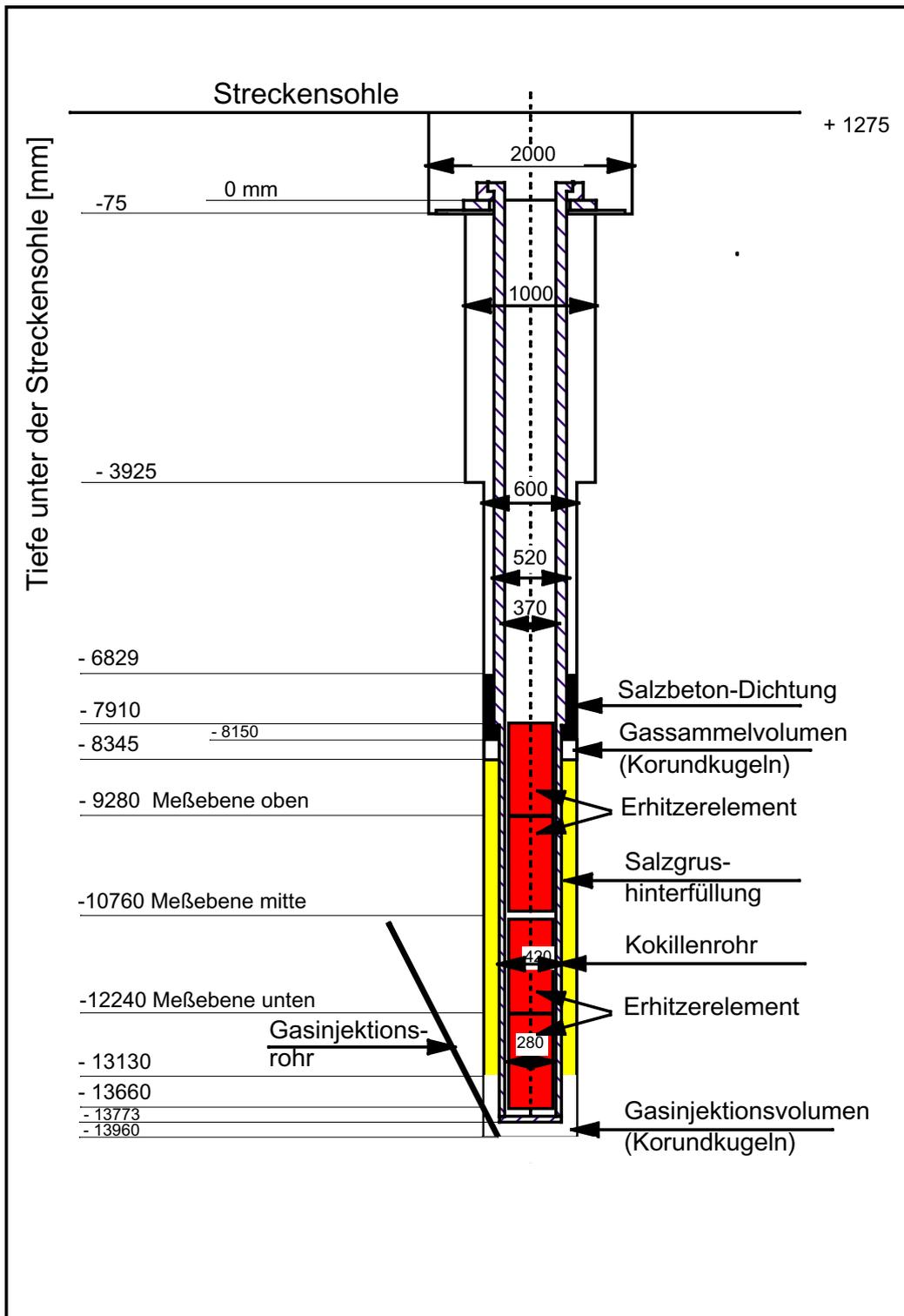


Abb. 4.1: Schematische Darstellung von Experiment DEBORA 1

Das Vorhaben der GRS "Untersuchung der Langzeit-Dichtwirkung von Bohrlochverschlüssen aus Salzgrus - DEBORA Phase II" wurde sowohl vom BMWi [59] als auch im Rahmen des Projektes "Backfill and Material Behaviour in Underground Salt Repositories (BAMBUS)" [5] von der Europäischen Union gefördert.

4.5 Verhalten von geologischen Barrieren

Zu diesem Themenbereich wurde in 1998 das Projekt FKZ: 2E 8583 3: "Untersuchung der Übertragbarkeit von Labordaten (Löslichkeiten und Sorptionskoeffizienten) auf natürliche Verhältnisse am Beispiel von Gorleben Aquifer-Systemen" (Prof. J.I. Kim, Institut für Radiochemie der TU-München) abgeschlossen.

Das mit dem Projekt verfolgte Ziel bestand darin, auf Basis von thermodynamischen Daten aus Laborexperimenten die Speziation eines Elements für natürliche Sediment-Grundwassersysteme zu berechnen und mit der in situ beobachteten zu vergleichen. Die Untersuchungen wurden für die Elemente Am, Cm, Th, U, Pu und Np durchgeführt. Aufgrund ihres chemischen Verhaltens wurde zwischen 3-, 4-, 5- und 6-wertigen Actinoiden unterschieden.

Für dreiwertige Actinoide (Am(III), Cm(III)) existiert eine umfangreiche thermodynamische Datenbasis. Die relevanten Reaktionen in natürlichen Aquiferen sind die Hydrolyse, die Carbonat- und die Humatkomplexierung. In neutralen und schwach alkalischen, carbonathaltigen Lösungen spielen die ternären Komplexe $An(OH)HA$, $An(OH)_2HA$, $An(CO_3)HA$ eine wichtige Rolle. Daher wurden für diese Komplexe Stabilitätskonstanten bestimmt und bei der Speziation berücksichtigt. Damit konnten die mobilen Konzentrationen dreiwertiger Actinoiden in natürlichen Wässern sehr gut beschrieben werden. Der Einfluß der Ionenstärke konnte über die Abhängigkeit der Beladungskapazität beschrieben werden.

