



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
Dieter Buhmann
Christine Fahrenholz
Eckhard Fein
Peter Hirsekorn
Sven Keesmann
Klaus-Peter Kröhn
Ingo Müller-Lyda
André Rübél
Anke Schneider
Richard Storck

Juli 2005

Anmerkung:

Die diesem Bericht zugrunde-
liegenden Arbeiten wurden mit
Mitteln des Bundesministerium
für Wirtschaft und Arbeit (BMWA)
unter dem Förderkennzeichen
02 E 9239 gefördert.

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

Die Verantwortung für den Inhalt
dieser Veröffentlichung liegt al-
lein bei den Autoren.

GRS - 204
ISBN3-931995-71-2

Deskriptoren:

Aktiver Abfall, Bergbau, Deutschland, Endlager, F+E, Felsformation, Internationale Zusammenarbeit, Kenndaten, Langzeitsicherheit, Sicherheitsanalyse

Vorwort

Die Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern erfordert ein leistungsfähiges und erprobtes Instrumentarium. Dafür werden Rechenprogramme und Daten eingesetzt, mit denen die relevanten physikalischen und chemischen Prozesse beschrieben werden, die bei der Freisetzung von Schadstoffen, deren Ausbreitung im Deckgebirge und der Exposition in der Biosphäre eine Rolle spielen. Ziel des Vorhabens „Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern“, FKZ 02 E 9239, war die Verfolgung nationaler und internationaler Entwicklungen sowie die Auswertung wissenschaftlicher Ergebnisse im Hinblick auf deren Relevanz für die Langzeitsicherheitsanalyse von Endlagern. Hierzu wurden hauptsächlich experimentelle und theoretische FuE-Vorhaben betrachtet, die wichtige Beiträge zu den Modellvorstellungen und Modellparametern für Langzeitsicherheitsanalysen lieferten. Daneben standen Arbeiten zur Weiterentwicklung der methodischen Vorgehensweise beim Langzeitsicherheitsnachweise, insbesondere die Erprobung von Sicherheits- und Performance-Indikatoren im Vordergrund.

Dieses sonderfinanzierte Vorhaben des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie wurde in der Zeit vom 01.02.2000 bis 31.10.2004 durchgeführt. Zu den schwerpunktmäßig während des Projektes bearbeiteten Themen wurden die folgenden wissenschaftlichen Einzelberichte angefertigt.

GRS-Bericht 203 Die Klassifizierung radioaktiver Abfälle hinsichtlich der Endlagerung

GRS-Bericht 205 Konzeptioneller Umgang mit Gasen im Endlager

GRS-Bericht 206 Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit von Endlagern für abgebrannte Brennstoffe in Salz- und Granitformationen

In dem vorliegenden Abschlussbericht wurden außerdem alle während der Laufzeit des Projekts durchgeführten Arbeiten in Kurzbeiträgen zusammengefasst:

GRS-Bericht 204 Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern. Abschlussbericht.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Themen mit hoher Relevanz für LZSA	3
2.1	Sicherheits- und Performance-Indikatoren	3
2.1.1	Definitionen	4
2.1.2	Sicherheitsindikatoren	4
2.1.3	Performance-Indikatoren	6
2.2	Absicherung von Konvergenzansätzen	8
2.2.1	Motivation zur Modellerweiterung	9
2.2.2	Modellansatz	11
2.2.2.1	Abhängigkeit von lokalen Eigenschaften	12
2.2.2.2	Stützwirkung durch den Fluiddruck	12
2.2.2.3	„Explizite Zeitabhängigkeit“ der Konvergenzrate	14
2.2.2.4	Stützwirkung des Versatzes	16
2.2.2.5	Temperaturabhängigkeit der Konvergenzrate	19
2.2.3	Ermittlung der Parameter des Konvergenzansatzes	20
2.2.3.1	Variationen der Modellparameter	20
2.2.4	Vergleich mit Ergebnissen gebirgsmechanischer Rechnungen	26
2.2.4.1	Anwendungsbeispiel 1: unversetzter Grubenbau	26
2.2.4.2	Anwendungsbeispiel 2: versetzter Grubenbau	27
2.2.5	Verhalten der Konvergenzrate für kleine und große Zeiten	29
2.2.6	Zusammenfassung zu Absicherung von Konvergenzansätzen	31
2.3	Auswirkungen von Gasen im Endlager	32
2.3.1	Ergebnisse des NEA-Workshop (Reims)	33
2.3.2	Modellrechnungen zur Auswirkung von Gasen im Endlager	37
2.3.2.1	Ergebnisse der Modellrechnungen	39
2.4	Charakterisierung radioaktiver Abfälle	41
2.4.1	Klassifizierung von Abfällen	41
2.4.2	Aktualisierte Inventare	45
2.4.3	C-14 Problematik	48
2.4.3.1	C-14 Inventar	49

2.4.3.2	Chemische Form von C-14	50
2.4.3.3	Schlussfolgerungen für Langzeitsicherheitsanalysen	51
2.4.4	Aktualisierte Quellterme	52
2.5	Endlager in Tonformationen	55
2.5.1	Clay Club	55
2.5.2	Review FEPCAT	58
2.5.3	Review Opalinus-Ton	64
2.5.3.1	Quellterm	65
2.5.3.2	Übergang Nahfeld / Fernfeld	66
2.5.3.3	Gastransport	66
2.5.3.4	Radionuklidtransport über den Gaspfad	67
2.5.4	Konzeptuelle Modelle für die Modellierung des Radionuklidtransports aus Endlagern in Ton	69
2.5.4.1	Advektion und Dispersion	69
2.5.4.2	Diffusion	69
2.5.4.3	Rückhaltung	70
2.5.4.4	Gastransport	71
2.6	Vorschläge zur Erstellung eines neuen Bentonit-Aufsättigungsmodells ..	72
2.6.1	Stand bei der Modellierung der Bentonitaufsättigung	72
2.6.1.1	Tagungen	72
2.6.1.2	Aktuelle Grenzen bei der THM-Modellierung	73
2.6.1.3	Neue Entwicklungen bei etablierten Rechenprogrammen	74
2.6.1.4	Ergebnisse des EBS-Projekts	75
2.6.1.5	Ergebnisse des ARTE-Projekts	76
2.6.2	Schlussfolgerungen für die konzeptuellen Modelle	76
2.6.2.1	Etablierte Ansätze für die THM-Modellierung der Bentonitaufsättigung ..	76
2.6.2.2	Alternative konzeptuelle Modelle	78
2.6.3	Weiterführende Arbeiten	79
2.6.3.1	Relevanz des Flüssigkeitstransports	80
2.6.3.2	Relevanz des Dampftransports	81
2.6.3.3	Relevanz weiterer Transportprozesse	82
2.7	Durchlässigkeit von Auflockerungszonen	82
2.7.1	EDZ-Workshop	82
2.7.1.1	Was ist die EDZ:	84

2.7.1.2	Was führt zur Entstehung der EDZ und welche Vorgänge bestimmen ihre Entwicklung	84
2.7.1.3	Wie entwickelt sich die EDZ	84
2.7.1.4	Einfluss der EDZ auf Endlagerverhalten und –sicherheit	85
2.7.2	Zusammenfassung des gegenwärtigen Wissens / Unsicherheiten	85
2.8	Aktualisierte Modellrechnungen zu huminstoffgetragendem Transport	87
2.9	Feldstudien zur Schadstoffausbreitung in großen Modellgebieten	89
2.9.1	Transport von Chlorid und Kalium im Gebiet der Insel Langeoog	89
2.9.2	Transport von Radionukliden im Grundwassermessfeld Krauthausen	90
2.9.3	Transport von Uran, Nickel und Eisen im ehemaligen ostthüringischen Uranbergbaugebiet Ronneburg	91
2.9.4	Transport von Zink im Bereich Cape Cod, Massachusetts	92
2.10	Klimatische Veränderungen	94
2.10.1	Klimaprognose über lange Zeiträume	95
2.10.2	Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Prozesse in der Geosphäre	100
2.10.2.1	Auswirkungen einer Kaltzeit auf endlagerrelevante Gesteinsformationen	103
2.10.2.2	Auswirkungen einer Warmzeit auf endlagerrelevante Gesteinsformationen	108
2.11	Verfolgung natürlicher Analoga (NAnet)	113
2.11.1	Ergebnisse des Projekts	114
2.11.2	Beispiel eines Reviews: Dunarobba	118
2.12	Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit von Endlagern in Salz- und Granitformationen	122
2.12.1	Ergebnisse der Referenzfälle	122
2.12.2	Parametervariationen	124
2.12.3	2D-Modellierung des Radionuklidtransports im Deckgebirge Salz	127
3	Verfolgung internationaler Aktivitäten	131
3.1	IGSC	131
3.2	IPAG	132
3.3	GEOTRAP	134

3.3.1	Sorption	135
3.3.2	Matrixdiffusion	136
3.3.3	Kolloide	137
3.3.4	Immobilisierung	138
3.3.5	Ausblick	138
3.4	TRUE	139
3.5	Szenarienanalyse	143
3.6	NEA: Thermodynamische Datenbank	146
3.7	NEA-Sorptionsprojekt Phase 2	148
3.7.1	Aspekte der Langzeitsicherheitsanalyse	149
3.7.2	Derzeitiger Stand der Oberflächenkomplexmodellierung	150
3.7.3	Allgemeine Empfehlungen	151
3.7.4	Ausblick	152
3.8	CROP	153
3.8.1	Projektverlauf, -ergebnisse und Schlussfolgerungen	155
3.8.2	Zusammenfassung der deutschen Ergebnisse	156
3.9	Bilaterale Zusammenarbeit	159
3.9.1	US-DOE	159
3.9.1.1	Hintergrund	159
3.9.1.2	Zielsetzung des Workshops	160
3.9.1.3	Ergebnisse des Workshops	161
3.9.2	Ukraine	162
3.9.2.1	Hintergrund	163
3.9.2.2	Geologische Aufgabenstellungen	164
3.9.2.3	Geochemische und hydrogeologische Arbeiten	165
3.9.2.4	Bearbeitung von Waste-Management- und technischen Problemen	165
3.9.2.5	Zusammenfassung der Arbeitsergebnisse	166
3.9.2.6	Zukünftige Arbeiten	170
3.10	NET-EXCEL ein europäisches thematisches Netzwerk zur Empfehlung und Schwerpunktsetzung künftiger gemeinsamer FuE-Projekte	171
3.10.1	Endlagerkonzepte und gegenwärtiger Stand der nationalen Entwicklungen	172

3.10.2	Festlegung von Schwerpunktthemen	174
3.10.3	Nutzen für zukünftige gemeinsame FuE-Aktivitäten	176
3.10.4	Nationale FuE-Themen von hoher Priorität	177
3.10.5	Themen mit hoher Priorität für eine künftige Zusammenarbeit	179
3.10.6	Ausblick	179
3.10.6.1	Künftiger FuE-Bedarf mit hoher Priorität	179
3.10.6.2	Verfahren zur Verbesserung eines systematischen Ansatzes für die zukünftige Zusammenarbeit	181
4	Zusammenfassung	185
5	Literatur	189
6	Abbildungsverzeichnis	203
7	Tabellenverzeichnis	205

1 Einleitung

Die Bewertung der Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle oder einer Untertagedeponie für chemotoxische Abfälle erfordert ein umfangreiches Systemverständnis. Dazu gehört ein tiefgehendes Verständnis aller relevanten Prozesse, die bei der Mobilisierung und Freisetzung von Schadstoffen im Endlager, beim Transport durch darüberliegende geologische Formationen sowie bei der Exposition in der Biosphäre eine Rolle spielen. Für all diese Prozesse müssen Modellvorstellungen entwickelt werden.

Die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Arbeiten haben dazu beigetragen, das Systemverständnis zur Durchführung von Sicherheitsanalysen von Endlagern zu verbreitern und abzusichern. Das beinhaltet zum einen die Erarbeitung neuer, bzw. aktualisierter Modellansätze und Daten zur Verwendung in Langzeitsicherheitsanalysen. Zum anderen beinhaltet es die Weiterentwicklung von methodischen Vorgehensweisen bei einem Sicherheitsnachweis unter Berücksichtigung der dabei zu betrachtenden außergewöhnlich langen Zeiträume. Hierzu wurden speziell die Entwicklungen auf internationaler Ebene, bzw. die Fortschritte in den nationalen Endlagerprojekten anderer Länder verfolgt und bewertet.

Der Abschlussbericht gliedert sich in zwei Teile. Im ersten Abschnitt werden die Ergebnisse der Arbeiten zu Schwerpunktthemen mit hoher Relevanz für die Langzeitsicherheitsanalyse (LZSA) beschrieben. Im zweiten Teil werden die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst, die sich für das deutsche FuE-Programm aus der Mitarbeit in internationalen Gremien und Arbeitsgruppen, sowie durch die Teilnahme an Tagungen und Workshops ergeben haben.

Die Schwerpunktthemen des Projekt waren folgende:

- Zusammenstellung, Bewertung und Erprobung von Sicherheitsindikatoren für die Langzeitsicherheit sowie von Bewertungskriterien für Teilsysteme eines Endlagers. Dies erfolgte anhand aktueller Sicherheitsanalysen für Endlager in Granit und stellte einen nationalen Beitrag für das EU-Projekt SPIN dar.

- Auswertung neuerer Ergebnisse aus Labor- und In-situ-Experimenten sowie aus gebergsmechanischen Modellrechnungen zur Absicherung der bisherigen Modellansätze zur Konvergenz verfüllter Hohlräume im Salz.
- Zusammenstellung und Bewertung neuerer Arbeiten zur Charakterisierung von Abfällen. Hierzu gehören Arbeiten zu Radionuklidinventaren, insbesondere zur chemischen Form von C-14 und Arbeiten zu aktualisierten Quelltermen.
- Zusammenstellung des aktuellen Kenntnisstands zur Gasproblematik und Durchführung von Modellrechnungen zum Gasdruckaufbau und zur Auswirkung von Gasen in Endlagern in verschiedenen Formationen.
- Zusammenstellung von Eigenschaften, Prozessen und Effekten (FEPs), die bei einer Sicherheitsanalyse eines Endlagers in Tonformationen zu berücksichtigen sind. Neben der Auswertung von Studien anderer Länder wurden wichtige Erkenntnisse hierzu auch durch die Teilnahme an Reviews für den FEPCAT-Katalog der NEA und die Sicherheitsstudie Opalinuston der NAGRA gewonnen.
- Weiterführung einer Statusanalyse zur Auswirkung von klimatischen Änderungen auf die Langzeitsicherheit von Endlagern. Schwerpunkt war die Sichtung von Arbeiten zur Klimaprognose über lange Zeiträume und die Zusammenstellung möglicher Auswirkungen auf Prozesse im Fernfeld eines Endlagers.
- Durchführung von Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit für Endlager in Salz- und Granitformationen unter Annahme gleicher radioaktiver Abfälle und Behälter. Herausarbeitung von Effekten, die in den beiden Formationen von Bedeutung für die Langzeitsicherheitsanalyse sind.

2 Themen mit hoher Relevanz für LZSA

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse, die sich aus der Bearbeitung der Schwerpunktthemen ergeben haben, zusammengefasst. Aktuelle Forschungsergebnisse aus nationalen und internationalen Arbeiten wurden zusammengestellt ausgewertet und im Hinblick auf die Langzeitsicherheitsanalyse bewertet. Dabei wurden z.T. neue Rechenmodule entwickelt, bzw. die Grundlagen dafür erarbeitet, Modellansätze modifiziert und Eingangsdatensätze aktualisiert. Zu manchen Einzelthemen wurden detaillierte wissenschaftliche Berichte angefertigt. Auf diese Berichte wird in den entsprechenden Kapiteln verwiesen.

2.1 Sicherheits- und Performance-Indikatoren

Um die Sicherheit eines Endlagersystems mit Hilfe numerischer Radionuklidfreisetzungsberechnungen bewerten zu können, werden spezielle Größen benötigt, die aus den Rechenergebnissen ableitbar sind und mit sicherheitsrelevanten Referenzwerten verglichen werden können. Solche Größen werden als Sicherheitsindikatoren bezeichnet. Häufig wird als Sicherheitsindikator die Individualdosisrate, also die jährliche Strahlenexposition eines erwachsenen menschlichen Individuums verwendet. Als Referenzwert kann dafür ein regulatorisch festgelegter Wert, z. B. das Schutzziel von 0,3 mSv/a nach §47 StrlSchV, verwendet werden. Aufgrund von Unsicherheiten bei der Berechnung von Dosisraten, insbesondere bezüglich der langfristigen Entwicklung der Expositionspfade in der Biosphäre, ist es jedoch sinnvoll, die Sicherheitsaussage durch zusätzliche Indikatoren zu stützen.