Für vierwertige Kationen (Th(IV), Pu(IV), Np(IV)) ist die Ermittlung fundierter thermodynamischer Daten aufgrund der Bildung von Eigenkolloiden stark erschwert. Die die Kolloidbildung bestimmenden Parameter sind noch nicht ausreichend bekannt und wurden in einzelnen Experimenten nicht berücksichtigt, weshalb die thermodynamische Datenbasis eine sehr große Streubreite besitzt und derzeit noch nicht belastbar ist.

Für fünfwertige Kationen (Am(V), Pu(V)) wurden beispielhaft die Löslichkeitsprodukte für relevante Festphasen im Kontakt mit salinaren Lösungen bestimmt. In natürlichen, huminstoffhaltigen Sediment-Grundwasser-Systemen spielt insbesondere bei hohen Huminstoffkonzentrationen die Reduktion eine wichtige Rolle, im Fall von Am(V) zu Am(III) und von Pu(V) zu Pu(IV). Außerdem wurden Komplexbildungskonstanten für die Phosphatkomplexierung bestimmt. Detaillierte Aussagen zur Übertragbarkeit auf natürliche Systeme wurden nicht gemacht.

Für sechswertige Kationen (U(VI), Pu(VI)) wurden Löslichkeitsprodukte von Pu-Carbonaten sowie Komplexbildungskonstanten für Pu- und U-Carbonato-Spezies ermittelt und mit Literaturwerten verglichen. Die Speziation zeigt, daß die Löslichkeit bei niedrigen pH-Werten vom Pu-Hydroxid bestimmt wird. Alle Experimente wurden aber in reinen Modellsystemen (0,1 molare NaClO₄-Lösung) durchgeführt. Hinsichtlich der Komplexierung von Uran(VI) mit Huminsäuren wurde anhand von Experimenten bei pH 4 gezeigt, daß sich die U(VI)-Humat-Wechselwirkung mit dem gleichen Modell wie die Komplexierung der dreiwertigen und fünfwertigen Actinoiden beschreiben läßt. Bei höheren pH-Werten spielt die Spezies UO₂(OH)HA eine viel größere Rolle als die UO₂(CO₃)HA-Spezies.

Zusammenfassend ist zu sagen, daß die Datenbasis für dreiwertige Actinoiden gut ist, und daß deren Verhalten in natürlichen Systemen auch unter Berücksichtigung ternärer Komplexe mit Huminstoffen mittels thermodynamischer Daten gut beschrieben werden kann. Für 4- 5- und 6-wertige Actinoide können dagegen noch keine Aussagen zur Übertragbarkeit auf Natursysteme gemacht werden. Insbesondere bei vierwertigen Actinoiden sind die Daten noch unzureichend und aufgrund der Bildung von Eigenkolloiden deren Ermittlung schwierig.

4.6 Methoden und Rechenprogramme für Sicherheitsbewertungen

Neben der in Kapitel 2.4 bereits beschriebenen Neuentwicklung von sicherheitsanalytischen Rechenmodulen für Endlager in Hartgestein wurden mit Experten von BfS und dem Institut für Strahlenschutz der GSF Modifikationen und Erweiterungen für zukünftig zu verwendende Biosphärenmodelle abgestimmt.

Die derzeitige Biosphären-Modellierung erfolgt nach der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift (AVV) [1]. Darin werden Vorgaben für die einzubeziehenden Expositionspfade gemacht. Entsprechend wird die Strahlenexposition für einzelne Individuen berechnet. Unsicherheiten werden nicht berücksichtigt. Ein Vergleich mit Biosphärenmodellen anderer Länder zeigt, daß folgende Punkte wichtig sind:

- Die Nuklidfreisetzung aus der Geosphäre erfolgt in unterschiedliche Wassersysteme (Brunnen, Fluß, See). In Abhängigkeit vom Wassersystem ergeben sich z.T. erhebliche Unterschiede in den Verdünnungsfaktoren.
- In anderen Studien werden z. T. auch Kollektivdosen berechnet. Die berechnete Dosis ist stark abhängig von den Charakteristika der strahlenexponierten Gruppe, die unterschiedlich groß - von ca. 25 Personen bis zu einer Gemeinde von 800 Personen - gewählt werden.

Vor diesem Hintergrund wird empfohlen, neben der Modellierung nach der AVV zukünftig auch unterschiedliche Szenarien zu berücksichtigen. Es wurden drei Szenarien identifiziert, die für Sicherheitsanalysen von Endlagern in Salzstöcken der norddeutschen Tiefebene relevant sein können. Diese begründen sich auf das Vorhandensein unterschiedlicher Wasserentnahmegebiete. Je nach Gebiet sind verschiedene Prozesse relevant.

1. Wasserentnahme im Grundwasseraufstiegsgebiet

- Das Wasser wird aus oberflächennahen Brunnen entnommen. Dabei tritt ein gewisser Verdünnungseffekt durch oberflächennahe Wässer auf. Beispielsweise wurde bei der Sicherheitsanalyse für das Endlager Konrad eine Verdünnung von $10^5 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{a}^{-1}$ angenommen, was einer Neubildung von 100 mm/a entspricht.

- Die in typischen Wiederaufstiegsgebieten in der norddeutschen Tiefebene auftretenden Kleie-Böden sind sehr wasserhaltig. Eine Beregnung von Weiden ist aus diesem Grund nicht notwendig und wird als Expositionspfad nicht berücksichtigt. Eine Kontamination von Weideflächen tritt aber durch Kapillaraufstieg aus dem oberflächennahen Aquifer auf.
- Die Beregnung von Gärten wird berücksichtigt.
- Fischzucht in Teichen sollte berücksichtigt werden. Es ist zu klären, ob die Nuklidkonzentration im Teichwasser durch Niederschlag beeinflusst wird, oder ob sich Wassereintrag und Evaporation die Waage halten.
- Bei dem Pfad der externen Exposition soll zukünftig die Aufenthaltszeit auf 24 Stunden pro Tag erhöht werden, wodurch der Pfad "Exposition durch kontaminierte Baustoffe" [53] mitberücksichtigt wird.
- Die Verwendung als Trinkwasser und Wasser für eine Viehtränke wird berücksichtigt.

2. Wasserentnahme im Grundwasserneubildungsgebiet

- Hier ist zu berücksichtigen, daß Brunnen in tieferliegende Aquifere gebohrt werden. Die Verdünnung läßt sich anhand typischer Pumpraten von $2-5 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ von Wasserwerken in entsprechenden Regionen ermitteln. Der genannte Wert entstammt Angaben der Wasserwerke Wolfsburg und Fuhrberg.
- Anhand von Grundwasserrechnungen sollte überprüft werden, welchen beschränkenden Einfluß die Salinität auf die Grundwassergewinnung hat. Daraus ergibt sich ggf. die Verwendung eines weiteren Verdünnungsfaktors.
- Die Beregnung landwirtschaftlich genutzter Flächen muß berücksichtigt werden.
- Da Fischzucht in einem Grundwasserneubildungsgebiet nicht sinnvoll ist, wird dieser Expositionspfad nicht berücksichtigt.

3. Wasserentnahme aus einem Vorfluter (Fluß)

- Für die Verdünnung der Nuklidkonzentrationen müssen die jährlichen Abflußmengen berücksichtigt werden.
- Bei diesem Szenario sind alle Expositionspfade der AVV zu berücksichtigen.

Um Variationsbreiten für Dosiskonversionsfaktoren aufzuzeigen, die durch die Lebensgewohnheiten von strahlenexponierten Personen bedingt sind, ist ein heute typischer Verbraucher aus dem ländlichen Bereich zu betrachten, der als "Mischversorger" bezeichnet wird. Seine Ernährung bezieht er zu einem nennenswerten Anteil nicht aus örtlicher Produktion sondern über die üblichen Handelsketten.

Die GSF wird für alle drei Szenarien mathematische Modelle erarbeiten und Dosiskonversionsfaktoren berechnen. Für den Mischversorger werden die in der AVV verwendeten Modelle entsprechend modifiziert und ebenfalls Dosiskonversionsfaktoren berechnet. Zusätzlich wird auch der Effekt der inaktiven Isotope ^{12}C und ^{127}I auf die Dosis von ^{14}C , bzw. ^{129}I abgeschätzt. Die Dosiskonversionsfaktoren für die jeweiligen Szenarien sollen später für die Berechnungen der Dosisbelastungen im Rahmen einer integrierten Langzeitsicherheitsanalyse verwendet werden. Damit können deren Auswirkungen gegenüber dem bisher in Langzeitsicherheitsanalysen betrachteten Szenario [1] beurteilt werden.

4.7 Validierung von Modellen, Unsicherheitsanalyse

Im Rahmen des EU-Projekts "Conceptual and Computational Tools to Tackle Long-Term Risk from Nuclear Waste Disposal in the Geosphere (GESAMAC)" wurden von 1996 bis 1998 Methoden für globale Sensitivitätsanalysen untersucht und weiterentwickelt. Diese Methoden werden beispielsweise bei probabilistischen Modellrechnungen im Rahmen von Langzeitsicherheitsanalysen angewandt. Ziel derartiger Sensitivitätsanalysen ist, die Auswirkungen der Eingangsparameter eines gegebenen Modells auf das Endergebnis zu ermitteln. Die globale Sensitivitätsanalyse zielt speziell darauf ab, die Unsicherheit der Ergebnisgröße eines Modells bezüglich der Unsicherheit der Eingangsgrößen zu quantifizieren. Oft verwendete Methoden legen Regressions- und Korrelationsverfahren zugrunde. Andere Methoden basieren auf der Varianzanalyse, die beispielsweise beim Fourier-Amplituden-Sensitivitätstest oder der Sobol-Methode eingesetzt wird. Diese auf Varianz basierenden Methoden schätzen, wie stark die Variabilität der Ergebnisgröße von jeder einzelnen Eingangsgröße bzw. von deren Kombinationen abhängt.

Im Projekt GESAMAC wurde eine neue Methode für Sensitivitätsanalysen konzipiert. Diese ebenfalls auf Varianz basierende Methode stellt eine Weiterentwicklung des Fourier-Amplituden-Sensitivitätstests (FAST) dar und ist den existierenden Methoden, mit Ausnahme der Sobol-Methode, überlegen, da sie die Berechnung des Gesamtbeitrags jeder Eingangsgröße an der Varianz der Ergebnisgröße ermöglicht. Hierbei ist unter Gesamtbeitrag sowohl der Einzelbeitrag der Eingangsgröße als auch deren Beitrag durch die Wechselwirkung mit anderen Eingangsgrößen zu verstehen.

Diese neue quantitative Methode erlaubt eine vollständige Zerlegung der Ausgangsvarianz. So kann man Aussagen beispielsweise darüber machen, zu welchem Anteil die Eingangsgröße A zur Ergebnisvarianz beiträgt, oder auch, bezogen auf eine Menge, in welchem Maße die Eingangsgrößen A, B und C zusammen die Ergebnisvarianz bestimmen. Alle anderen globalen Methoden, wie die Verfahren, die auf Korrelation oder Regression basieren, liefern bestenfalls ein qualitatives Bild.

Eine Quantifizierung der Sensitivität wird auch von der Sobol-Methode geliefert, obwohl deren Berechnung komplett anders erfolgt. Beide Methoden, erweiterte FAST und Sobol, liefern aber die gleiche Vorhersage. Zudem haben beide Verfahren den Vorteil, daß sie auch bei nichtlinearen bzw. nicht monotonen Zusammenhängen zwischen Modelleingang und Modellergebnis angewendet werden können. In solchen Fällen versagen die auf Korrelation oder Regression bzw. auf Rängen basierenden Methoden.