Um die Funktionsweise einzelner Barrieren sowie des Endlagersystems als Ganzem zu demonstrieren und die Verständnisbildung zu unterstützen, kann die Berechnung von so genannten Performance-Indikatoren hilfreich sein. Diese beziehen sich normalerweise auf Teilsysteme des Endlagers. Sie liefern keine direkte Sicherheitsaussage, erlauben aber z. B. einen Vergleich von unterschiedlichen konstruktiven Optionen oder mit technischen Kriterien.

Im Rahmen des von der europäischen Kommission geförderten SPIN Projekts [6] wurden mehrere Sicherheits- und Performance-Indikatoren identifiziert und durch Nachrechnung aktueller Studien für das Wirtsgestein Granit hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit in

Langzeitsicherheitsstudien getestet. Dabei wurden die Studien ENRESA-2000 (Spanien), SPA-GRS (Deutschland), TILA-99 (Finnland) und Kristallin-I (Schweiz) zugrunde gelegt. Die Arbeiten und Ergebnisse des Projekts werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt.

2.1.1 Definitionen

Die Begriffe „Sicherheitsindikator“ und „Performance-Indikator“ wurden z. B. durch die IAEA definiert [94]. Da diese Definitionen jedoch weiter gefasst sind als es für den verfolgten Zweck sinnvoll ist, wird zunächst festgelegt, welche Arten von Indikatoren hier betrachtet werden:

Ein Sicherheitsindikator muss

- eine Aussage über die Sicherheit des Gesamtsystems liefern,
- die Effekte des gesamten Nuklidspektrums berücksichtigen,
- eine numerisch zu berechnende, zeitabhängige Größe darstellen,
- einen Vergleich mit sicherheitsrelevanten Referenzwerten erlauben.

Ein Performance-Indikator muss

- eine Aussage über den Grad der Funktionserfüllung einzelner Barrieren, von Teilsystemen oder des Gesamtsystems liefern,
- ein nuklidspezifisches oder das gesamte Nuklidspektrum umfassendes Maß sein,
- eine numerisch zu berechnende, zeitabhängige oder absolute Größe darstellen,
- Vergleiche zwischen konstruktiven Optionen oder mit technischen Kriterien erlauben.

2.1.2 Sicherheitsindikatoren

Mögliche Sicherheitsindikatoren wurden durch Auswertung existierender Literatur, ergänzt durch systematische Überlegungen identifiziert. Sieben Indikatoren, darunter die effektive Individualdosisrate als Standardindikator, wurden schließlich für ausführliche Tests ausgewählt. Die Zeitverläufe dieser Indikatoren wurden für alle vier Studien berechnet und verglichen. Unabhängig davon wurde versucht, für die betrachteten Indikatoren sinnvolle, sicherheitsrelevante Referenzwerte zu bestimmen. Als Grundlage sollten dafür als sicher anzusehende natürliche Umweltbedingungen verwendet werden. Dabei zeigte sich, dass solche Referenzwerte in einigen Fällen kaum angegeben werden können.

Um eine möglichst objektive Bewertung der verschiedenen Sicherheitsindikatoren zu ermöglichen, wurde ein zweistufiges Bewertungsschema aufgestellt. Für die erste Stufe wurden Ausschlusskriterien formuliert, die im Wesentlichen mit den oben genannten Anforderungen an einen Sicherheitsindikator übereinstimmen, jedoch im Nachhinein vor dem Hintergrund der gewonnenen Erkenntnisse zu überprüfen waren. Für die zweite Stufe wurden weniger strenge Anforderungen zusammengestellt, anhand derer schwer vermittelbare oder redundante Indikatoren ausgeschlossen und unter den verbliebenen für unterschiedliche Zwecke und Zeitrahmen Präferenzen festgelegt wurden. Dieser Auswahlprozess ist ausführlich in [6] beschrieben.

Die folgenden drei Sicherheitsindikatoren wurden schließlich für sinnvoll befunden:

- Effektive Dosisrate [Sv/a]. Referenzwerte sind regulatorisch festgelegt und variieren international zwischen 0,1 mSv/a und 0,3 mSv/a. Der Indikator ist wegen der Unsicherheit der Biosphären Daten vorrangig für den Zeitbereich bis zu einigen 10 000 Jahren geeignet.
- Radiotoxizitätskonzentration im Biosphärenwasser [Sv/m³]. Als Referenzwerte können Konzentrationen in natürlichen Nutzwässern verwendet werden. Ein typischer Wert ist $2,0 \cdot 10^{-5}$ Sv/m³. Der Indikator ist für größere Zeiten robuster als die Dosisrate und vorrangig für den mittleren Zeitbereich bis zu ca. 100 000 Jahren zu verwenden.
- Raditoxizitätsstrom aus der Geosphäre [Sv/a]. Referenzwerte können aus natürlichen Toxizitätsströmen, z. B. mit dem Grundwasser oder durch Erosion, abgeleitet werden. Im Projekt wurde ein Wert von 60 Sv/a verwendet. Der Indikator besitzt nur einen indirekten Bezug zur menschlichen Gesundheit. Er ist vorrangig für den späten Zeitbereich oberhalb von 100 000 Jahren geeignet.

Abbildung 2.1 zeigt die auf die im Projekt verwendeten Referenzwerte von 0,1 mSv/a normierten Zeitverläufe der drei Indikatoren für die Studie SPA-GRS.

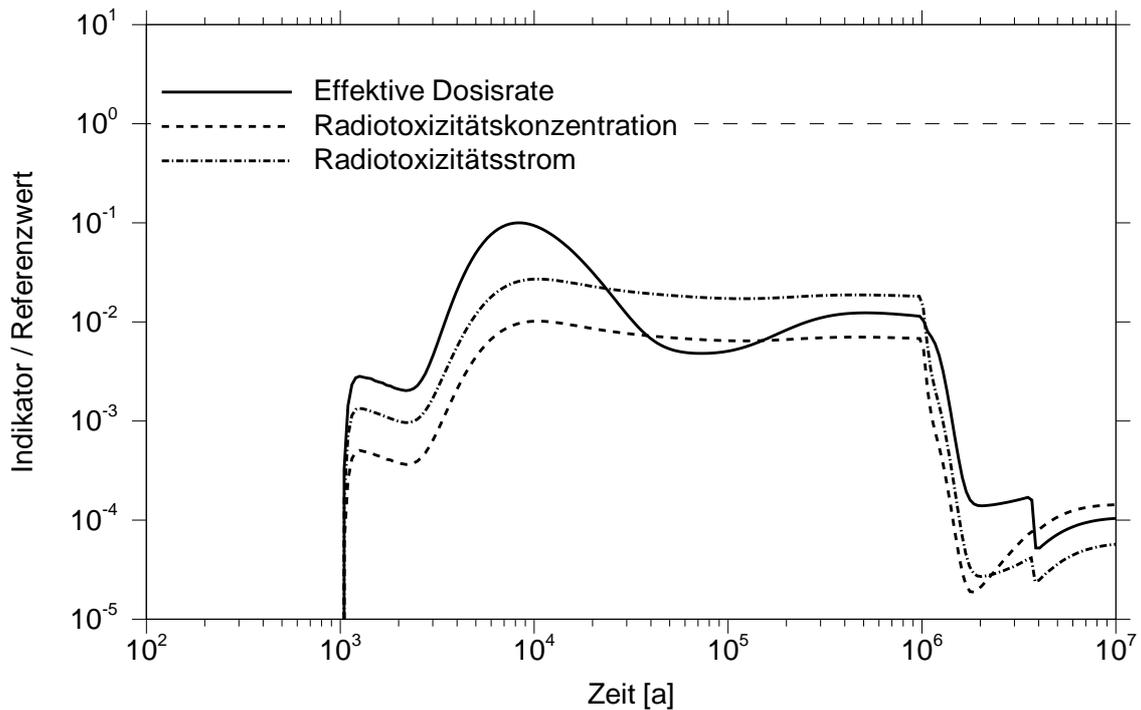


Abb. 2.1: Vergleich von Sicherheitsindikatoren für die Studie SPA-GRS

2.1.3 Performance-Indikatoren

Aufgabe von Performance-Indikatoren ist es, die Funktionsweise einzelner Barrieren oder Teilsysteme innerhalb des Gesamtsystems zu demonstrieren. Mit Hilfe verschiedener systematischer Ansätze wurden die folgenden Indikatoren identifiziert und für die Tests ausgewählt. Soweit sie Ströme oder Inventare darstellen, können sie auf der Basis von Aktivitäten oder Radiotoxizitäten betrachtet werden:

- Aktivität / Radiotoxizität in den Kompartments,
- Aktivitäts- / Radiotoxizitätsstrom aus den Kompartments,
- Zeitintegrierter Aktivitäts- / Radiotoxizitätsstrom aus den Kompartments,
- Aktivität / Radiotoxizität außerhalb der Kompartments,
- Aktivitäts- / Radiotoxizitätskonzentration im Wasser der Kompartments,
- Transportzeiten durch Kompartments,
- Anteil nicht vollständig isolierten Abfalls,
- Konzentrationsverhältnis des Biosphärenwasser zum Wasser im Abfallbehälter.

Die den betrachteten Studien zugrunde liegenden Endlagerprojekte im Wirtsgestein Granit können, wie in Tabelle 2.1 dargestellt, durch eine von innen nach außen geschichtete Kompartimentstruktur beschrieben werden, indem parallel angeordnete, identische Teilsysteme zu logischen Kompartiments zusammengefasst werden. Dabei sind allerdings nicht alle Kompartiments für alle Typen von Indikatoren geeignet.

Tab. 2.1 Kompartiments für verschiedene Typen von Performance-Indikatoren

Kompartiments	Inventar innerhalb	Inventar außerhalb, Ausstrom	Konzentration im Wasser	Transportzeit
Abfall	x	x		
Präzipitat	x			
Abfallbehälter		x	x	
Bentonitbuffer	x			x
Nahbereich		x		
Geosphäre	x	x		x
Biosphäre	x		x	

Performance-Indikatoren sind ihrem Wesen nach für spezielle Detailuntersuchungen konzipiert. Insofern führt ein Bewertungsverfahren nicht unbedingt zum Ausschluss einzelner Indikatoren, sondern zur Bildung von Präferenzen für die Anwendung von Indikatoren für bestimmte Zwecke. Die im SPIN-Projekt gezogenen diesbezüglichen Schlussfolgerungen sind in Tabelle 2.2 zusammengefasst.

Einige Indikatoren wurden speziell für die Demonstration bestimmter, so genannter Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems eingeführt. Diese sind in Tabelle 2.3 aufgeführt. Sie beziehen sich jeweils auf das gesamte Endlagersystem und geben Aufschluss darüber, wie gut die betreffende Sicherheitsfunktion erfüllt ist.

Tab. 2.2 Performance-Indikatoren und ihre Anwendungsbereiche

Indikator	Anwendung
Inventare innerhalb oder außerhalb von Kompartments	Demonstration der Funktionsweise des Multibarrierensystems. Wo befinden sich die Schadstoffe?
Ströme aus Kompartments	Demonstration der Barrierenfunktionen. Wie bewegen sich die Schadstoffe?
Zeitintegrierte Ströme aus Kompartments	Demonstration der Rückhaltefähigkeit von Barrieren. Welche Anteile des Inventars können die Teilsysteme verlassen?
Konzentrationen	Demonstration von Verdünnungs- und Verteilungseffekten
Transportzeit	Schnelle Übersicht über die Sicherheitsrelevanz der Einzelnuklide

Tab. 2.3 Sicherheitsfunktionen und Performance Indikatoren

Sicherheitsfunktion	Performance-Indikator
Physikalischer Einschluss	Anteil nicht vollständig isolierten Abfalls
Verzögerung	Zeitintegrierter Strom aus der Geosphäre, normiert auf Gesamtinventar
Verteilung und Verdünnung	Konzentrationsverhältnis zwischen Biosphäre und Abfallbehälter

2.2 Absicherung von Konvergenzansätzen

Der Konvergenzprozess beschreibt die Volumenabnahme von im Salzgestein aufgefahrenen Grubenbauen aufgrund der Kriechfähigkeit des Salzgesteins. Im Allgemeinen ist die Konvergenz von der Tragfähigkeit des Salzgesteins und des Deckgebirges sowie von der Stützwirkung durch den Fluiddruck und den Versatz im Inneren eines Grubenbaus abhängig. Da sowohl der Druck eingedrungener Flüssigkeiten als auch der von eingeschlossenem Gas den Konvergenzprozess beeinflussen, werden hier die Begriffe Fluid und Fluiddruck verwendet, außer wenn nur Gase oder nur Flüssigkeiten gemeint sind.

Auf die Transportvorgänge im Grubengebäude wirkt sich die Konvergenz auf mehrere Weisen aus. Bei einem späten Flüssigkeitszutritt ins Grubengebäude begrenzt die fortschreitende Volumenverminderung die zutretende Flüssigkeitsmenge. Ferner werden

durch den Konvergenzprozess Strömungswiderstände einzelner mit kompaktierbarem Versatz verfüllter Teilbereiche erhöht, sodass gegebenenfalls ein Flüssigkeitszutritt stärker behindert wird. Nach einem Flüssigkeitszutritt ist ein durch die Konvergenz angetriebener advektiver Flüssigkeitsstrom gegebenenfalls hauptverantwortlich für die Freisetzung kontaminierter Flüssigkeit aus der Grube.

Nach einem Flüssigkeitszutritt in einen Grubenbau baut sich ein Druck auf. Dieser entspricht zunächst dem hydrostatischen Druck der anstehenden Flüssigkeitssäule, und kann bei einer bis zum Grundwasserspiegel durchgehenden Flüssigkeitssäule bis auf den hydrostatischen Druck entsprechend der Teufe des Grubenbaus anwachsen. Der Druck der Flüssigkeit behindert die Konvergenz und stützt somit den Grubenbau. Wird in einem Grubenbau zudem Gas produziert und gespeichert, so wirkt außer dem Druck der Flüssigkeit auch der Gasdruck und erhöht die Stützwirkung. Durch Strömungswiderstände im Grubengebäude kann es zu einem hydraulischen Druckanstieg über den hydrostatischen Druck hinaus kommen. Dieser hydraulisch erhöhte Druck verstärkt die Stützwirkung des Fluids.

In einem versetzten Grubenbau nimmt mit zunehmender Kompaktion des Versatzes dessen Stützwirkung zu. Hierbei zeigt trockener Salzgrusversatz i.A. ein anderes Kompaktionsverhalten als feuchter oder mit Flüssigkeit gesättigter Versatz. Die Abnahme der Konvergenzrate durch den Fluiddruck sowie durch die Stützwirkung von trockenem oder feuchtem Versatzes werden im nachfolgend beschriebenen Modellansatz zur Beschreibung der Konvergenz berücksichtigt. Die im Konvergenzansatz verwendeten Parameter werden aus gebirgsmechanischen Modellrechnungen unter Berücksichtigung der jeweiligen Verhältnisse am Standort des Endlagers abgeleitet [54], sofern sie nicht auch direkt aus in-situ Messungen oder Laboruntersuchungen ermittelt werden können.

2.2.1 Motivation zur Modellerweiterung

Der im Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE) [12] entwickelte Modellansatz zur Beschreibung der Konvergenz beruht auf dem Konzept eines einsöhligen Endlagers, bei dem eine Vernachlässigung der vertikalen Ausdehnung des Grubengebäudes toleriert werden konnte. Außerdem lag der Schwerpunkt der Sicherheitsbetrachtungen auf dem Szenario eines Flüssigkeitszutritts im Schachtbereich des Grubengebäudes. Die Auffüllung der einsöhligen Grube erfolgte über einen Zeitbereich von einigen hundert Jahren,

währenddessen keine wesentliche Behinderung der Konvergenz durch die zutretende Flüssigkeit angenommen werden musste. Ein Anstieg des hydrostatischen Drucks in Einlagerungsbohrlöchern wurde ebenfalls nicht betrachtet, obwohl hier bereits während der Auffüllung merkliche Drücke auftreten können. Die Konvergenzrate wird hier jedoch zu Anfang durch die Stützwirkung der Abfallsäule dominiert. Eine Behinderung der Konvergenz durch Gasdrücke wurde im PSE-Ansatz nicht betrachtet.

Erst bei einem mehrsöhligen Endlager oder einem Grubengebäude mit Auffahrungen, die sich über zehner bis hunderter Meter erstrecken, wie es z.B. bei existierenden Grubengebäuden im Steinsalz der Fall ist, wurde eine genauere Modellierung der Zutrittsphase mit einem kontinuierlichen Druckanstieg durch zutretende Flüssigkeit und durch gebildete und gespeicherte Gase erforderlich. Auch in der Auspressphase haben der unterschiedlich hohe Fluiddruck im Grubengebäude und der teufenabhängige Gebirgsdruck einen merklichen Einfluss auf das Konvergenzverhalten einzelner Grubenbaue. Eine Modellierung der Konvergenzrate unter Berücksichtigung der Teufenabhängigkeit von Fluiddruck, Gebirgsdruck und Gebirgstemperatur war im ursprünglichen PSE-Ansatz nicht enthalten.