Der Vorteil der erweiterten FAST-Methode gegenüber der Sobol-Methode ist ihre Robustheit, das heißt die Fähigkeit zur Reproduktion der Vorhersage, insbesondere auch bei kleinen Stichproben. Zudem zeichnet sich die erweiterte FAST-Methode gegenüber der Sobol-Methode durch ihre numerische Überlegenheit aus. Für die probabilistischen Modellrechnungen wird daher im Rahmen des Projekts "Aktualisierung sicherheitsanalytischer Rechenprogramme für Teilsysteme eines Endlagers (ARTE), FKZ 02 E 9187" die erweiterte FAST-Methode in das Rechenprogramm EMOS als statistische Methode integriert.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen des FuE-Vorhabens wurden neue Erkenntnisse aus nationalen und internationalen Arbeiten über wichtige Effekte und Abläufe, die im Rahmen eines Langzeitsicherheitsnachweises für Endlager von Relevanz sind, aufbereitet und ausgewertet. Darauf aufbauend wurden Modellansätze und Daten dem aktuellen Stand der Forschung angepaßt und das sicherheitsanalytische Instrumentarium weiterentwickelt. Wichtige sicherheitsrelevante Fragestellungen wurden identifiziert und notwendiger FE-Bedarf aufgezeigt. Zusammengefaßt werden die Themen dargestellt, bei denen deutliche Fortschritte erzielt wurden.

Zum Thema Permeabilität von Salzgrus in Abhängigkeit der Porosität“ lagen aufgrund zwischenzeitlich abgeschlossener Versuchsprogramme zahlreiche neue Labordaten vor. Auf dieser breiten Datenbasis konnten neue Permeabilitäts-Porositätsrelationen für Salzgrus mit erweitertem Gültigkeitsbereich über Regressionen nach der totalen Porosität abgeleitet werden. Damit wird auch der für Langzeitsicherheitsanalysen relevante Bereich niedriger Porositäten bis hin zu 0,3% abgedeckt. Offen ist noch der Zusammenhang zwischen effektiver Porosität und Permeabilität bei sehr niedrigen Porositäten. Die derzeit vorhandenen Daten reichen für eine Regressionsanalyse mit einem verfeinerten Modell, in dem zwischen totaler und effektiver Porosität unterschieden wird, noch nicht aus.

Für die Beschreibung der Permeabilität von Auflockerungszonen wurde ein erster Modellansatz erarbeitet, der die kurzzeitigen Permeabilitätsänderungen von Steinsalz unter Gebirgsdruckeinfluß beschreibt. Für die Modellierung des Prozesses über lange Zeiträume liegt allerdings noch keine ausreichend abgesicherte Relation vor.

Die Ergebnisse aus dem In-situ-Projekt DEBORA mit erreichten Porositäten von bis zu 8% stützen die aus Labordaten abgeleiteten Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung für feuchten Salzgrus. Dagegen zeigt der Vergleich der Messungen mit den Modellergebnissen, daß der derzeit verwendete Ansatz für die Salzgruskompaktion noch einige Unzulänglichkeiten aufweist. Die Kriechverformungen und die Temperaturabhängigkeit des Kompaktionsvorganges werden von den bisherigen Modellansätzen noch nicht befriedigend wiedergegeben.

Das Thema "Gase in salinaren Endlagern" wurde im Rahmen eines Workshops behandelt. Die Prozesse zur Gasbildung sind weitgehend erfaßt. Noch nicht ausreichend bekannt sind die Auswirkungen der Gasbildung auf das chemische Milieu. Modelle für die Zwei-Phasenströmung, mit denen der Gas- und Laugentransport im Falle eines Laugenzutritts simuliert werden kann, sind verfügbar. Allerdings müssen sie auch Wechselwirkungen des Gastransports mit geomechanischen und chemischen Prozessen abbilden können. Der derzeit internationale Stand zur Gasproblematik und Zweiphasenmodellierung wurde für alle relevanten Gesteinsformationen in einem Status-Bericht der OECD/NEA zusammengestellt.

Das Thema "Quellterme für unterschiedliche radioaktive Abfälle" wurde vom Institut für nukleare Entsorgung (INE) des FZK wurden im Rahmen eines Auftrags des Bundesamt für Strahlenschutz bearbeitet. Mit den Ergebnissen wurden erste Beispielrechnungen durchgeführt. Bei den Quelltermen für HAW-Glas, abgebrannte LWR-Brennelemente und Zement wurden die bislang verwendeten Modelle abgesichert und erweitert. Die aktualisierten Parameter bewirken gegenüber den bisherigen generell langsamere Radionuklidfreisetzungen. Eine endgültige Dokumentation der neuen Quellterme soll in 2000 vorliegen.

Zum kolloidbeeinflußten Nuklidtransport im Fernfeld eines Endlagers wurden die neu ermittelten Daten zur Wechselwirkung dreiwertiger Actinoide mit Huminstoffen ausgewertet und daraus Eingangparameter für das Transportprogramm TRAPIC abgeleitet. Damit konnten die Ergebnisse zum Actinoidentransport in Säulen zufriedenstellend beschrieben werden. Das Transportverhalten 4-, 5- und 6-wertiger Actinoiden in huminstoffreichen Grundwässern ist noch nicht im gleichen Detail untersucht. Hierzu werden vom FZK-INE derzeit weitere Forschungsarbeiten durchgeführt.

Zur "Weiterentwicklung sicherheitsanalytischer Instrumentarien" wurde das von der Europäischen Kommission anteilig geförderte Projekt "Spent Fuel Performance Assessment (SPA)" durchgeführt. Dabei wurden die Rechenprogramme für Endlager in Granitformationen weiterentwickelt. Neue Rechenmodule wurden anhand von Vergleichsrechnungen mit Programmen anderer Länder verifiziert. Für ein hypothetisches deutsches Endlager wurden eine erste Langzeitsicherheitsanalyse durchgeführt und die Ergebnisse im internationalen Rahmen diskutiert. Die grundsätzliche Sicherheit des

Endlagersystems konnte unter der angenommenen Endlagerauslegung, der gewählten technischen Barrieren und der abgeschätzten granitspezifischen geologischen Situation demonstriert werden.

Der im europäischen Projekt GESAMAC entwickelte Statistik-Postprozessor wurde zur Verwendung für Sensitivitätsanalysen im Programmpaket EMOS vorbereitet. Er soll im Rahmen des Projekts "Aktualisierung sicherheitsanalytischer Rechenprogramme für Teilsysteme eines Endlagers (ARTE)" implementiert werden.

Das Thema "langfristige klimatische Änderungen" findet bisher in deutschen Sicherheitsanalysen keine Berücksichtigung. Die Langzeitrechnungen basieren auf unveränderten Verhältnissen, wie sie heute bezüglich Geologie, Hydrologie und Klima bekannt sind. In einem ersten Schritt wurden die in internationalen Sicherheitsanalysen berücksichtigten zukünftigen Langzeit-Veränderungen des Endlagersystems zusammengestellt und ausgewertet. Dabei wurde insbesondere der Stand der Modellierung klimatischer Änderungen mit der Ausbildung von Eiszeiten dargestellt. Es wird empfohlen, in einem FuE-Vorhaben die Übertragbarkeit der klimatischen Änderungen auf deutsche Verhältnisse zu überprüfen und geeignete Kriterien für die Definition relevanter Szenarien zu ermitteln. Darauf aufbauend wären konzeptuelle Modelle und Modellansätze für die Behandlung klimatischer Änderungen in Langzeitsicherheitsanalysen zu entwickeln.

Im Hinblick auf die "Absicherung sicherheitsanalytischer Erkenntnisse" geht das Bestreben dahin, vermehrt Studien zu natürlichen Analoga in den Langzeitsicherheitsnachweis für Endlager einzubeziehen. Entsprechend wurde die internationale Studie ASARR hinsichtlich des geochemischen Verhaltens von Radionukliden in natürlichen Systemen ausgewertet. Die Studie hat gezeigt, daß am Standort "Alligator Rivers" die Sorption an Eisenoxid den dominierenden Rückhaltemechanismus darstellt. Durch die Weiterentwicklung der Oberflächenkomplexmodelle zur Beschreibung der Uransorption an Eisenoxid und Quarz konnte das mechanistische Verständnis dieses Effektes stark verbessert werden. Eine Umsetzung in Rechencodes für integrierte Sicherheitsanalysen ist bisher noch nicht erfolgt. Die derzeitige Rolle der Oberflächenkomplexmodelle besteht hauptsächlich in der Absicherung der in Sicherheitsnachweisen verwendeten Sorptionsdaten.

Zur Bearbeitung der noch offenen Fragestellungen ist die Verfolgung nationaler und internationaler Arbeiten auf dem Gebiet der Endlagersicherheitsforschung weiterhin von großer Bedeutung. Ebenso ist die Mitarbeit in den internationalen Gremien notwendig, um die Grundlagen der Sicherheitsphilosophie und der sicherheitsanalytischen Instrumentarien für deutsche Endlager dem internationalen Stand anzupassen. Dabei stehen die Arbeiten der OECD/NEA und ihrer Untergruppen im Vordergrund des Interesses, ebenso wie wichtige Tagungen und Workshops. In diesem Zusammenhang ist die Beteiligung an der dritten Phase der „Integrated Performance Assessment Group“ zur Steigerung der Vertrauensbildung in Langzeitsicherheitsnachweise ebenso zu nennen, wie die weitere Verfolgung des Projektes BIOMASS, das in 2001 mit der Entwicklung von fünf Referenzbiosphären abgeschlossen werden soll. Die Übernahme von Referenzbiosphären in die deutschen Rechenprogramme ist zur besseren Vergleichbarkeit von Langzeitsicherheitsanalysen im internationalen Rahmen wichtig.

6 Literatur

- [1] Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu §45 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen (21. Februar 1990). Erschienen im Bundesanzeiger, 42. Jg., Nummer 64a (1990).

- [2] Atomic Energy Control Board of Canada: Regulatory objectives, requirements and guidelines for the disposal of radioactive wastes - Long term aspects. Regulatory Document AECB-R-104, Ottawa, Canada (1987).

- [3] Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz: "Erstellung eines integrierten Nahfeldmodells von Gebinden hochradioaktiver Abfälle im Salzstock Gorleben: Geochemisch fundierter Quellterm für HAW-Glas, abgebrannte Brennelemente und Zement".

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

- [5] W. Bechthold, T. Rothfuchs, A. Poley, M Ghoreychi, S. Heussermann, A. Gens, S. Oliviella: Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS Project). EUR 19124 EN, 1999.

- [6] A. Berger, H. Gallée, J.L. Mélice: The Earth´s future Climate at the astronomical Timescale. In: Proceedings of the International Workshop on Future Climate Change and Radioactive Waste Disposal. Goodess, C.M.; Palutikov, J.P. (ed). Norwich, November 1989. Nirex Safety Series, NSS/R257, pp 148-165.

- [7] P.L. Blanc, P. Escalier des Orres, J.P. Vervialle: The French Approach to Studies of Climate Change and Radioactive Waste Disposal. In: Proceedings of the International Workshop on Future Climate Change and Radioactive Waste Disposal. Goodess, C.M.; Palutikov, J.P. (ed). Norwich, November 1989. Nirex Safety Series, NSS/R257, pp 77-87.

- [8] G. Buckau: Komplexierung von Americium (III) mit Huminstoffen in natürlichen Grundwässern. Dissertation, Freie Universität Berlin, 1991.

- [9] D. Buhmann, A. Nies, R. Storck: Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagerkonzepten für wärmeerzeugende radioaktive Abfälle. GSF-Bericht 27/91. GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, Braunschweig 1991.