Desweiteren zeigten trockener und feuchter Versatz deutlich unterschiedliches Stützverhalten, sodass der Ansatz für die Stützwirkung von Versatz und insbesondere deren Veränderung bei einem Flüssigkeitszutritt in die Modellierung mit aufgenommen werden musste.

Genauere Untersuchungen der Konvergenzverläufe in unversetzten Grubenbauen und Kavernen ohne Flüssigkeitszutritt zeigten eine nicht vernachlässigbare zeitliche Veränderung der Konvergenzrate. Die Modellierung dieses Effektes war in dem PSE-Ansatz ebenfalls nicht enthalten.

Der Konvergenzansatz wurde demzufolge um die Modellierung der Effekte Teufenabhängigkeit, Anstieg des Fluiddrucks durch Flüssigkeitszutritt oder Gasbildung, Stützwirkung von trockenem oder feuchtem Versatz und Zeitabhängigkeit ergänzt.

2.2.2 Modellansatz

Die Volumenänderung pro Zeiteinheit durch die Konvergenz eines Grubenbaus berechnet sich nach der Beziehung

$$\frac{d}{dt}V(t) = -K(t) \cdot V(t). \quad (2.1)$$

Die Volumenänderung ist proportional zum aktuell vorhandenen Volumen $V(t)$ des Grubenbaus und zur aktuellen Konvergenzrate $K(t)$. Die Konvergenzrate ist dadurch als die Volumenänderung des betrachteten Grubenbaus bezogen auf das aktuelle Volumen $V(t)$ definiert. Im Folgenden wird ein Ansatz vorgestellt, der die Abhängigkeiten der Konvergenzrate von verschiedenen, nachfolgend erläuterten Einflussgrößen berücksichtigt. Näherungsweise wird für die Konvergenzrate ein Produktansatz verwendet:

$$K = K_{\text{ref}} \cdot f_{\text{lok}} \cdot f_t \cdot f_p \cdot f_\phi \cdot f_T. \quad (2.2)$$

Die Größe K_{ref} wird mit Referenz-Konvergenzrate bezeichnet. Sie gibt die stationäre Konvergenzrate eines unversetzten Grubenbaus ohne Fluid unter Referenzverhältnissen und auf einer Referenzsohle in der Teufe z_{ref} wieder, welche sich im Grenzfall $t \rightarrow \infty$ einstellt. Die weiteren Faktoren beschreiben die folgenden Abhängigkeiten:

- f_{lok} : lokale Eigenschaften des umgebenden Salzgesteins,
- f_t : "explizite" Zeitabhängigkeit des Konvergenzprozesses,
- f_p : Stützwirkung durch den Fluiddruck p von Flüssigkeiten oder Gasen,
- f_ϕ : Stützwirkung von trockenem oder feuchtem Versatz mit einer Porosität ϕ ,
- f_T : Beschleunigung der Konvergenz bei erhöhter Temperatur T durch wärmeproduzierende Abfälle.

Lokale Eigenschaften sind im Folgenden die Salzformation und die Teufe z , in denen sich der betrachtete Grubenbau befindet, der Abstand zum Rand einer Salzstruktur oder zu Anhydritschichten und die Durchörterung in der näheren Umgebung des Grubenbaus. Unter "expliziter" Zeitabhängigkeit wird die zeitliche Veränderung der Konvergenzrate verstanden, die nicht auf der zeitlichen Veränderung des Fluiddrucks, der Porosität des

Versatzes oder der Temperatur beruht. Der Faktor f_T beschreibt die Abhängigkeit der Konvergenzrate von einer von der Gebirgstemperatur in der Teufe z abweichenden Temperatur T aufgrund der Einlagerung wärmeproduzierender Abfälle.

Die verschiedenen Abhängigkeiten wirken sich zum Teil reduzierend auf die Konvergenzrate aus. Hierzu gehören die Stützwirkung durch das Fluid und den Versatz. Die entsprechenden Faktoren sind somit kleiner gleich eins. Andere Einflussgrößen wirken sich beschleunigend auf die Konvergenz aus. Hierzu gehören die Temperaturerhöhung und die Zeitabhängigkeit, sodass deren Faktoren größer gleich eins sind. Für die Zeitabhängigkeit ergibt sich dieser Sachverhalt aus der Definition der Referenzkonvergenzrate und der Tatsache, dass die Konvergenzraten explizit und kontinuierlich mit der Zeit abnehmen. Die Abhängigkeit von lokalen Eigenschaften kann sich sowohl erhöhend als auch erniedrigend auf die Konvergenzrate auswirken.

2.2.2.1 Abhängigkeit von lokalen Eigenschaften

Im Allgemeinen ist die Konvergenz von den lokalen Eigenschaften des umgebenden Gebirges und von der Teufenlage des Grubenbaus abhängig. Die Teufenlage wirkt sich sowohl über den Gebirgsdruck als auch über die Gebirgstemperatur auf die Konvergenzgeschwindigkeit aus. Die Abhängigkeit von lokalen Eigenschaften wird im Faktor f_{lok} berücksichtigt, der die Abweichung von einer Referenzsituation beschreibt.

Zur Festlegung der Faktoren für die lokalen Eigenschaften werden Ergebnisse von gebirgsmechanischen Modellrechnungen für die trockenen Grubenbaue unter Atmosphärendruck betrachtet oder Daten aus experimentellen Untersuchungen verwendet. Es wird angenommen, dass hierin nur lokale Einflüsse des Gebirges und der Lage der Grubenbaue und keine unterschiedliche Stützwirkung von Versatzmaterialien enthalten sind. Aus der Division der Konvergenzraten durch diejenige für die Referenzsituation ergeben sich die Faktoren zur Berücksichtigung der lokalen Eigenschaften.

2.2.2.2 Stützwirkung durch den Fluiddruck

Durch den Fluiddruck wird das Gebirge gestützt und die Konvergenzgeschwindigkeit reduziert. Die Druckabhängigkeit der Konvergenzrate wird mit dem Faktor f_p beschrieben:

$$f_p(p) = \left(1 - \frac{p(z, t) - p_{\text{atm}}}{p_G(z)} \right)^m \quad (2.3)$$

Hierbei sind m der Spannungsexponent, $p(z, t)$ der Fluiddruck zur Zeit t in der Teufe z und $p_G(z)$ der lokale Gebirgsdruck in der Teufe z . Zur einfacheren Beschreibung der Druckabhängigkeit wird hier der Fluiddruck um den Atmosphärendruck vermindert, sodass die Funktion f_p für einen luftgefüllten Grubenbau ($p = p_{\text{atm}}$) den Wert 1 annimmt.

In der Beziehung 2.3 bestimmt das Verhältnis zwischen Fluiddruck $p(z, t) - p_{\text{atm}}$ und lokalem Gebirgsdruck $p_G(z)$ in der Teufe z wesentlich die Konvergenzrate. In einer idealisierten, unendlich ausgedehnten Salzformation bestimmt sich der lokale Gebirgsdruck aus der Dichte und der Mächtigkeit der darüber liegenden Gesteinsschicht. Für ein reales Grubengebäude in einer begrenzten, stark durchörterten Salzstruktur hat es sich als notwendig erwiesen, für den lokalen Gebirgsdruck in der Beziehung 2.3 einen erweiterten Ansatz

$$p_G(z) = p_G(z_{\text{ref}}) - f_{p_G} \cdot (z - z_{\text{ref}}) \rho_S g \quad (2.4)$$

zu verwenden, wobei $p_G(z_{\text{ref}})$ der Gebirgsdruck auf der Referenzsohle z_{ref} , g die Erdbeschleunigung, ρ_S die mittlere Gesteinsdichte und $(z - z_{\text{ref}})$ der vertikale Abstand der betrachteten Sohle von der Referenzsohle sind. Die Parameter f_{p_G} können z.B. durch Vergleich der Konvergenzraten mit denen aus gebirgsmechanischen Rechnungen ermittelt werden.

In einem Grubenbau ohne Flüssigkeit entspricht der Fluiddruck anfangs dem Atmosphärendruck p_{atm} von 0,1 MPa. Für den Exponenten m wird entsprechend dem Stoffgesetz von Steinsalz der Wert $m = 5$ verwendet. Während der Auffüllung eines Grubenbaus mit zutretender oder eingeleiteter Flüssigkeit wird der Fluiddruck aus dem aktuellen Flüssigkeitsspiegel und einem gegebenenfalls durch Gasbildung und Gasspeicherung erhöhten Gasdruck bestimmt. Nach Auffüllung des Grubenbaus bestimmt sich der Fluiddruck aus den hydraulischen Gegebenheiten in der Grube, wobei die Konvergenz, die Gasbildung und die Gasspeicherung die Fluidbewegung antreiben.

Im Allgemeinen ist der Fluiddruck p zeitlich veränderlich, damit ist die Konvergenzrate K über den Fluiddruck implizit zeitabhängig. Ein Beispiel für die Abhängigkeit der Konvergenzrate K vom Fluiddruck ist im Kapitel 2.2.4.1 gegeben, wobei mit Ergebnissen aus gebirgsmechanischen Rechnungen mit zeitlich konstantem Fluiddruck [54] verglichen wird.

2.2.2.3 „Explizite Zeitabhängigkeit“ der Konvergenzrate

Untersuchungen in Grubenbauen und gebirgsmechanische Rechnungen zeigen, dass die Konvergenzrate für einen unversetzten Grubenbau anfänglich eine zeitliche Veränderung erfährt ([81], [26], [54]), die sich über Größenordnungen erstrecken kann. Der Zeitbereich, bis die Konvergenzrate einem stationären Wert zustrebt, hängt von dem Innendruck im Grubenbau ab. Die zeitliche Veränderung der Konvergenzrate wird auch bei Atmosphärendruck beobachtet.

Zur Beschreibung dieses Zeitverhaltens wird der Vorfaktor f_t im Konvergenzansatz verwendet. Für große Zeiten strebt die Konvergenzrate eines unversetzten Grubenbaus in der Teufe z bei konstantem Innendruck gegen einen stationären, sohlenspezifischen Wert, d.h. bei Atmosphärendruck ($f_p \equiv 1$) gilt

$$\lim_{t \rightarrow \infty} K(z, t) = K_{\text{ref}} \cdot f_{\text{lok}}, \quad (2.5)$$

wobei K_{ref} der stationäre Wert auf dem Referenzniveau ist und $K_{\text{ref}} \cdot f_{\text{lok}}$ den lokalen stationären Wert in der Teufe z bezeichnet.

Je weiter die Konvergenz fortgeschritten ist, desto näher liegt der aktuelle Wert von K am stationären Wert $K_{\text{ref}} \cdot f_{\text{lok}}$. Zur einfachen Beschreibung dieses Effekts wird daher für die Zeitfunktion f_t der folgende Ansatz mit einer monoton fallenden Funktion gemacht:

$$f_t = 1 + \frac{A}{\int_{t_0}^0 K(t') dt' + \int_0^t K(t') dt'} = 1 + \frac{A}{\lambda_S + \int_0^t K(t') dt'}, \quad (2.6)$$

wobei der Parameter λ_S die Vorgeschichte des Grubenbaus vom Zeitpunkt der Auffahrung t_0 bis zum Zeitnullpunkt für die Modellrechnung beschreibt. Das Integral über die Konvergenzrate (rechts) gibt die zwischen dem Anfangszeitpunkt $t = 0$ und der aktuellen Zeit t abgelaufene Konvergenz wieder. Je weiter die Konvergenz fortgeschritten ist, desto größer wird das Integral über die Konvergenzrate und damit der Nenner in der obigen Beziehung. Die Funktion f_t strebt gegen den Wert 1, wobei der Parameter A die Annäherungsgeschwindigkeit beschreibt.

Aus der Definition der Konvergenzrate, Gleichung 2.1, folgt

$$\int_0^t K(t') dt' = \ln\left(\frac{V_0}{V(t)}\right), \quad (2.7)$$

wobei V_0 das Anfangsvolumen zum Zeitpunkt $t = 0$ angibt. Hiermit vereinfacht sich der Ansatz für f_t zu

$$f_t = 1 + \frac{A}{\lambda_S + \ln(V_0/V)} \quad (2.8)$$

Die beiden Parameter λ_S und A können durch Anpassung der Konvergenzverläufe an Ergebnisse aus gebirgsmechanischen Rechnungen ermittelt werden. Zur Vereinfachung dieser Anpassung ist es vorteilhaft, den Parameter A wie folgt zu ersetzen:

Für $t = 0$ gilt $K = K_0$, $f_p = 1$, $f_t = 1 + A/\lambda_S$ und $f_\phi = f_\phi(\phi_0)$, sodass

$$K_0 = K_0(z_{\text{ref}}) \cdot f_{\text{lok}} = K_{\text{ref}} \cdot f_{\text{lok}} \cdot f_\phi(\phi_0) \cdot \left(1 + \frac{A}{\lambda_S}\right) \quad (2.9)$$

gilt. Damit kann der Parameter A durch

$$A = \lambda_S \cdot \left(\frac{K_0(z_{\text{ref}})}{K_{\text{ref}} \cdot f_\phi(\phi_0)} - 1 \right) \quad (2.10)$$

eliminiert werden. Der Anfangswert K_0 der Konvergenzrate zur Zeit $t = 0$ ist aus experimentellen Untersuchungen vor Ort ermittelbar oder aus Ergebnissen gebirgsmechanischer Rechnungen zu entnehmen. Der stationäre Wert K_{ref} auf dem Referenzniveau ist nicht direkt experimentell zugänglich, kann in einigen Fällen jedoch aus gemessenen Konvergenzverläufen extrapoliert oder aus Ergebnissen gebirgsmechanischer Rechnungen entnommen werden. Der Wert der Stützfunktion $f_\phi(\phi_0)$ ergibt sich aus dem nachfolgend beschriebenen Ansatz.

Ein Beispiel für die zeitliche Veränderung der Konvergenzrate $K(t)$ für einen unversetzten Grubenbau unter konstantem Fluiddruck ist im Kapitel 2.2.4.1 gegeben. Dort werden durch Vergleich mit Ergebnissen aus gebirgsmechanischen Rechnungen [54] die Parameter A bzw. K_0 , K_{ref} und λ_S der Funktion f_t ermittelt.

2.2.2.4 Stützwirkung des Versatzes

In versetzten Grubenbauten baut sich mit fortschreitender Kompaktion der Versatzmaterialien ein Stützdruck auf, der die Konvergenz zunehmend behindert. Im versetzten Grubenbau wirkt daher neben dem Fluiddruck auch der Stützdruck des Versatzes.

In einem mit Salzgrus oder auch mit Pudersalz versetzten Grubenbau kann die Stützwirkung des Versatzes als Funktion der Porosität des Versatzmaterials dargestellt werden. Mit abnehmender Porosität wird der Konvergenz ein wachsender Widerstand entgegengesetzt. Für diese Abhängigkeit $f_\phi(\phi)$ der Konvergenzrate von der Porosität wird in Anlehnung an [12] der folgende Ansatz verwendet:

$$f_\phi(\phi) = \left[1 + \frac{h(\phi, \phi_r)}{[\phi \cdot g(\phi, \phi_r)]^{1/m}} \right]^{-m} \quad \text{für } \phi < \phi_r \quad (2.11)$$

Die Größe ϕ_r wird als Referenzporosität bezeichnet. Sie kennzeichnet die Porosität, bei der eine Stützwirkung des Versatzes einsetzt. Die Herleitung der Beziehung 2.11 verwendet ebenfalls das Stoffgesetz für stationäres Kriechen von Steinsalz, daher ist der Exponent m in den Gleichungen 2.3 und 2.11 der gleiche. Da die Porosität ϕ im allgemeinen zeitabhängig ist, ergibt sich für die Konvergenzrate K über die Porosität ebenfalls eine implizite Zeitabhängigkeit. Für die Referenzporosität ϕ_r wird für gleiche Versatzmaterialien

lien im gesamten Grubengebäude der gleiche Wert verwendet. Unterschiedliche Versatzmaterialien machen gegebenenfalls auch unterschiedliche Werte für die Referenzporosität erforderlich.

Bei einer Versatzporosität $\phi \geq \phi_r$ wird keine Stützwirkung des Versatzes beobachtet, daher gilt für die Funktion f_ϕ neben der Beziehung 2.11 auch

$$f_\phi(\phi) = 1 \quad \text{für } \phi \geq \phi_r \quad (2.12)$$

Für die Stützfunktion f_ϕ gelten neben der Beziehung 2.12 die weiteren Nebenbedingungen:

- die Stützwirkung des Versatzes setzt bei ϕ_r kontinuierlich ein, d.h.

$$\left. \frac{df}{d\phi} \right|_{\phi = \phi_r} = 0, \quad (2.13)$$

- für kleine Porositäten läuft die Konvergenz einer einzelnen Pore im Versatz wie die eines kleinen Hohlräume im kompakten Salzgestein ab, d.h. $f_\phi(\phi) \approx \phi$ bzw.

$$\left. \frac{df}{d\phi} \right|_{\phi = 0} = 1, \quad (2.14)$$

- für verschwindende Porosität geht die Stützfunktion gegen null,

$$f(\phi = 0) = 0. \quad (2.15)$$

Diese Nebenbedingungen für f_ϕ werden durch die Nebenbedingungen für $h(\phi, \phi_r)$

$$h(\phi = 0) = 1, \quad (2.16)$$

$$h(\phi = \phi_r) = 0, \quad (2.17)$$

$$\left. \frac{dh}{d\phi} \right|_{\phi = \phi_r} = 0 \quad (2.18)$$

und für $g(\phi, \phi_r)$

$$g(\phi = 0) = 1 \quad (2.19)$$

erfüllt.

Statt der quadratischen Approximation für $h(\phi, \phi_r)$ in [12] wird der erweiterte Ansatz

$$h(\phi, \phi_r) = h_0 + h_1 \frac{\phi}{\phi_r} + h_2 \left(\frac{\phi}{\phi_r} \right)^2 + h_3 \left(\frac{\phi}{\phi_r} \right)^3 \quad (2.20)$$

und statt der linearen Näherung für $g(\phi, \phi_r)$ in [12] wird der ebenfalls erweiterte Ansatz

$$g(\phi, \phi_r) = g_0 + g_1 \frac{\phi}{\phi_r} + g_2 \left(\frac{\phi}{\phi_r} \right)^2 \quad (2.21)$$

verwendet. Aus den Nebenbedingungen 2.16 bis 2.19 folgt

$$h_0 = 1, \quad (2.22)$$

$$h_2 = -(3 + 2h_1), \quad (2.23)$$

$$h_3 = h_1 + 2 \quad (2.24)$$

$$g_0 = 1. \quad (2.25)$$

Damit bleiben 3 Parameter h_1 , g_1 und g_2 , die aus den aus gebirgsmechanischen Rechnungen ermittelten Konvergenzraten oder aus dem Kompaktionsverhalten von Versatzproben bestimmt werden können. Ein weiterer Parameter im Ansatz für die Stützfunktion ist die i.A. materialspezifische Referenzporosität ϕ_r , die angibt, bei welcher Porosität die

Stützwirkung des Versatzes einsetzt. Ein Beispiel für die Stützfunktion f_{ϕ} ist im Kapitel 2.2.4.2 gegeben. Dort werden durch Vergleich mit Ergebnissen gebirgsmechanischer Rechnungen [54] für die Konvergenzrate eines versetzten Grubenbaus die Parameter der Stützfunktion ermittelt.

Den PSE-Ansatz [12] für die Stützfunktion von Salzgrusversatz erhält man aus den Gleichungen 2.11, 2.20 und 2.21 mit den Werten $h_1 = -2$, $g_1 = -1$ und $g_2 = 0$.

2.2.2.5 Temperaturabhängigkeit der Konvergenzrate

Die Funktion $f_T(T)$ trägt der Tatsache Rechnung, dass mit höherer Temperatur die Kriechgeschwindigkeit des Salzes wächst, was zu einer schnelleren Verkleinerung der Hohlräume führt. Die Abhängigkeit von der Temperaturerhöhung durch eingelagerten wärmeproduzierenden Abfall und mit wachsender Teufe wird wie folgt berücksichtigt:

$$f_T(T) = \frac{1}{1+a} \exp\left(\frac{Q_1}{R}\left(\frac{1}{T_G(z_{\text{ref}})} - \frac{1}{T(z)}\right)\right) \left\{ 1 + a \exp\left(\frac{\Delta Q}{R}\left(\frac{1}{T_G(z)} - \frac{1}{T(z)}\right)\right) \right\}, \quad (2.26)$$

wobei

Q_1, Q_2	die Aktivierungsenergien der Kriechprozesse,
$\Delta Q = Q_2 - Q_1$	die Differenz der Aktivierungsenergien,
z_{ref}	die Referenzteufe,
$T_G(z_{\text{ref}})$	die Gebirgstemperatur in der Referenzteufe,
$\Delta z = z - z_{\text{ref}}$	der Abstand zur Referenzteufe,
$T_G(z) = T_G - \Delta z \cdot \nabla T$	die lokale Gebirgstemperatur in der Teufe z ,
∇T	der geothermische Temperaturgradient,
$T(z) = \Delta T + T_G(z)$	die lokale Temperatur in der Teufe z und
ΔT	die Temperaturerhöhung über die lokale Gebirgstemperatur sind.

Der Parameter $a \neq 0$ ermöglicht es, in bestimmten Temperaturbereichen unterschiedliches Kriechverhalten von Steinsalz mit den Aktivierungsenergien Q_1 bzw. Q_2 zu berücksichtigen.

2.2.3 Ermittlung der Parameter des Konvergenzansatzes

2.2.3.1 Variationen der Modellparameter

Im Folgenden wird die Abhängigkeit der Konvergenzrate von den einzelnen Modellparametern untersucht. Ergebnisse für Parameter, die nur eine geringe Veränderung der Konvergenzrate bewirken, werden nicht dargestellt. Das Modell zur Ermittlung der Parameter erfordert wegen der Vergleichbarkeit mit den gebirgsmechanischen Rechnungen folgende spezifische Parameterwerte:

- es wird keine Gasbildung betrachtet, sodass eine Druckerhöhung durch Flüssigkeitsverdrängung bei Gasspeicherung entfällt,
- alle Strömungswiderstände nehmen vernachlässigbare Werte an, sodass sich hydrostatische Drücke in den Grubenbauen einstellen.

Feste Eingangsdaten für das Testmodell sind

- die Referenzsohle bei $z_{\text{ref}} = 516$ m unter GOK,
- die Referenzkonvergenzrate $K_{\text{ref}} = 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1}$,
- die mittlere Gesteindichte $\rho_S = 2200 \text{ kg/m}^3$,
- die mittlere Dichte der Flüssigkeit $\rho_L = 1300 \text{ kg/m}^3$,
- der Spannungsexponent $m = 5$,
- der Atmosphärendruck $p_{\text{atm}} = 0,1 \text{ MPa}$,
- der Gebirgsdruck auf der Referenzsohle $p_G = 11,4 \text{ MPa}$,
- der hydrostatische Druck auf der Referenzsohle $p_{\text{hyd}}(z_{\text{ref}}) = 6,6 \text{ MPa}$,
- die Gebirgstemperatur auf der Referenzsohle $T_G(z_{\text{ref}}) = 298 \text{ K}$.

Grubenbauspezifische Eingangsdaten sind

- der Faktor für die lokale Variation der Konvergenzrate $f_{\text{lok}} = 1$,
- der Faktor für die lokale Variation des Gebirgsdrucks $f_{p_G} = 1$,
- das Anfangsvolumen des Grubenbaus $V_0 = 20\,000 \text{ m}^3$,
- die Anfangsporosität eines versetzten Grubenbaus $\phi_0 = 0,40$.

Parameter mit nur geringem Einfluss auf die Konvergenzrate sind h_1 und g_1 in der Stützfunktion für den Versatz. Im Detail untersucht wird im Folgenden der Einfluss der Parameter K_0 , λ_s , g_2 , ϕ_r auf die Zeitverläufe der Konvergenzraten. Hierbei wird jeweils ein Parameter variiert, während die anderen Parameter ihre sogenannten Referenzwerte annehmen. Diese Referenzwerte sind in der Tabelle 2.4 aufgelistet. Bei Variation der Parameter K_0 und λ_s wird ein unversetzter Grubenbau betrachtet, die "Anfangsporosität" beträgt in diesem Fall $\phi_0 = 1$ und bleibt konstant.

Tab. 2.4 Referenzwerte

Parameter	K_0 [1/a]	λ_s [-]	h_1 [-]	g_1 [-]	g_2 [-]	ϕ_r [-]
Referenzwert	$5,5 \cdot 10^{-2}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$	-2,0	-1,0	1000,0	0,40

Abhängigkeit von der Anfangskonvergenzrate K_0

Der Parameter K_0 gibt den Anfangswert der Konvergenzrate zum Modellzeitpunkt $t = 0$ wieder. Zur Untersuchung der Veränderung der Konvergenzrate mit K_0 werden die auf einer logarithmischen Skala äquidistanten Werte $K_0 = 0,01, 0,02, 0,04, 0,08, 0,16, 0,32$ und $0,64$ [1/a] angenommen. Die resultierenden Konvergenzraten sind in der Abbildung 2.2 dargestellt.

Die anfangs über etwa zwei Größenordnungen verteilten Konvergenzraten rücken bereits nach etwa einem Jahr auf eine Größenordnung zusammen. Mit größeren Anfangswerten der Konvergenzrate wandert zudem der Zeitpunkt, an dem die Konvergenzrate sich dem stationären Wert angenähert hat, von einigen hundert Jahren bei $K_0 = 0,01$ [1/a] auf über 10 000 Jahre bei $K_0 = 0,64$ [1/a]. Damit beeinflusst der Anfangswert der Konvergenzrate deutlich das Langzeitverhalten. Für große Zeiten geht die Konvergenzrate in allen Fällen gegen den Wert $K_{\text{ref}} = 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1}$.

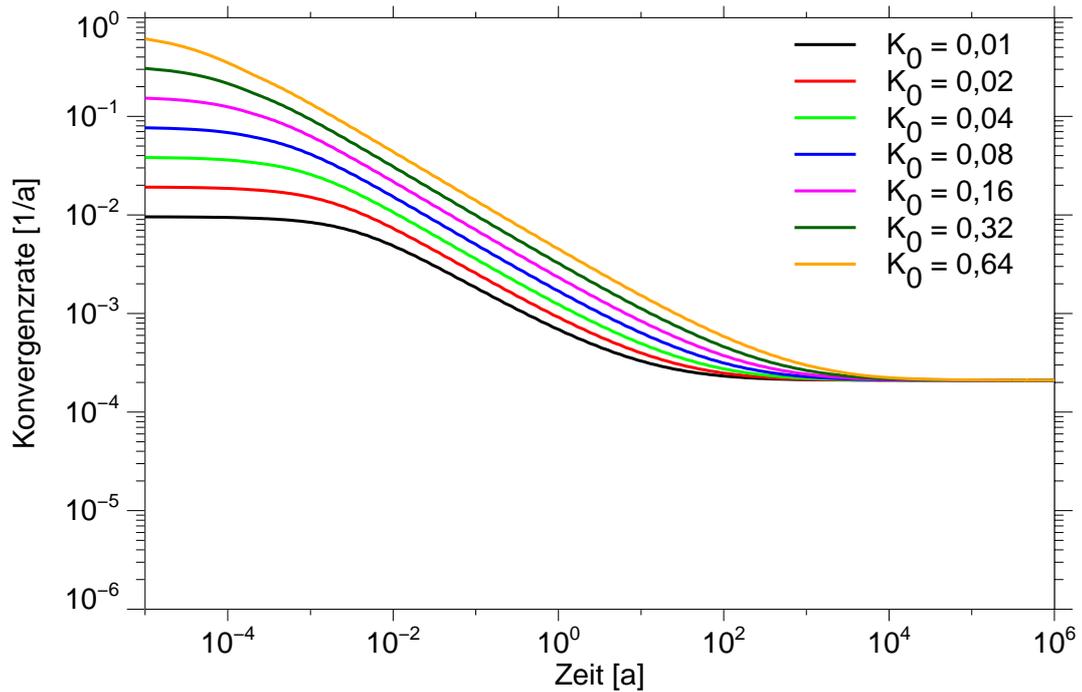


Abb. 2.2: Variation der Anfangskonvergenzrate K_0

Abhängigkeit vom Parameter λ_S

Der Parameter λ_S beschreibt die Vorgeschichte der Konvergenz vor dem Zeitpunkt $t = 0$. Zur Untersuchung der Veränderung der Konvergenzrate mit λ_S werden die Werte $\lambda_S = 1,00 \cdot 10^{-6}$, $4,00 \cdot 10^{-6}$, $1,60 \cdot 10^{-5}$, $6,40 \cdot 10^{-5}$ und $1,28 \cdot 10^{-4}$ angenommen. Die resultierenden Konvergenzraten sind in der Abbildung 2.3 dargestellt.

Kleine Werte von λ_S bedeuten, dass der Zeitpunkt $t = 0$ dichter am Zeitpunkt der Auffahrung des Grubenbaus liegt. Daher zeigt sich eine anfangs stärkere "explizite Zeitabhängigkeit" der Konvergenzrate. Wegen des unveränderten Wertes von K_0 liegen alle Anfangswerte der Konvergenzrate auf dem gleichen Punkt. Die anfänglich stärkere Abnahme der Konvergenzrate bei kleinem λ_S und schwächere Abnahme bei größerem λ_S bewirken ein Auseinanderlaufen der Konvergenzraten, bevor sie sich bei dem stationären Wert wieder treffen. Der Punkt, zu dem der stationäre Wert erreicht wird liegt bei größeren Werten von λ_S bei späteren Zeiten.

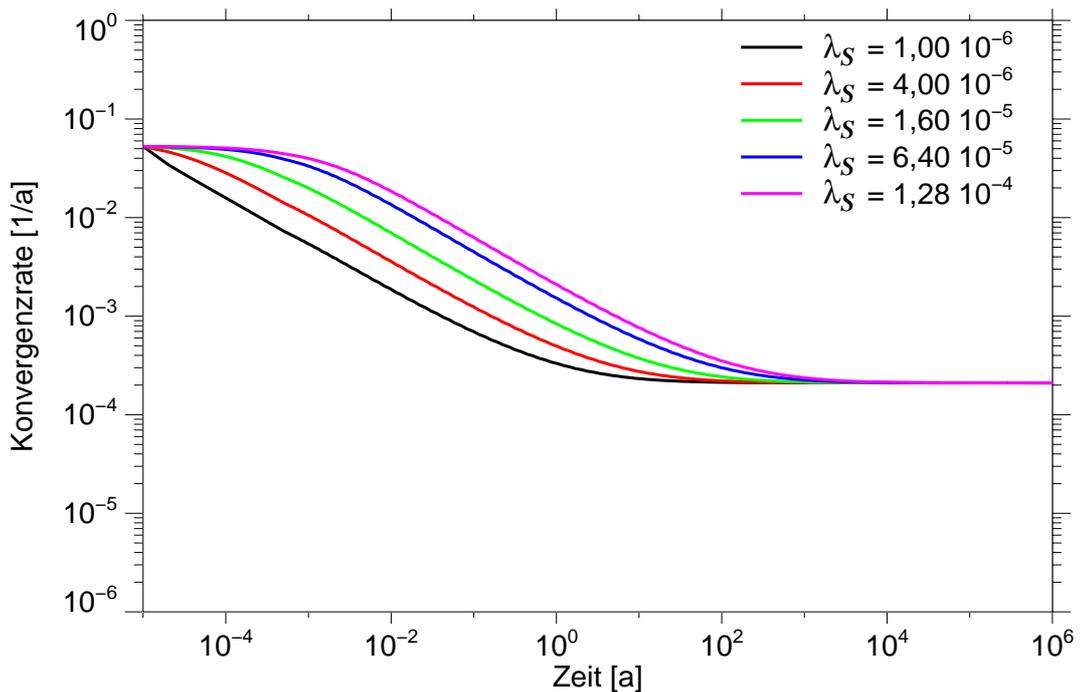


Abb. 2.3: Variation des Parameters λ_S

Im Zeitintervall 10^{-2} bis 1 a zeigen die Konvergenzraten bei Variation von K_0 (siehe Abbildung 2.2) und bei Variation von λ_S einen ähnlichen Verlauf, sodass hier eine Vergrößerung von K_0 durch eine Verkleinerung von λ_S kompensiert werden kann. In Abschnitt 2.2.5 wird eine analytische Abschätzung der Konvergenzraten für kleine Zeiten vorgestellt. Es zeigt sich, dass im vorliegenden Modell die Konvergenzrate unmittelbar nach Auffahrung des Grubenbaues unendlich ist ($K \sim 1 / \sqrt{t}$), die durch diese Singularität bewirkte Volumenänderung aber klein bleibt ($\Delta V \sim \sqrt{t}$).

Abhängigkeit vom Parameter ϕ_r

Der Parameter ϕ_r gibt die Porosität an, bei der die Stützwirkung des Versatzes einsetzt, und wird mit Referenzporosität bezeichnet. Es ist zu erwarten, dass dieser Parameter für gleiche Versatzmaterialien jeweils den gleichen Wert annehmen wird. Zur Untersuchung der Veränderung der Konvergenzrate und der Porosität mit ϕ_r werden die Werte $\phi_r = 0,20, 0,30, 0,40, 0,50$ und $0,60$ angenommen. Die resultierenden Konvergenzraten sind in der Abbildung 2.4 dargestellt.