- [10] R.G. Craig: The US Approach to Studies of Climate Change and Radioactive Waste Disposal. In: Proceedings of the International Workshop on Future Climate Change and Radioactive Waste Disposal. Goodess, C.M.; Palutikov, J.P. (ed). Norwich, November 1989. Nirex Safety Series, NSS/R257, pp 88-94.

- [11] J.A. Davis, I.A. Costner, D.B. Kent, C.C. Fuller: Application of the Surface Complexation Concept to Complex Mineral Assemblages. Environ. Sci. Technol. **32**, 2820-2828 (1998).

- [12] Disposal of Radioactive Waste: Can Long-term Safety be Evaluated? An International Collective Opinion. OECD Nuclear Energy Agency, Paris 1991.

- [13] E. Fein, I. Müller-Lyda, R. Storck: Ableitung einer Permeabilitäts-Porositätsbeziehung für Salzgrus und Dammbaumaterialien. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-132, Braunschweig 1996.

- [14] D.Flach, R. Miehe, K. Wieczorek, U. Zimmer: Untersuchung der Barrierewirksamkeit des Gesteinsverbandes Steinsalz/Anhydrit/Salzton (BARITON). Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-160, Braunschweig 1999.

- [15] C.M. Goodess, J.P. Palutikov: Proceedings of the International Workshop on Future Climate Change and Radioactive Waste Disposal. Norwich, November 1989. Nirex Safety Series, NSS/R257.

- [16] B.W. Goodwin, D.B. McConell, T.H. Andres, W.C. Hajas, D.M. Le Neveu, T.W. Melnyk, G.R. Shermann, M.E. Stephens, J.G. Szekely, P.C. Bera, C.M. Cosgrove, K.D. Dougan, S.B. Keeling, C.J. Kitson, B.C. Kummen, S.E. Oliver, K. Witzke, L. Wojciechowski, A.G. Wikjord: The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: Postclosure Assessment of a Reference System. AECL-10717. August 1994.
- [17] B. Grambow, W. Bernotat, M. Kelm, B. Kienzler, B. Luckscheiter: HAW-Glas: Auslaugverhalten und Freisetzung von Radionukliden. Abschlußbericht (Entwurf) im Auftrag des BfS, FZK-INE 07/99.
- [18] B. Grambow: Vorläufiger Quellterm LWR-Brennstoff zur Beschreibung der Korrosion im integrierten Nahfeldmodell. FZK-INE 08/98.
- [19] Japan Nuclear Cycle Development Institute: H12 Project to Establish Technical Basis for HLW Disposal in Japan. Supporting Report 1. Geological Environment in Japan. JNC TN1 400-99-011, May 1999.
- [20] D.B. Kent, R.H. Adams, J.A. Davies, J.A. Coston: Modeling the transport of Zinc under variable chemical conditions in a contaminated aquifer (to be published).
- [21] J. I. Kim, B. Delakowitz, P. Zeh, X. Lin, U. Ehrlicher, C. Schauer, T. Probst: Colloid Migration in Groundwaters: Geochemical Interactions of Radionuclides with Natural Colloids. Report EUR 16754 EN, chap. 1, 21-89, European Commission, Brüssel, 1996.
- [22] J. I. Kim, B. Delakowitz, P. Zeh, D. Klotz, D. Lazik: A column experiment for the study of colloidal radionuclide migration in Gorleben aquifer systems. Radiochim. Acta, **66/67**, 165-171, 1994.
- [23] Klotz, D.: Transport von ^{152}Eu -Kolloiden in einem System Feinsand/huminstoffhaltiges Wasser. GSF-Bericht 20/94, GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Neuherberg 1995.

- [24] L. Lührmann: Modellierung des kolloidbeeinflussten Schadstofftransports mit dem Rechenprogramm TRAPIC. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-149, Braunschweig 1999.
- [25] L. Lührmann, D. Klotz, P. Knabner, U. Noseck: TRAPIC: Simulation der Eu-humat Migration mit dem Rechencode TRAPIC. in: "Geochemische Modellierung - Radiotoxische und chemisch-toxische Stoffe in natürlichen aquatischen Systemen." FZK-Bericht FZKA6051, Karlsruhe 1998.
- [26] L. Lührmann, D. Klotz, P. Knabner, U. Noseck: Modellierung des kolloidgetragenen Stofftransports angewandt auf EU-Humat-Migrationsexperimente. in: "Uranium Mining and Hydrogeology II." Proceedings of the International Conference and Workshop, Freiberg, September 1998.
- [27] L. Lührmann, U. Noseck, C. Tix: Model of contaminant transport in porous media in the presence of colloids applied to actinide migration in column experiments. *Water Res. Res.* **34/3**, 421-426, 1998.
- [28] L. Lührmann, U. Noseck, R. Storck: Spent Fuel Performance Assessment (SPA) for a hypothetical repository in crystalline formations in Germany. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-154, Braunschweig 1999.
- [29] K.H. Lux: Mechanische und hydraulische Eigenschaften von Auflockerungszonen des konturnahen Gebirges in Verbindung mit der Planung von Damm- und Verschlussbauwerken im Salinar - Teil A: Mechanische Modellbildung und mechanisch-hydraulische Tragwerksanalyse. in: 4. Projektstatusgespräch zu FuE-Vorhaben auf dem Gebiet der Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen am 14. - 15. September 1999 im CUTEC-Institut in Clausthal-Zellerfeld. FZKA-PTE Nr. 6, Dezember 1999.
- [30] J. P. McCarthy, W. E. Sanford, P. L. Stafford: Lanthanide Field Tracers Demonstrate Enhanced Transport of Transuranic Radionuclides by Natural Organic Matter. *Env. Sci. Technol.* **32**, 3901-3906, 1998.