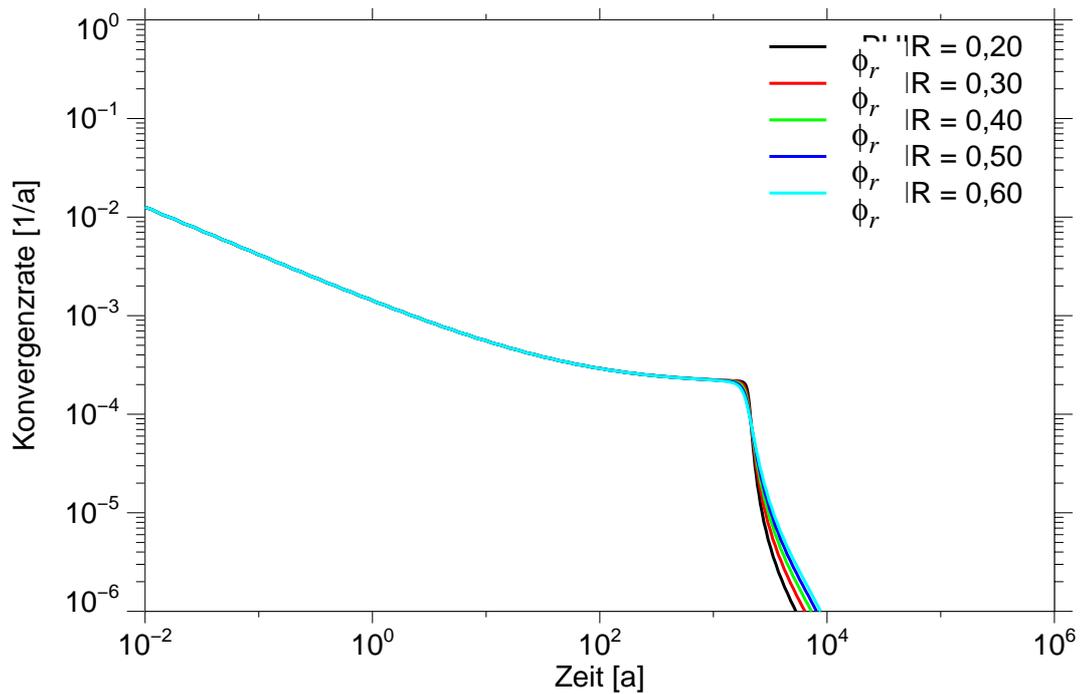


Abb. 2.4: Variation der Referenzporosität ϕ_r .

Kleine Werte von ϕ_r bewirken ein späteres Einsetzen der Stützwirkung des Versatzes und damit eine zunächst größere Konvergenzrate. Diese wiederum verursacht eine stärkere Abnahme der Porosität. Die kleinere Porosität verursacht letztlich eine stärkere Stützwirkung und eine stärkere Abnahme der Konvergenzrate. Insgesamt ist jedoch der Unterschied der Konvergenzraten trotz der relativ großen Bandbreite des Parameters ϕ_r weniger ausgeprägt als bei den anderen Parametern im Konvergenzansatz.

Abhängigkeit vom Parametern in der Stützfunktion vom Versatz

Die Parameter h_1 , g_1 und g_2 beschreiben die Stützwirkung des Versatzes. Eine Variation der Parameter h_1 und g_1 zeigt einen nur geringen Einfluss auf die Konvergenzverläufe. Daher wird hier auf eine Darstellung der Ergebnisse dieser Variationen verzichtet. Zur Untersuchung der Veränderung der Konvergenzrate mit dem Parameter g_2 werden die Werte $g_2 = 10^{+0}$, 10^{+1} , 10^{+2} , 10^{+3} , 10^{+4} , 10^{+5} und 10^{+6} angenommen. Die resultierenden Konvergenzraten sind in der Abbildung 2.5 dargestellt.

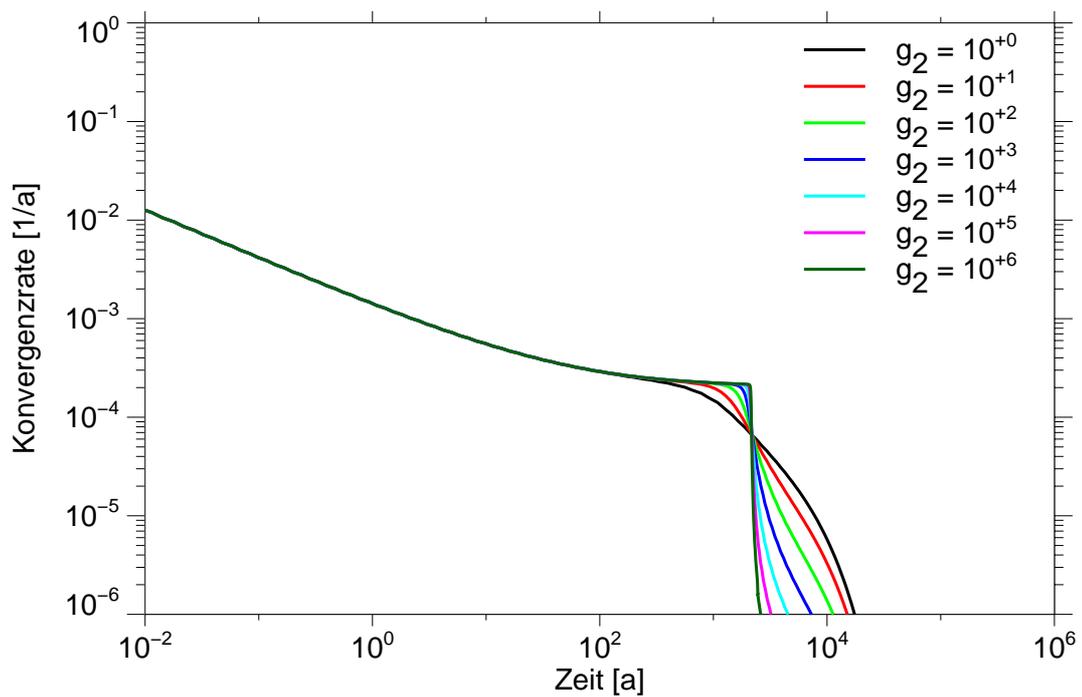


Abb. 2.5: Variation des Parameters g_2

Bei der Variation von g_2 wird eine Referenzporosität von $\phi_r = 0,40$ angenommen. Da die Anfangsporosität ebenfalls 0,40 beträgt, setzt die Stützwirkung bereits bei $t = 0$ ein. Wegen der Nebenbedingung 2.13 (horizontale Tangente von $f_\phi(\phi)$ bei $\phi = \phi_r$) ist die Stützwirkung vom Versatz zunächst nicht sichtbar. Bei kleinen Werten von g_2 macht sich die Stützwirkung vom Versatz früher bemerkbar und die Konvergenzrate nimmt langsamer ab als bei größeren Werten von g_2 . Demgegenüber führen große Werte von g_2 zu einer späteren, aber deutlich schnelleren Abnahme der Konvergenzrate. Da dieses Verhalten auch beim Vergleich der Stützwirkung von trockenem und feuchtem Versatz beobachtet wird, kann der Parameters g_2 zur Beschreibung der Unterschiede im Feuchtegrad des Versatzes herangezogen werden. Ein Beispiel hierfür ist im Kapitel 2.2.4.2 dargestellt.

2.2.4 Vergleich mit Ergebnissen gebirgsmechanischer Rechnungen

Nachfolgend werden die Parameter des Konvergenzansatzes durch Vergleich mit Ergebnissen aus gebirgsmechanischen Rechnungen [54] ermittelt. Hierbei werden zunächst die Parameter K_0 , λ_S und K_{ref} in der Beziehung 2.10 durch Vergleich mit Berechnungen für einen unversetzten Einzelhohlraum im Salzgestein bei unterschiedlichem aber jeweils konstantem Fluiddruck bestimmt.

Anschließend werden mit den so bereits bestimmten Parametern für K_0 , λ_S und K_{ref} die weiteren Parameter in der Stützfunktion des Versatzes ermittelt. Hierbei werden Ergebnisse aus gebirgsmechanischen Rechnungen für einen Einzelhohlraum verwendet, der zum einen mit trockenem Salzgrus und zum anderen mit feuchtem Salzgrus versetzt ist.

2.2.4.1 Anwendungsbeispiel 1: unversetzter Grubenbau

Abbildung 2.6 zeigt den Vergleich der mit dem Konvergenzansatz 2.2 berechneten Konvergenzraten mit solchen aus den gebirgsmechanischen Rechnungen [54]. Letztere wurden für einen Grubenbau mit jeweils unterschiedlichem, aber zeitlich konstantem Innendruck erzielt.

Die schwarzen Kurven zeigen die Ergebnisse für einen leeren Grubenbau unter Atmosphärendruck. Die roten Kurven zeigen das entsprechende Ergebnis für ein bis zum Salzspiegel mit gesättigter Salzlösung gefülltes Grubengebäude, wobei sich im betrachteten Grubenbau ein hydrostatischer Druck von ca. 3,1 MPa ergibt. Die blauen Kurven geben die Konvergenzrate für einen Grubenbau in einem vollständig mit Salzlösung gefüllten Grubengebäude wieder. Der hydrostatische Druck im betrachteten Grubenbau beträgt dann ca. 6,6 MPa.

Die Parameter K_{ref} , K_0 und λ_S bestimmen sich im vorliegenden Fall zu

- $K_{\text{ref}} = 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1}$,
- $K_0 = 5,5 \cdot 10^{-2} \text{ a}^{-1}$,
- $\lambda_S = 5,5 \cdot 10^{-5}$.

Mit diesen Werten werden die Ergebnisse der gebirgsmechanischen Rechnungen (durchgezogene Linien) für die drei unterschiedlichen Innendrucke gut approximiert.

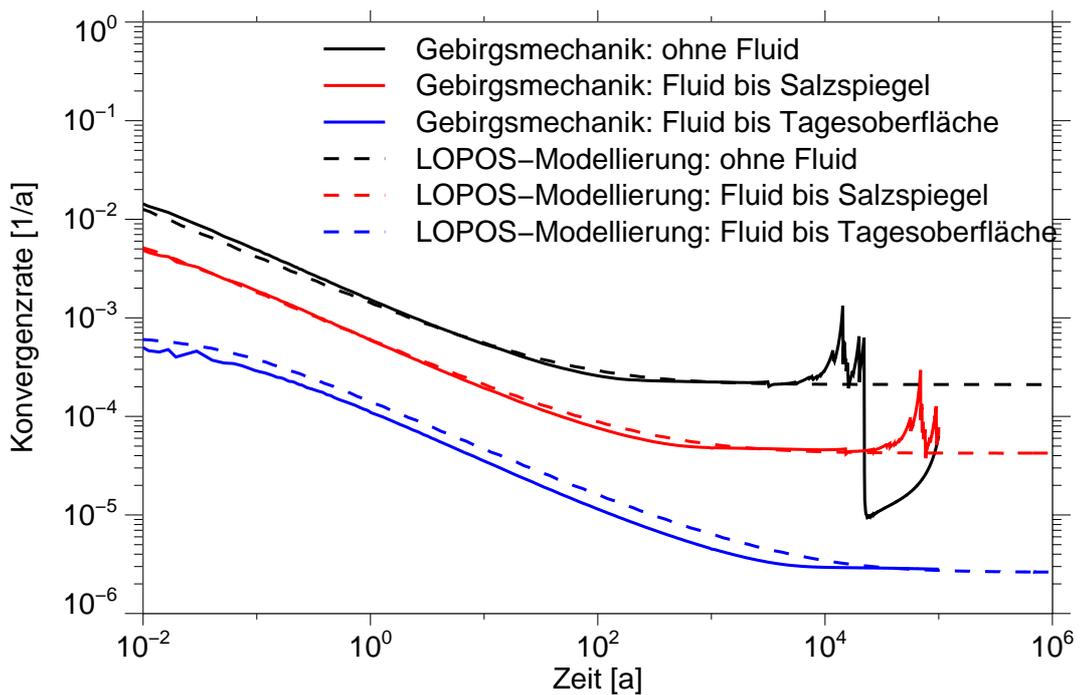


Abb. 2.6: Konvergenzraten für unversetzte Grubenbaue unter konstantem Fluiddruck

2.2.4.2 Anwendungsbeispiel 2: versetzter Grubenbau

Abbildung 2.7 zeigt den Vergleich der mit dem Konvergenzansatz 2.2 unter Verwendung der Stützfunktion 2.11 für Versatz berechneten Konvergenzraten mit solchen aus den gebirgsmechanischen Rechnungen [54]. Letztere wurden für einen mit Salzgrus versetzten, luftgefüllten Grubenbau erzielt. Die Anfangsporosität des Versatzes beträgt hier 31%. Der Fluiddruck ist gleich dem Atmosphärendruck von 0,1 MPa.

Die schwarzen Kurven gelten für einen mit trockenem Salzgrus versetzten Grubenbau. Die roten Kurven zeigen das Ergebnis für den mit feuchtem Salzgrus versetzten Grubenbau. Eine gute Anpassung an die Ergebnisse erhält man mit den auch in [12] verwendeten Werten

$$h_1 = -2, \quad (2.27)$$

$$g_1 = -1 \quad (2.28)$$

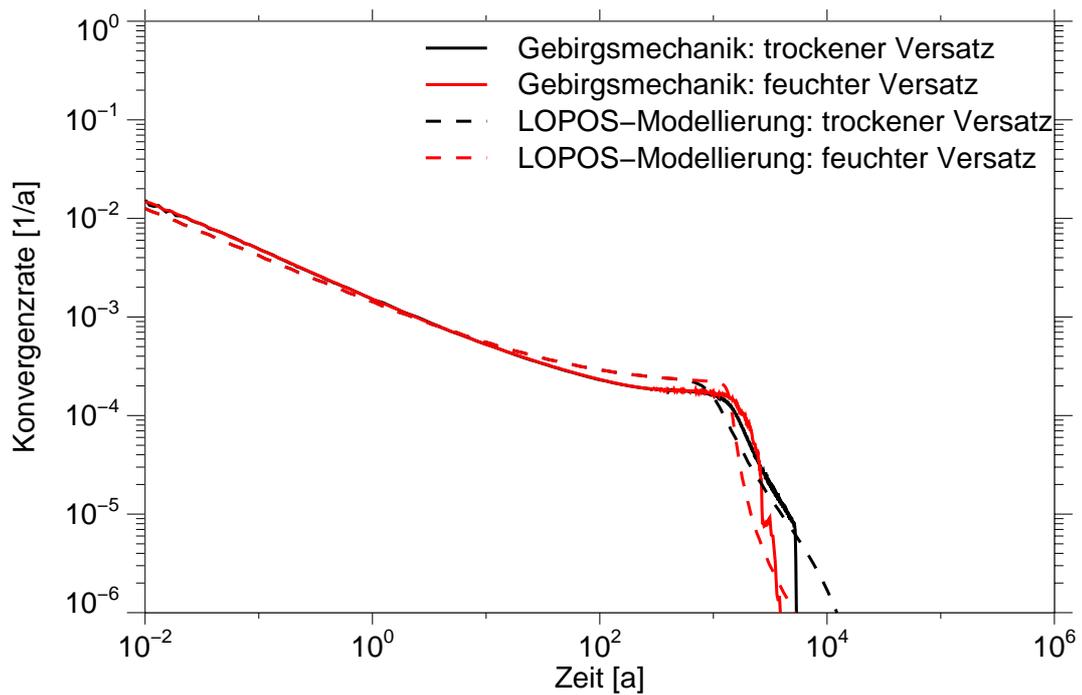


Abb. 2.7: Konvergenzraten über der Zeit: trockener und feuchter Versatz

und dem zusätzlichen Parameter g_2 , der je nach Versatzfeuchte die Werte

$$g_2 = 10^1 \quad \text{für trockenen Versatz} \quad (2.29)$$

$$g_2 = 10^3 \quad \text{für feuchten Versatz} \quad (2.30)$$

annimmt. Für die Referenzporosität wurde hier der Wert 0,25 verwendet, d.h. im vorliegenden Fall setzt die Stützwirkung sowohl bei trockenem als auch bei feuchtem Versatz erst bei einer Versatzporosität unter 25% ein.

Für Zeiten kleiner als ca. 500 a folgen die Kurven der Abbildung 2.7 dem Verlauf der Konvergenzrate eines unversetzten Grubenbaus ohne Flüssigkeitsfüllung (s. Abbildung 2.6), d.h. es ist noch keine Stützwirkung des Versatzes vorhanden. Nach ca. 500 Jahren unterschreitet die Versatzporosität den Wert der Referenzporosität von 25% und die Stützwirkung macht sich bemerkbar. Die Kurve für feuchten Versatz liegt in einem Zeitin-

tervall von ca. 500 a bis ca. 1600 a zunächst über der von trockenem Versatz, danach fällt sie aber wegen der bereits weiter fortgeschrittenen Kompaktion des feuchten Versatzes steiler ab.

Trotz der etwas größeren Abweichung zwischen den Ergebnissen aus den gebirgsmechanischen Rechnungen und denen der LOPOS-Modellierung zeigen die Kurven der Abbildung 2.8 das charakteristische Verhalten des feuchten Versatzes im Vergleich zum trockenen Versatz: die Stützwirkung ist bei gleicher Versatzporosität (< 25%) geringer, die Konvergenzrate ist folglich größer. Bei kleinen Porositäten nimmt die Stützwirkung dann aber schneller zu als im Fall trockenem Versatzes. Letztendlich bleibt die Stützwirkung von feuchtem Versatz bei gleicher Porosität stets geringer als die von trockenem Versatz.

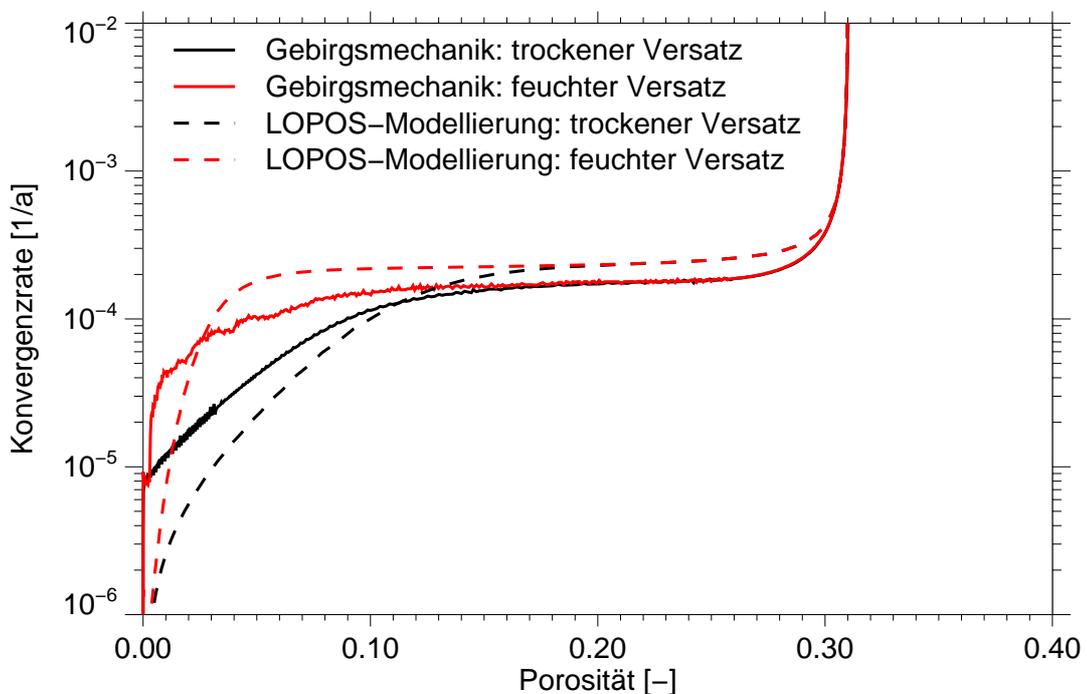


Abb. 2.8: Konvergenzraten über der Porosität: trockener und feuchter Versatz

2.2.5 Verhalten der Konvergenzrate für kleine und große Zeiten

Die Konvergenzraten eines unversetzten Grubenbaues, in dem sich Flüssigkeit unter unterschiedlichem konstanten hydrostatischen Druck befindet, zeigen ein charakteristisches Verhalten. Zu kleinen Zeiten liegen die Kurven für unterschiedliche Drücke deutlich dichter nebeneinander als zu großen Zeiten. Außerdem erfolgt die Annäherung an den

jeweiligen stationären Wert der Konvergenzrate bei höheren Druck zu deutlich späteren Zeiten. Dieses Verhalten kann aus dem vorliegenden Konvergenzansatz analytisch abgeleitet werden.

Im Folgenden wird daher zunächst das Verhalten der Konvergenzrate kurz nach der Aufnahme des Grubenbaus betrachtet. In der Anfangsphase ist der Fluiddruck gleich dem konstanten Atmosphärendruck und der Grubenbau ist unversetzt. Damit gilt $f_p = 1$ und $f_\phi = 1$. Zur Integration der Beziehung 2.1 reicht bereits aus, dass beide Funktionen zeitlich konstant sind, und es folgt

$$-\int_{V_0}^V \frac{dV'}{V' f_t(V')} = \int_{t_0}^t K_{\text{ref}} f_p f_\phi dt' \quad (2.31)$$

Die Integration liefert mit $A = \alpha \cdot K_{\text{ref}}$ in Gleichung 2.6 die Umkehrfunktion von $f_t(t)$

$$t(f_t) = \frac{\alpha}{f_p f_\phi} \left[\frac{1}{f_t - 1} - \ln \left(1 + \frac{1}{f_t - 1} \right) \right] + t_0 \quad (2.32)$$

Hieraus lässt sich die Funktion $K(t) = K_{\text{ref}} \cdot f_p \cdot f_\phi \cdot f_t(t)$ ermitteln.

Der Ausdruck 2.32 ist geeignet, das Verhalten der Konvergenzrate bei $t = t_0$ zu untersuchen. Es gilt

$$\lim_{t \rightarrow t_0} f_t(t) \rightarrow \infty \quad (2.33)$$

und damit

$$\lim_{f_t \rightarrow \infty} t(f_t) \rightarrow \frac{\alpha}{f_p f_\phi} \left[\frac{1}{f_t - 1} - \left(\frac{1}{f_t - 1} - \frac{1}{2} \frac{1}{(f_t - 1)^2} + \dots \right) \right] + t_0 \quad (2.34)$$

Für $t \approx t_0$, d.h. $f_t \gg 1$, ergibt sich näherungsweise

$$t - t_0 \approx \frac{\alpha / 2}{f_p f_\phi} \cdot \frac{1}{(f_t - 1)^2} \quad (2.35)$$

bzw. aufgelöst nach f_t

$$f_t \approx 1 + \frac{\sqrt{\alpha / 2}}{\sqrt{f_p f_\phi} \cdot (t - t_0)}. \quad (2.36)$$

Bei konstanten, aber unterschiedlichen Fluiddrücken p_1 und p_2 ergibt sich für das Verhältnis η der Konvergenzraten $K(p_1)/K(p_2)$ mit 2.36 für kleine Zeiten $t \approx t_0$

$$\eta_{1,2}^0 = \frac{f_t(p_1) f_p(p_1)}{f_t(p_2) f_p(p_2)} \approx \frac{\sqrt{f_p(p_1)}}{\sqrt{f_p(p_2)}} = \left(\frac{1 - \frac{p_1}{p_G}}{1 - \frac{p_2}{p_G}} \right)^{\frac{m}{2}}. \quad (2.37)$$

Für große Zeiten $t \rightarrow \infty$ gilt andererseits wegen $\lim_{t \rightarrow \infty} f_t = 1$

$$\eta_{1,2}^\infty = \frac{f_p(p_1)}{f_p(p_2)} = \left(\frac{1 - \frac{p_1}{p_G}}{1 - \frac{p_2}{p_G}} \right)^m. \quad (2.38)$$

Dieses Verhalten zeigen auch die Konvergenzraten aus den gebirgsmechanischen Rechnungen, wie aus der Abbildung 2.6 im Kapitel 2.2.4 ersichtlich ist.

2.2.6 Zusammenfassung zu Absicherung von Konvergenzansätzen

Der Konvergenzansatz mit den Erweiterungen zur Beschreibung der expliziten Zeitabhängigkeit und der unterschiedlichen Stützwirkung von trockenem und feuchtem Versatz wurde zur Berechnung der Konvergenz eines Modellgrubenbaus eingesetzt. Durch Vergleich der Konvergenzraten für einen unversetzten Grubenbau unter verschiedenen hydrostatischen Drücken mit denen aus entsprechenden gebirgsmechanischen Rechnungen

gen konnten die Parameter des Konvergenzansatzes bestimmt werden, sodass die Zeitverläufe der Konvergenzrate gut mit denen aus der gebirgmechanischen Rechnung übereinstimmen. Das charakteristische Verhalten der Konvergenzrate, schnelle Abnahme zu kleinen Zeiten und spätere Annäherung an die stationären Konvergenzraten bei höherem hydrostatischen Druck, werden vom Konvergenzansatz richtig wiedergegeben.

Mit den für einen unversetzten Grubenbau ermittelten Parametern des Konvergenzansatzes wurde anschließend die Konvergenz eines versetzten Grubenbaus untersucht. Hierbei wurde sowohl trockener Versatz als auch feuchter Versatz betrachtet. Der Ansatz für die Stützfunktion von Versatz ermöglicht, mit nur einem weiteren Parameter die Unterschiede von feuchtem und trockenem Versatz zu beschreiben. Das Zeitverhalten der Konvergenzrate zeigt hierbei das erwartete und aus den gebirgsmechanischen Rechnungen bestätigte Verhalten von feuchtem Versatz, nämlich die im Vergleich zu trockenem Versatz anfänglich geringere Stützwirkung und das schnellere Abnehmen der Konvergenzrate bei sehr kleinen Porositäten.

Absicherung von Konvergenzansätzen

Kenntnisstand

- Der Konvergenzansatz wurde um die Effekte Teufenabhängigkeit, Anstieg des Fluid-drucks durch Flüssigkeitszutritt oder Gasbildung, Stützwirkung von trockenem oder feuchtem Versatz und Zeitabhängigkeit ergänzt.
- Die Zeitverläufe der mit dem neuen Ansatz berechneten Konvergenzrate stimmen gut mit denen aus der gebirgmechanischen Rechnung überein.
- Der Einfluss einer Durchfeuchtung des Salzgebirges auf die Konvergenzrate wurde hier noch nicht im Detail untersucht und verstanden.

Relevanz:

hoch

Aus Unsicherheitsanalysen geht hervor, dass die Konvergenz einen der wichtigsten Nahfeldprozesse im Hinblick auf die Dosis darstellt.

Empfehlungen für weitere FuE

Gebirgsmechanische Rechnungen zum Einfluss der Durchfeuchtung des Salzgebirges auf die Konvergenzrate und entsprechende Anpassung des Konvergenzansatzes

2.3 Auswirkungen von Gasen im Endlager

Von allen Aspekten, die in Endlager-Sicherheitsanalysen von Belang sind, wurde die Auswirkungen der Gasbildung in Endlagern auf internationaler Ebene erst vergleichsweise spät, d.h. ab Anfang der 80er Jahre, intensiver untersucht. Bis zum Ende der 90er Jahre wurden hierzu aber umfangreiche FuE-Arbeiten innerhalb nationaler und internationa-

ler FuE-Programme durchgeführt. Ende 1999 erschien ein ausführlicher, gemeinsamer EU/NEA-Bericht (Gas Status Report [88]) mit einer aktuellen Bestandsaufnahme der bisher durchgeführten Arbeiten und des erreichten Kenntnisstands zur Gasproblematik im Zusammenhang mit Endlagern. Im folgenden wird auf die Ergebnisse eines internationalen Workshops in Reims und die Ergebnisse aktueller Modellrechnungen zur Auswirkung von Gasen in Endlagern eingegangen.

2.3.1 Ergebnisse des NEA-Workshop (Reims)

In dem oben genannten "Gas Status Report" wurde schwerpunktmäßig eine Übersicht zu folgenden Themenfeldern gegeben:

- vorliegende Meßergebnisse und konzeptuelle und modellmäßige Ansätze zur Berücksichtigung der Gasbildung, Gasspeicherung und des Gastransports durch künstliche und natürliche Barrieren eines Endlagers im tiefen geologischen Untergrund,
- verschiedene Vorgehensweisen bei der Berücksichtigung der Gasbildung in Studien zur Langzeitsicherheit und in „Safety Cases“,
- Potentielle Auswirkungen der Gasbildung auf die Langzeitsicherheit von Endlagern.

Aufbauend auf dem in diesem Bericht beschriebenen Kenntnisstand sollte auf einem Workshop ermittelt werden, welche ungelösten Probleme und Wissenslücken noch bestehen, um die Gasproblematik in Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager angemessen behandeln zu können. Dieser Workshop [22] wurde unter der gemeinsamen Federführung von der EU und der NEA mit Unterstützung der Andra und der Universität Reims ausgerichtet und fand vom 26. bis 28.6.00 in Reims statt. Die Proceedings zu diesem Workshop erschienen 2001 als NEA-Publikation [23].

Der Workshop gliederte sich in zwei Hauptabschnitte. Im ersten Teil wurden insgesamt 21 eingeladene Plenarvorträge zu den Schwerpunktthemen

- Präsentation der Inhalte des „Gas Status Reports“,
- Aktuelle Vorgehensweisen zur Berücksichtigung der Gasproblematik in generischen Langzeit-Sicherheitsanalysen,
- Ansichten und Erwartungen der Genehmigungsseite,
- Geplante Strategien zur Behandlung der Gasproblematik,

- Übersichtsvortrag und Präsentation der Ergebnisse der vertieften Diskussionen der Arbeitsgruppen

gehalten. In den Arbeitsgruppen wurden im 2. Teil des Workshops verschiedene Einzelthemen, die nachfolgend aufgeführt sind, von den Teilnehmern vertieft diskutiert.

- Chemische Effekte mit Einfluss auf die Gasbildung in HLW-Endlagern
- Gastransport durch Bentonit und natürliche Tone
- Gasdruckaufbau und Konsequenzen eines Überdrucks
- Auswirkungen der Gasbildung auf den Schadstofftransport und die Grundwasserströmung

Aus den Vorträgen und den erstatteten Berichten aus den Arbeitsgruppen wurden die folgenden, wesentlichen Aussagen und Empfehlungen abgeleitet:

Nach dem heutigen Stand des Wissens kann bereits grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass es immer möglich sein wird, für die meisten Abfallarten, die für die Tieflagerung vorgesehen sind, ein Endlagerkonzept zu entwickeln, das den Sicherheitsaspekten der Gasbildung Rechnung trägt. Das heißt, das mit hinreichend belastbaren Argumenten belegt werden kann, dass die Gasbildung den Sicherheitsnachweis nicht infrage stellt. Diese Aussage berücksichtigt auch die Tatsache, dass gewisse Einzelfragen noch der abschließenden Klärung bedürfen. Die Prozesse, die im Endlager und in der Geosphäre von der Gasbildung beeinflusst werden, sind insgesamt komplex und häufig gekoppelt. Insofern könnte es unmöglich sein, über die Modellierung dieser Prozesse genaue quantitative Vorhersagen für großräumige Geometrien zu machen. Stattdessen ist zu erwarten, dass die Anforderungen der Sicherheitsnachweise eher mit alternativen, mehr empirisch begründeten Modellen erfüllt werden können. Zur Rechtfertigung der Anwendbarkeit solcher Modelle wird einerseits eine geeignete repräsentative Datenbasis benötigt, andererseits muss auch belegt werden, dass die grundlegenden Prozesse verstanden und hinreichend beschrieben werden.

Die Gasmengen und -bildungsraten sind in einem Endlager für schwach und middleaktive Abfälle (LLW/ILW) wegen des größeren Inventars an metallischen und organischen Stoffen erheblich höher als in einem Endlager für hochaktive Abfälle (HLW) und abgebrannte Brennelemente (SF). Daher besteht die Möglichkeit der Bildung potentiell sicherheitsrelevanter Gasmengen praktisch nur für Endlager bzw. Endlagerbereiche für ILW/LLW.

Es bestand Einvernehmen darüber, dass die relevanten wissenschaftlichen Probleme im Zusammenhang mit der Gasbildung hinreichend verstanden werden, aber auch noch Bedarf an zusätzlichen Daten und robusteren Vorhersagemodellen besteht. Für ILW/LLW liegt das Schwergewicht der zukünftigen FuE-Arbeiten auf der mikrobiellen Gasbildung, der Vertrauensbildung bei den Modellen und der Entwicklung empirischer, auf statistischen Grundlagen beruhender Modelle. Bei HLW und SF stehen Untersuchungen für eine verbesserte Beschreibung der Korrosionsprozesse im Vordergrund, sowohl im Hinblick auf die Einflussgrößen als auch auf die Genauigkeit der Daten.

Es wird empfohlen, dass bei der Auslegung des Endlagers Maßnahmen vorgesehen werden, mit denen die Gasbildung minimiert und deren Konsequenzen gemindert werden. Hierzu wurden verschiedene Beispiele genannt, die bereits in Endlagerkonzepten vorgesehen sind bzw. weitere solcher Maßnahmen vorgeschlagen. Nach der Auffassung eines Vertreters der Genehmigungsseite werden solche Maßnahmen als Bestandteil der Optimierung des Endlagers betrachtet. Die Gasproblematik sollte daher bei der Endlagerplanung bereits zu einem frühen Zeitpunkt einbezogen werden.

Es besteht der allgemeine Wunsch nach einem besseren Verständnis der instationären Vorgänge im Endlager am Anfang der Nachbetriebsphase, d.h. in der Übergangsphase, in der die Wiederaufsättigung stattfindet und sich das langzeitige quasi-stationäre chemische Milieu einstellt. Die thermischen Effekte wirken sich in dieser Phase vermutlich am stärksten aus. Sowohl die Gasbildung als auch das Verhalten der Buffer-Materialien Bentonit oder Salzgrus könnten empfindlich auf die Veränderungen in dieser Übergangsphase reagieren.