- [31] J. P. McCarthy, K. R. Czerwinski, W. E. Sanford, P. M. Jardine, J.D. Marsh: Mobilization of transuranic radionuclides from disposal trenches by natural organic matter. *J. Contam. Hydrol.* **30**, 49-77, 1998.
- [32] Ministère de l'Industrie et du Commerce Extérieur: Règle Fondamentale de Sûreté n° III.2.f Définition des Objectifs à retenir dans les phases d'études et de travaux pour la stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde. Paris 1993.
- [33] I. Müller-Lyda: Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz. Ableitung einer Relation zur Modellierung von Auflockerungszonen innerhalb von Langzeitsicherheitsanalysen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-151, Braunschweig 1999.
- [34] I. Müller-Lyda, H. Birthler, E. Fein: Ableitung von Permeabilitäts-Porositätsbeziehungen für Salzgrus. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-148, Braunschweig 1999.
- [35] I. Müller-Lyda (ed.): Erzeugung und Verbleib von Gasen in einem Endlager für radioaktive Abfälle. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-129, Braunschweig 1997.
- [36] Nagra: Kristallin I - Safety assessment report. Technical report 93-22, Juli 1994.
- [37] NIREX Ltd: Post-Closure Performance Assessment. Science Report. Approach to model development. Report. No S/95/010. Didcot, Oxfordshire, UK, 1995.
- [38] U. Noseck: Zusammenstellung und Auswertung geochemischer Untersuchungen zum Radionuklidverhalten aus ausgewählten Studien über Natürliche Analoga. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-155, Braunschweig 1999.
- [39] OECD/NEA: Systematic Approaches to Scenario Development. OECD Nuclear Energy Agency, Paris 1992.

- [40] OECD/NEA: International Peer Review of the 1996 Performance Assessment of the US Waste Isolation Pilot Plant (WIPP). Report of the NEA/IAEA International Review Group. OECD Nuclear Energy Agency, International Atomic Energy Agency, April 1997.

- [41] OECD/NEA: Disposal of Radioactive Waste: Lessons Learnt from Ten Performance Assessment Studies. OECD Nuclear Energy Agency, Paris 1997.

- [42] OECD/NEA: The Prediction of Radionuclide Migration in Geologic Media: Practical Approaches to the Resolution of Relevant Issues. Proceedings of the first GEOTRAP Workshop NEA/PAAG/DOC(95)2, Cologne, 3-5 April 1995.

- [43] OECD/NEA: Basis for Modelling the Effects of Spatial Variability on Radionuclide Migration. Synthesis of the second GEOTRAP Workshop. NEA/GEOTRAP(97)1, Paris 9-11 June 1997.

- [44] OECD/NEA: Proceedings of the SEDE-Workshop "Use of Hydrogeochemical Information in Testing Groundwater Flow Models". Borgholm, Schweden, 1.-3. September 1997.

- [45] OECD/NEA: Characterisation of Water-Conducting Features and their Representation in Models of Radionuclide Migration. Synthesis of the third GEOTRAP Workshop. NEA/GEOTRAP(98)1, Barcelona 10-12 June 1998.

- [46] OECD/NEA: Confidence in Models of Radionuclide Transport for Site-Specific Performance Assessment. Synthesis of the fourth GEOTRAP Workshop. NEA/GEOTRAP, Carlsbad, 14-17 June 1999 (in preparation).

- [47] OECD/NEA: Lessons Learnt From Ten Performance Assessment Studies. Working group on Integrated Performance Assessments of Deep Repositories. Nuclear Energy Agency, 1997

- [48] OECD/NEA: Lessons Learnt from Regulatory Reviews of Integrated Performance Assessments. Working Party on the Integrated Performance Assessments of Deep Repositories. NEA/IPAG/DOC(99)2, Paris April 1999.

- [49] OECD/NEA: Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories - Its Development and Communication. NEA/RWM/DOC(99)4, Paris September 1999.

- [50] OECD/NEA: The evolution of the case for geological disposal of radioactive waste in the last decade. A critical review. (in preparation)

- [51] OECD/NEA: SEDE Technical Position Paper. Justification of Going Underground for Testing, Characterisation and Demonstration. (in preparation)

- [52] R. Papp: GEISHA: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein. FZKA-PTE Nr. 3, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe 1997.

- [53] G. Pröhl, M. Baier: Dosiskonversionsfaktoren zur Berechnung der Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase von Endlagern nach den Allgemeinen Verwaltungsvorschriften zu §45 StrlSchV in Anlehnung an die Vorgehensweise im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens des geplanten Endlagers Konrad. Bericht GSF, Januar 1998.

- [54] G. Pusch: Mechanische und hydraulische Eigenschaften von Auflockerungszonen des Gebirges in Verbindung mit der Planung von Verschlussbauwerken im Salinar - Teil B: Hydraulische Modellbildung. in: 4. Projektstatusgespräch zu FuE-Vorhaben auf dem Gebiet der Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen am 14. - 15. September 1999 im CUTEC-Institut in Clausthal-Zellerfeld. FZKA-PTE Nr. 6, Dezember 1999.

- [55] The Radiation Protection and Nuclear Safety Authorities in Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden: Disposal of High Level Radioactive Waste. Consideration of some basic Criteria, 1992.