Der Gastransport durch Bentonitabdichtungen oder -buffer ist eine Schlüsselfrage bei der Entwicklung von Endlagerkonzepten. Obwohl unter den Fachleuten offenbar noch unterschiedliche Vorstellungen über die Gas-Transportmechanismen bestehen, herrschte in diesem Workshop Einvernehmen darüber, dass der Gastransport durch kompaktierten, gesättigten Bentonit nur über die Bildung von Mikrorissen im Ton stattfinden kann und andere Transportmechanismen zumindest äußerst unwahrscheinlich ist. Trotzdem wurde weiterer Bedarf an sorgfältigen Untersuchungen festgestellt, mit denen die Mechanismen des Gastransports durch die Buffermaterialien weiter aufgeklärt werden. Der Spannungstensor ist hierbei der wesentliche Faktor für die Rissbildung. Modellentwicklungen sind erforderlich sowohl bei der Simulation der Prozesse für das Verständnis und die Interpretation von Laborversuchen als auch im Hinblick auf einen mehr empirischen Ansatz

für die Erstellung von PA-Werkzeugen für großmaßstäbliche Anwendungen. Letztere bedürfen noch der Absicherung durch geeignete Felduntersuchungen. Es wird erwartet, dass der Bentonit nach dem Durchgang des Gases wieder ausheilt, aber dazu werden noch Daten zur Absicherung benötigt.

Der Workshop kam auch beim Ton zu einer ähnlichen Auffassung, dass nämlich der Gas-transport durch Wirtsgestein und Buffermaterialien zumindest bei den plastischen Tonen in ähnlicher Weise vonstatten geht wie in Bentonit. Jedoch liegen für den Ton und insbesondere für Tonstein erst sehr wenige Daten vor, und es besteht dringender Bedarf an ergänzenden Messungen. Der Gastransport ist vermutlich mit der Festigkeit des Tonsteins korreliert. Die Ausheilung von Rissen in der Auflockerungszone und der vom Gasdruck induzierten Risse hängt vermutlich von der Bindungsstärke und der mineralogischen Zusammensetzung der Tone ab. Das Verhalten einiger Tonsteine entspricht eher dem geklüfteter Gesteine als dem ungestörter Tone.

Der Aufbau eines Überdrucks aufgrund einer geringen Durchlässigkeit des Wirtsgesteins ist bei den geklüfteten kristallinen Gesteinen praktisch ausgeschlossen. Dieses könnte nur in tonigen oder salinaren Wirtsgesteinen geschehen - bei ausreichend großen Gasbildungs-raten - wodurch dieses Problem nur die Endlager für ILW/MLW betrifft. Für HLW/SF im ungestörten Salzgestein kann die Gasbildung durch den Mangel an verfügbarem Wasser begrenzt werden, so dass ein unzulässiger Druckaufbau hier nur bei Störfällen mit Wasserzutritten möglich ist. In Salz- und Tonsteinen ist somit eine Auflockerungszone die bevorzugte Wegsamkeit für einen Gastransport, und ein verbessertes Verständnis der Transportmechanismen und der Rissausheilung dieser Bereiche ist notwendig. Es sollte ferner die Möglichkeit untersucht werden, ob bei einem sehr langsamen Druckaufbau eine Dilatanz und damit einhergehende Zunahme von Porosität und Permeabilität auftreten könnte, die den Gasdruck so weit begrenzt, dass weder eine Mikrorissbildung noch ein Fracken des Gebirges auftritt.

Bisher durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, dass in Buffern aus kompaktiertem Ton und in geringdurchlässigen Tonsteinen beim Durchgang von Gas nur sehr wenig Wasser verdrängt wird. In diesen Materialien ist somit die Kopplung von Wasser- und Gastransport offensichtlich gering und deshalb wird auch keine Verstärkung des an die Wasserphase gebundenen Schadstofftransports hervorgerufen. Die Auswirkung der Gasbildung auf den Schadstofftransport ist in diesem Fall nur indirekt, wie etwa durch Bildung von Rissen oder durch das Austreiben von Wasser aus den Abfallbehältern. Im

Gegensatz zu diesen Gesteinen zählen für geklüftete Gesteine und Salzgrusversatz die Einflüsse des Gastransports auf den wassergetragenen Schadstofftransport noch zu den wichtigen offenen Fragen. Hierfür werden verschiedene Modelle diskutiert und diese Fragestellung ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Während davon auszugehen ist, dass die Grundlagen der Zweiphasen-Strömungen in geklüfteten Gesteinen in ausreichendem Umfang bekannt sind, ist die Modellierung des Transports im Feldmaßstab noch ein ungelöstes Problem, weil Schwierigkeiten bestehen, geeignete hydrogeologische Parameter und Stoffgesetze für weiträumige Geometrien zu ermitteln. Die Anwendbarkeit des klassischen Kontinuumsmodells für erheblich größere Geometrien als die intrinsische Größe der Fließmechanismen ist ebenfalls noch nicht gesichert. Hierzu müssen noch weitere Untersuchungen erfolgen, in denen auch die Wechselwirkungen zwischen der Gas- und Wasserphase berücksichtigt werden. Das erforderliche „upscaling“ von Laborergebnissen kann durch geeignete In-situ-Untersuchungen, in denen die integralen Einwirkungen auf einen Gesteinskörper beobachtet werden, oder durch Vergleich mit natürlichen Analoga unterstützt werden.

Zur Beachtung empfohlen wurde außerdem der Effekt, dass das Gas in der Geosphäre die Aktivität der dort lebenden Mikroben anregen kann und dadurch der Schadstofftransport beeinflusst werden könnte.

2.3.2 Modellrechnungen zur Auswirkung von Gasen im Endlager

In einem Endlager für radioaktive Abfälle werden durch unterschiedliche Prozesse Gase gebildet. Die erzeugten Gasmengen sind dabei im Allgemeinen erheblich und führen zu einem Gasdruckaufbau im Endlager. Bei der Bewertung der Endlagersicherheit muss daher der Gasdruck und die damit verbundenen Auswirkungen auf die geologische Barriere untersucht werden. Aus diesem Grund wurden orientierende Modellrechnungen zu der Entwicklung der Gasdrücke in einem Endlager durchgeführt und in einem separaten Bericht ausführlich dargestellt [93]. Bei den Modellrechnungen wurden verschiedene Abfallarten und die Prozesse der Gasproduktion berücksichtigt, sowie unterschiedliche Wirtsfornationen und deren Gaseindringdrücke betrachtet.

Die Gasproduktion erfolgt durch die anaerobe Korrosion und Zersetzung im Abfall enthaltener Stoffe, und bei hochaktiven Abfällen zusätzlich durch die Radiolyse, wobei letztere im Vergleich mit der Korrosion und Zersetzung im Allgemeinen vernachlässigt werden kann. Die relevanten Abfallbestandteile für die Gasproduktion sind Eisen und organische Verbindungen. Bei der Umwandlung dieser Stoffe wird entweder Wasser verbraucht, oder dessen Vorhandensein ist zum Ablauf der Umwandlung notwendig. Für LLW ist im Allgemeinen ausreichend Wasser in den Abfällen vorhanden. Für HLW ist die Korrosion vom Angebot von Wasser aus dem umliegenden Gebirge abhängig. Ein geringdurchlässiges, trockenes Gebirge kann die Gasbildung bei HLW begrenzen, während ein feuchtes Gebirge zu einer ungehinderten Korrosion des HLW-Behälters führt.

Die spezifischen Gasmengen, die bei der Umwandlung der Stoffe produziert werden, sind durch die Stöchiometrie der zu Grunde liegenden chemischen Reaktionen festgelegt. Während die spezifische Gasmenge durch die anaerobe Korrosion von Eisen relativ unabhängig vom betrachteten Endlagerkonzept ist, hängt der Umwandlungsprozess der organischen Stoffe sehr stark von dem Vorhandensein anderer Stoffe, wie Sulfat oder Nitrat ab. Für die Modellrechnungen wurden spezifische Gasmengen von $0,535 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ für Eisen, $0,2 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ für Zellulose und $3,2 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ für Polyethylen verwendet. Die Volumina beziehen sich auf den Normzustand (N), d. h. 273,15 K und 1 atm.

Wenn der Gasdruck im Endlager den sogenannten Gaseindringdruck der Wirtsgesteinsformation überschreitet, kann das produzierte Gas das Porenwasser teilweise oder ganz aus den Poren der Formation verdrängen und advektiv durch Zweiphasenfluss aus dem Endlager transportiert werden. Die Gaseindringdrücke typischer Wirtsgesteinsformationen unterscheiden sich beträchtlich.

Sehr geringe Gaseindringdrücke besitzt geklüfteter Granit. Auch bei Tonformationen ist der Gaseindringdruck gering genug, so dass mit einem Entweichen der Gase aus dem Endlager gerechnet werden kann. Der Gaseindringdruck von Salz oder der ungeklüfteten Granitmatrix ist demgegenüber sehr hoch, so dass in diesen Gesteinen kein Zweiphasenfluss stattfinden kann. Da aber die zur Endlagerung betrachteten Granitformationen immer Klüfte aufweisen, ist auch für Granit mit einem Entweichen der Gase aus dem Endlager zu rechnen.

Ist das Entweichen der Gase aus dem Endlager nicht möglich - wie zum Beispiel in Salzformationen - oder aus technischen Gründen nicht erwünscht, so ist es möglich die Gase im Porenraum der Formation oder des Versatzes im Endlager zu speichern. In den Modellrechnungen wurde diese Möglichkeit der Gasspeicherung im Porenvolumen des Versatzes in einem Endlager untersucht. Dabei wurde die Endlagerung von LLW und HLW exemplarisch in den Wirtsgesteinsformationen Tonstein und Salz betrachtet. Für die Endlagerung von HLW in Salz wird von einem beschränkten Wasserangebot und somit von einer beschränkten Gasproduktion ausgegangen. In den anderen Fällen wird davon ausgegangen, dass alle gasbildenden Stoffe vollständig umgesetzt werden.

Die Abfallzusammensetzung des LLW wurde in den Modellrechnungen entsprechend jener im Ostfeld des Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) gewählt. Diese Abfälle wurden erst in den letzten Jahren eingelagert und werden als repräsentativ für LLW angesehen. Durch den LLW werden dann 547,5 Nm³ Gas pro Kubikmeter Abfall erzeugt. Für HLW wurde die direkte Endlagerung von abgebrannten Brennelementen in zwei unterschiedlichen Behälterttypen betrachtet, nämlich Kokillen bzw. Polluxbehältern, die sich bezüglich ihrer Metallmasse unterscheiden. Für die Kokillen wurde dabei von einer Bohrlochlagerung und für die Polluxbehälter von einer Streckenlagerung ausgegangen.

2.3.2.1 Ergebnisse der Modellrechnungen

Für die Endlagerung in Salz ergibt sich in allen betrachteten Fällen die Möglichkeit der Speicherung der gebildeten Gase in dem Porenvolumen des Versatzes. Dabei müssen allerdings Anteile nicht-kompaktierbaren Versatzes, wie beispielsweise Kies mit eingebracht werden, da der Porenraum im kompaktierbaren Versatz aufgrund der Konvergenz schnell verschwindet. Wenn ausschließlich kompaktierbarer Versatz verwendet wird, kommt es zu einer Überschreitung des Gebirgsdrucks. Aufgrund der Plastizität des Salzgesteins führt dies zur Bildung neuer Hohlräume, die das Gas aufnehmen. Man muss dabei berücksichtigen, dass nicht vorhersehbar ist, an welcher Stelle sich die neuen Hohlräume bilden. Da Verschlussbauwerke ihre Geometrie beibehalten, ist es möglich, dass sich Wegsamkeiten an den Verschlüssen vorbei bilden, wenn sich das Gebirge in der Nähe dieser aufweitet. Aus diesem Grund sollte eine Aufweitung des Gebirges vermieden werden und statt dessen die notwendigen Mengen nicht-kompaktierbaren Versatzes eingebracht werden.

Die Mengen Versatz, die zur Speicherung der gebildeten Gase eingebracht werden müssen, hängen von der Teufenlage des Endlagers ab. Für die Endlagerung von LLW im Salz werden bei einer Endlagerteufe von 400 m $15,8 \text{ m}^3$ nicht kompaktierbarer Versatz pro m^3 Abfall benötigt. Bei einer Teufe von 800 m ist der entsprechende Wert aufgrund des höheren Gebirgsdrucks geringer und beträgt $8,0 \text{ m}^3$. Die zur Gasspeicherung benötigte Versatzmenge übersteigt das übliche Abfall-zu-Versatz-Verhältnis in Endlagern, das z.B. im Ostfeld des ERAM 1:1,7 beträgt. Somit müssen zusätzlich zu den technisch bedingten Hohlräumen zwischen den Abfallbehältern und in den Firsten der Einlagerungshohlräume weitere verfüllte Hohlräume zur Verfügung gestellt werden. Die Bereitstellung des Porenvolumens zur Speicherung der produzierten Gase erscheint aber realisierbar.

Werden HLW-Kokillen in einer Salzformation eingelagert, so wird die Gasproduktion durch die zutretende Wassermenge begrenzt. Bei der Streckenlagerung werden Wassermengen mit dem Versatz in die Strecken eingebracht, so dass hier von etwa 50 kg Wasser pro Meter Einlagerungsstrecke auszugehen ist. Pro Kilogramm Wasser werden $1,25 \text{ Nm}^3$ Gas produziert. Diese Gasmengen können in der Strecke gespeichert werden, wenn bei einer Endlagerteufe von 800 m etwa 1 m^3 nicht kompaktierbarer Versatz mit einer Porosität von 40 % pro Meter Streckenlänge eingebracht werden. Bei der Bohrlöchlagerung wurde die maximale Wassermenge aus dem Gebirge zu etwa 5 kg pro Meter Bohrlöchlänge abgeschätzt. In den Bohrlöchern kann ein entsprechendes Speichervolumen nicht zur Verfügung gestellt werden und es ist sicherzustellen, dass das Gas aus dem Bohrloch in die Strecke entweichen kann. Das notwendige, mit nicht kompaktierbarem Versatz verfüllte Streckenvolumen ist vergleichbar, wenn man davon ausgeht, dass das mit dem Versatz in die Strecke eingebrachte Wasser nicht in die Bohrlöcher gelangt, die Bohrlöcher 300 m tief sind und einen Abstand von ca. 30 m haben.

Für Tonstein ist bei der Einlagerung von LLW eine Speicherung der gebildeten Gase im Porenraum des Versatzes wie bei der Salzformation möglich. Auch die benötigten Volumina und Versatzmengen zur Speicherung der Gase entsprechen weitgehend jenen in einer Salzformation. Bei der Endlagerung von HLW in Tonstein sind die gebildeten Gasmengen aufgrund des unbegrenzten Wasserangebots allerdings so groß, dass im Gegensatz zum Salz eine Speicherung der Gasmengen im Porenraum sehr große Abstände zwischen den Behältern notwendig machen würde und somit nicht realisierbar ist. Für die Lagerung von HLW im Tonstein ist somit ein Porenspeicherkonzept für die gebildeten Gase nicht möglich und die Gase müssen durch die Formation abtransportiert werden. Dies ist in Tonformationen durch die Gastransportmechanismen auch möglich.

Auswirkungen von Gasen

Kenntnisstand

- Gasmengen für hochaktive Abfälle hinreichend gut bekannt; bei schwachaktiven Abfällen für organische Stoffe noch unklar
- Auswirkungen auf Wirtsformationen (Salz, Granit) noch nicht genügend bekannt

Relevanz:

Hohe Relevanz durch Auswirkungen auf die Integrität der Wirtsformation

Empfehlungen für weitere FuE

- Weiterführende Untersuchungen zur Gasbildung organischer Stoffe
- Weiterführende Untersuchungen zur Auswirkungen von Gasen auf Wirtsformationen (Salz, Ton)

2.4 Charakterisierung radioaktiver Abfälle

Wichtige Themen zur Charakterisierung radioaktiver Abfälle waren die Überprüfung der bisherigen Klassifizierung von Abfällen auf ihre Sinnfälligkeit, die Überprüfung der in Langzeitsicherheitsanalysen verwendeten Inventare für einzelne Radionuklide, da sich signifikante Unterschiede beim internationalen Vergleich ergeben haben [5], Arbeiten zur chemischen Form von C-14 in den Abfällen und Arbeiten zu den Quelltermen.

2.4.1 Klassifizierung von Abfällen

Die Klassifikation von radioaktiven Abfällen soll Abfälle mit ähnlichen Eigenschaften und Gefahrenpotential in Kategorien zusammenfassen, um die Handhabung und Entsorgung von Abfällen zu vereinfachen. Die im Laufe der Zeit etablierten Klassifikationssysteme verwenden alle mindestens eines der folgenden Merkmale des Abfalls zur Einstufung: die spezifische Aktivität, die Wärmeleistung, die Herkunft oder den geplanten Entsorgungspfad des Abfalls.