- [56] F. Recreo, A. García-Olivares-Rodríguez, A. Franco Herrero, C. Torres Vidal, P. Prado Herrero, C. Bojos Parada: Consideration of environmental changes in long-term radioactive waste disposal system evaluations. Final Report. EUR 16751 en, Luxembourg 1996.
- [57] S. Reeder, M.R. Cave, D.C. Entwisle, J.K. Trick: Extraction of water and solutes from clayey material: a review and critical discussion of available techniques. BGS Tech. Rep. WI/98/4C, 60, 1998.
- [58] W. R. Rodwell, A. W. Harris, S. T. Horseman, Ph. Lalieux, W. Müller, L. Ortiz Amaya, K. Pruess: Gas Migration and Two-Phase Flow Through Engineered and Geological Barriers for a Deep Repository for Radioactive Waste. A joint EC/NEA-Status Report. EUR 19122 EN, 1999.
- [59] T. Rothfuchs, H.-K. Feddersen, K.-P. Kröhn, R. Miehe, K. Wiczorek: The DE-BORA-Project: Development of Borehole Seals for High-Level Radioactive Waste - Phase II, Final Report, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS - 161, Köln 1999.
- [60] E. Sacchi, J.-L. Michelot: Extraction of Water and Solutes from Argillaceous Rocks: Methods and Current Interpretations. OECD/NEA, 1999.
- [61] M.I. Sheppard, B.D. Amiro, R. Zack: Continental glaciation and nuclear waste disposal: Canada's approach and assessment of the impact on nuclide transport through the biosphere. Ecol. Modelling 78, 249-266, 1995.
- [62] Statens Kärnkraftinspektion: SKI Project-90. Volume I. SWEDEN, SKI Technical Report 91:23, August 1991.
- [63] Statens Kärnkraftinspektion: SKI Site-94, Deep Repository Performance Assessment Project, . SKI Technical Report 96:36, Stockholm, December 1996.

- [64] R. Storck, D. Buhmann, R.-P. Hirsekorn, T. Kühle, L. Lührmann: Das Programmpaket EMOS zur Analyse der Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle. Version 5. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-122, Braunschweig 1996.
- [65] Svensk Kärnbränslehantering AB: SKB 91 - Final disposal of spent nuclear fuel. Importance of the bedrock for safety. SKB TR 92:20. May 1992.
- [66] P.N. Swift: Long-Term Variability at the Waste Isolation Pilot Plant, Southeastern New Mexico, USA, November 1992. Appendix CLI. Waste Isolation Pilot Plant Compliance Certification Application. US-DOE. Carlsbad, 1997.
- [67] C. Tweed, S. Altmann, J. Bruno, B. Ruegger: Sorption modelling activities coordinated by the NEA, Paris. Contribution for "Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere - Migration-99, Lake Tahoe, Nevada, 1999.
- [68] T. Vieno, A. Hautajärvi, L. Koskinen, H. Nordman: TVO-92 - Safety Analysis of spent Fuel Disposal. YJT-92-33 E. December 1992.
- [69] Title 40 CFR Part 191 Compliance Certification Application of the Waste Isolation Pilot Plant. Volume I and appendices. US Department of Energy, Carlsbad Area Office, Carlsbad 1996.
- [70] United States Environmental Protection Agency: Compliance Application Guidance for 40 CFR Part 194. EPA 402-R-95-014 March 29, 1996.
- [71] United States Department of Energy: Compliance Certification Application for the Waste Isolation Pilot Plant. DOE/CAO-1996-2184. Carlsbad, New Mexico, 1996.
- [72] US Nuclear Regulatory Commission: Criteria for the Certification and Re-Certification of the Waste Isolation Pilot Plant's Compliance with the 40 CFR Part 191 Disposal Regulations. Title 40 Code of Federal Regulations Part 194.

- [73] H. Van de Weerd, A. Leijnse: Parameter estimation for kinetic interactions during colloid-facilitated transport. ModelCARE 96: Calibration and reliability in ground-water modelling. Ed. K. Kovar & P. van der Heijde, IAHS Publication No. 237, 1996.
- [74] H. Wanner, I. Forest (eds.): Chemical Thermodynamics Volume 1. Chemical Thermodynamics of Uranium. OECD/NEA. North Holland Elsevier Science Publishers, Amsterdam 1992.
- [75] H. Wanner I. Forest (eds.): Chemical Thermodynamics Volume 1. Chemical Thermodynamics of Americium. OECD/NEA. North Holland Elsevier Science Publishers, Amsterdam 1995.
- [76] K. Wieczorek: Untersuchungen zur hydraulisch wirksamen Auflockerungszone um Endlagerbereiche im Salinar in Abhängigkeit vom Hohlraumabstand und Spannungszustand, FKZ 02 9118.
- [77] D.F. Williams, I. Lerche, W.E. Full: Isotope Chronostratigraphy. Theory and Methods. Academic Press Geology Series. San Diego 1988.
- [78] P. Zeh, J. I. Kim: Untersuchungen der Übertragbarkeit von Labordaten auf natürliche Verhältnisse am Beispiel von Gorleben Aquifer-Systemen: Chemische Reaktionen von Aktiniden mit Grundwasser-Kolloiden. Bericht, RCM 00994, TU München, 1994.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Schematische Darstellung der einzelnen im Rechenprogramm TRAPIC berücksichtigten Phasen.	15
Abb. 2.2	Für den Referenzfall eines potentiellen Endlagers in Granit berechnete jährliche Strahlenexposition.....	28
Abb. 2.3	Querschnitt durch den Uranerzkörper mit Dispersionsfahne am Standort Alligator Rivers.....	31
Abb. 2.4	Modellrechnungen zu früheren und zukünftigen Änderungen hydrogeologischer Bedingungen infolge wechselnder Eis- und Warmzeiten am Standort Äspo.....	45
Abb. 4.1	Schematische Darstellung von Experiment DEBORA 1.....	122

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1	Abgeleitete Koeffizienten der Dichtefunktion.....	6
Tabelle 2.2	Eingangsparameter für die Simulationen der Europium-Migration in huminstoffreichen Grundwässern mit dem Programm TRAPIC	16
Tabelle 2.3	Prozesse und Effekte im Nahbereich, und ihre Behandlung in ausgewählten Rechenprogrammen.....	23
Tabelle 2.4	Prozesse und Effekte im Fernfeld und ihre Behandlung in ausgewählten Rechenprogrammen.....	25
Tabelle 2.5	Berücksichtigung von zukünftigen Veränderungen des Endlagersystems in verschiedenen Sicherheitsstudien	40
Tabelle 3.1	Excavation Disturbed Zones in verschiedenen Wirtsgesteinen	59
Tabelle 3.2	Betrachtete Endlagerkonzepte	86

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Forschungsinstitute
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de