Die bestehenden nationalen Klassifikationssysteme verschiedener Staaten wurden in einem separaten Bericht zusammengefasst und im Detail verglichen [92]. Die meisten Klassifikationssysteme der europäischen Staaten, sowie jene der EU und der IAEA nehmen eine Einteilung der Abfälle aufgrund der Halbwertszeit in kurz- und langlebig, sowie anhand der spezifischen Aktivität des Abfalls in schwach-, mittel- und hochaktiv vor. Das Klassifikationssystem der IAEA teilt die endzulagernden radioaktiven Abfälle in drei Klassen ein [33]:

- **Low and Intermediate Level Waste - Short-Lived:** Dieser Abfall enthält nur geringe Mengen an langlebigen Radionukliden. Um als kurzlebig zu gelten, muss neben weiteren Anforderungen die Halbwertszeit des Abfalls geringer als 30 Jahre sein und die spezifische Aktivität der α -Strahler geringer als 400 Bq/g.
- **Low and Intermediate Level Waste - Long-Lived:** Zu dieser Kategorie gehören alle Abfälle, die über den angegebenen Grenzen liegen, aber keine signifikante Wärme-
produktion haben.
- **High Level Waste:** Hochaktive Abfälle werden durch eine signifikante Produktion von Wärme aufgrund des radioaktiven Zerfalls charakterisiert. Abfälle mit einer spezifischen Wärmeleistung über 2 kW/m^3 werden dem HLW zugeordnet.

Um die Sinnfälligkeit dieser Unterscheidung zu überprüfen, wurden die Aktivitätsinventare verschiedener Endlager und einiger radioaktiver Abfallarten, sowie deren zeitliche Entwicklung untersucht. Die Daten der betrachteten Abfallinventare sind in Tabelle 2.5 zusammengefasst. Es sind die Gesamtaktivität, die spezifische Aktivität, die spezifische Aktivität der α -Strahler und der Anteil der α -Strahler an der Gesamtaktivität zu zwei Zeitpunkten angegeben. Es zeigt sich, dass sich die betrachteten Inventare erheblich hinsichtlich ihrer spezifischen Aktivität unterscheiden.

Tab. 2.5 Vergleich der verschiedenen Inventare. Die spezifische Aktivität ist aufgrund fehlender Mengenangaben für einige Inventare nicht angegeben.

Inventar	Aktivität [Bq]	spez. Aktivität [Bq/g]		Anteil α – Aktivität [%]	
		Gesamt	α	t=0 a	t=10 ³ a
Endlager					
Asse	$3,8 \cdot 10^{15}$	54 500	2 730	5,1	72,6
ERA Morsleben	$3,1 \cdot 10^{14}$	4 220	31	0,8	25,4
Konrad	$8,5 \cdot 10^{17}$	653 800	15 380	2,3	71,3
La Manche	$6,0 \cdot 10^{16}$	56 600	380	0,7	39,6
Centre de l'Aube	$7,0 \cdot 10^{16}$	35 000	245	0,7	22,7
El Cabril	$3,4 \cdot 10^{16}$			0,08	
Drigg	$6,8 \cdot 10^{14}$	310	31	10,2	52,5

Tab. 2.5 Vergleich der verschiedenen Inventare. Die spezifische Aktivität ist aufgrund fehlender Mengenangaben für einige Inventare nicht angegeben.

Inventar	Aktivität [Bq]	spez. Aktivität [Bq/g]		Anteil α – Aktivität [%]	
		Gesamt	α	t=0 a	t=10 ³ a
Olkiluoto	$4,2 \cdot 10^{14}$	24 700	1	0,004	1,2
Loviisa	$8,5 \cdot 10^{15}$			1,8	76,1
Wellenberg	$1,5 \cdot 10^{17}$	600 000	270	0,05	1,2
WIPP	$1,9 \cdot 10^{17}$	541 300	370 400	69,0	58,1
Site 94	$1,8 \cdot 10^{15}$			16,2	82,0
Abfallmaterialien					
LLW / ILW - Abfall	$2,2 \cdot 10^{18}$	472 100	24 500	5,1	82,7
HLW-Kokille	$1,6 \cdot 10^{16}$	$3,7 \cdot 10^{10}$	$4,1 \cdot 10^9$	1,1	87,7
abgebrannte Brennelemente	$4,2 \cdot 10^{16}$	$5,3 \cdot 10^9$	$8,6 \cdot 10^7$	1,6	83,2
Nirex Referenzinventar	$1,7 \cdot 10^{18}$	$3,2 \cdot 10^6$	148 300	4,6	53,3

Die betrachteten Inventare unterscheiden sich weiterhin signifikant hinsichtlich des Anteils der α -Strahler an der Anfangsaktivität. Der Anteil reicht von 0,04 ‰ bis 70 %. Auch der Zeitverlauf des Anteils der α -Strahler zeigt signifikante Unterschiede. Bei einem Teil der Inventare steigt der Anteil der α -Strahler an der Aktivität nach etwa 1000 Jahren auf über 80 % an. Bei anderen Inventaren spielen die α -Strahler innerhalb des betrachteten Zeitraums nur eine untergeordnete Rolle, zum Teil mit einem Anteil an der Aktivität unter 10 %.

Anders als die spezifische Aktivität ist die Abnahme der Gesamtaktivität mit der Zeit für alle Abfälle sehr ähnlich. Den zeitlichen Verlauf der Aktivität aller Inventare zeigt mit einer Unterteilung nach Gruppen Abbildung 2.9. Bezogen auf das Anfangsinventar sind die Kurvenverläufe für die einzelnen Endlager und Abfälle ähnlich und es lässt sich insbesondere aus der Höhe der spezifischen Aktivität kein Rückschluss auf die Langlebigkeit ziehen. Abgesehen von den Inventaren der Endlager WIPP und Drigg nimmt die Aktivität der Inventare innerhalb der ersten tausend Jahre auf etwa 1 bis 5 % der Anfangsaktivität ab. Bis eine Million Jahre sinkt die Aktivität dann in den meisten Fällen auf 1 ‰ bis 0,1 ‰ der Anfangsaktivität.

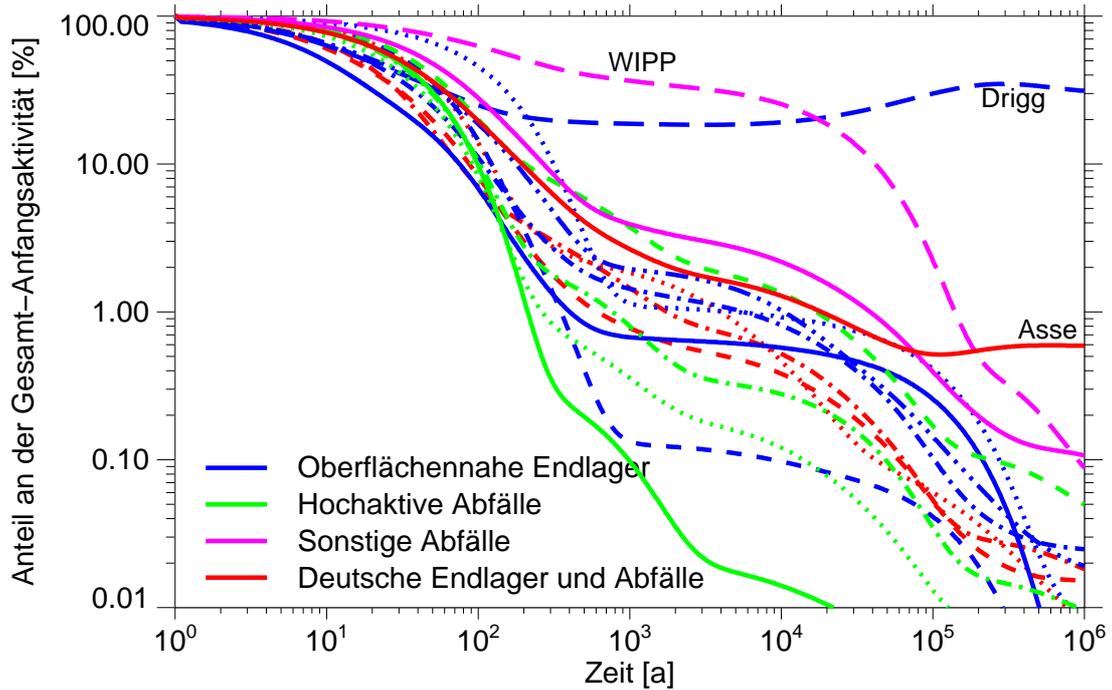


Abb. 2.9: Relative Zeitverläufe der Aktivität aller betrachteten Inventare.

Die Tatsache, dass sich die Aktivitäts-Zeitverläufe der verschiedenen Abfälle bis auf die genannten Ausnahmen wenig voneinander unterscheiden, muss um so mehr betont werden, da es sich dabei um sehr unterschiedliche Abfälle handelt. So reicht der Aktivitätsbereich der betrachteten Abfälle von schwachaktiven Abfällen, wie im ERA Morsleben mit einer spezifischen Aktivität von ca. 4 220 Bq/g, bis hin zu hochaktiven Abfällen, wie der HLW-Kokille mit einer spezifischen Aktivität von $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq/g. Das ähnliche Langzeitverhalten ist darin begründet, dass alle der betrachteten Abfälle ähnlich große Anteile an den langlebigen Nukliden Ni-59 oder Tc-99 haben.

Die Klassifikation von hochaktiven Abfällen erfolgt nach der IAEA aufgrund der Wärmeleistung. Der Grenzwert zur Unterscheidung zwischen LILW-LL und HLW von 2 kW/m^3 erweist sich als so hoch, dass ein Pollux-Behälter mit acht Brennelementen danach nicht als hochaktiver Abfall eingestuft würde. Besser sollte auch hier eine Unterscheidung auf Grund der spezifischen Aktivität getroffen werden. Die Einstufung aller betrachteten Inventare nach der Klassifikation der IAEA ist in Abbildung 2.10 dargestellt.

Eine Unterscheidung in kurzlebig oder langlebig mit einer Halbwertszeit kleiner und größer 30 Jahren, wie sie in der Klassifizierung der IAEA vorgenommen wird, erscheint also bei den hier betrachteten Abfällen nicht sinnvoll. Eine Klassifikation nach der spezifischen



Abb. 2.10: Einstufung der Inventare aufgrund der Klassifikation der IAEA.

Aktivität ist als das beste Kriterium anzusehen. Ein Klassifikationssystem dieser Art wird z.B. in Finnland angewendet. Zusätzlich ist eine Unterscheidung möglich zwischen jenen Abfällen, bei denen die α -Strahler einen signifikanten Anteil an der Aktivität haben und jenen, bei denen dies nicht der Fall ist. Die sicherheitstechnische Relevanz einer solchen Unterscheidung wäre allerdings zu prüfen

2.4.2 Aktualisierte Inventare

Im Rahmen des EU-Projekts Spent Fuel Performance Assessment (SPA) wurden u.a. Inventardaten verschiedener Länder für abgebrannte Brennstoffe zusammengestellt [5]. Dabei wurden für manche Radionuklide erhebliche Unterschiede in den Anfangsinventaren identifiziert. Die Daten der GRS basierten auf Abbrand- und Aktivierungsrechnungen für das Projekt PSE [31]. Ein genauerer Vergleich wurde dann zwischen den von IPSN (heute IRSN) und GRS verwendeten Inventaren durchgeführt. Die betrachteten Brennstoffe waren bezüglich Abbrand und Anreicherung sehr ähnlich:

- Abbrand [GWd/t_{SM}]: IPSN = 45 GRS = 45
- Anreicherung: IPSN = 3.7% U-235 GRS = 3.6% U-235

Für die meisten Radionuklide ergab sich eine gute Übereinstimmung, die Abweichungen in den Inventaren betrug weniger als einen Faktor 2. Bei einzelnen Spalt- und Aktivierungsprodukten traten allerdings signifikante Unterschiede auf. Die entsprechenden Radionuklide sind in Tabelle 2.6 aufgeführt. Dabei ist unterschieden nach Inventar in Brennstoff und Metallteilen.

Tab. 2.6 Inventar ausgewählter Radionuklide in Brennstoff und Metallteilen (Bq t_{SM}⁻¹)

Element	Brennstoff		Metallteile	
	GRS	IPSN	GRS	IPSN
C-14	1,28·10 ¹⁰	2,59·10 ¹⁰	3,32·10 ¹⁰	2,29·10 ⁰⁸
Cl-36	6,10·10 ^{08 a}	2,63·10 ⁰⁹	5,25·10 ⁰⁴	1,17·10 ⁰⁸
Ni-59	6,97·10 ⁰⁷	6,68·10 ⁰⁹	5,08·10 ¹¹	6,61·10 ¹⁰
Nb-94	8,24·10 ⁰⁶	6,70·10 ⁰⁸	8,49·10 ¹⁰	5,81·10 ⁰⁹
Tc-99	6,45·10 ¹¹	6,80·10 ¹¹	6,87·10 ⁰⁸	1,43·10 ⁰⁸

a. Dieser Wert wurde unter Annahme einer Cl-Verunreinigung im Brennstoff abgeschätzt. In den Aktivierungsrechnungen [31] wurde keine Cl-Verunreinigung angenommen.

Beim Brennstoff wurden von IPSN höhere Inventare für C-14, Cl-36, Ni-59 und Nb-94 gefunden. Zur Erklärung der Aktivitätsunterschiede wurden die Bildungsprozesse dieser Radionuklide und die Annahmen zu Anfangsgehalten und Verunreinigungen in Brennstoff und Metallteilen genauer betrachtet. Die wichtigsten Bildungsprozesse für die Radionuklide sind in Tabelle 2.7 und die Annahmen zu den Verunreinigungen in Tabelle 2.8 angegeben. Daraus ist zu erkennen, dass von IPSN höhere Gehalte an Stickstoff, Chlor und Nickel im frischen Brennstoff angenommen wurden. Diese Verunreinigungen führen aufgrund der Hauptbildungsprozesse für die genannten Radionuklide zu höheren Inventaren nach Abbrand. Im Fall von Niob wurde bei IPSN eine Verunreinigung von 20 ppm, bei GRS dagegen keine Verunreinigung angenommen.

Der Vergleich in den Metallteilen (s. Tabelle 2.6) ergibt, dass bei GRS die Inventare für C-14, Ni-59, Nb-94 und Tc-99 höher sind als bei IPSN; im Fall von C-14 sogar um einen Faktor 144. Diese erhöhten Inventare lassen sich ebenfalls weitgehend auf die Annahme

Tab. 2.7 Hauptbildungspfade ausgewählter Radionuklide beim Abbrand im Reaktor

Radionuklid	Hauptbildungspfad im Reaktor
C-14	$N-14 + n \rightarrow C-14 + p$
Cl-36	$Cl-35 + n \rightarrow Cl-36$
Ni-59	$Ni-58 + n \rightarrow Ni-59$
Nb-94	$Nb-93 + n \rightarrow Nb-94$
Tc-99	hauptsächlich durch Spaltung, z.T. über Mo-99 \rightarrow Tc-99 m \rightarrow Tc-99

Tab. 2.8 Anfangsverunreinigungen im Brennstoff g/t_{SM}

Element	GRS	IPSN
N	5	10
Cl	5	25
Ni	2	300
Nb	-	20
Mo	1	300

erhöhter Gehalte an Verunreinigungen in den Metallteilen zurückführen. Das höhere Inventar von C-14 ist beispielsweise durch einen um den Faktor 94 erhöhten Stickstoffgehalt in den Metallteilen bedingt. Für Cl-36 liegt das Inventar von IPSN um mehr als drei Größenordnungen über dem von GRS. Hier liegt die Erklärung darin, dass IPSN im Gegensatz zu GRS Chlor-Verunreinigungen im Zircaloy annimmt.

Aufgrund der oben genannten Unterschiede in den Verunreinigungen von Brennstoff und Metallteilen bei GRS und IPSN wurde überprüft, ob die Annahmen zu den Verunreinigungen dem heutigen Stand entsprechen und welche Konsequenzen aktualisierte Abbrand- und Aktivierungsrechnungen haben.

Deshalb wurden aktualisierte Daten zu Gehalt und Verunreinigungen in UO₂- und MOX-Brennstoff sowie in den Metallteilen zusammengestellt. Auf Basis dieser Daten wurden aktualisierte Abbrand- und Aktivierungsrechnungen durchgeführt. Sowohl für UO₂- als auch für MOX-Brennelemente wurde ein Zielabbrand von 45 GWd/t_{HM} angenommen. Für UO₂ wurde eine Anreicherung von 3,8 % U-235, für MOX eine Anreicherung von 4,6 % Pu-fiss zu Grunde gelegt. Alle Eingangsdaten und Ergebnisse dieser Rechnungen sind im Detail in [32] zusammengestellt.

Die Abbrandrechnungen wurden mit dem Rechencode OREST-96 durchgeführt. Mit den aus OREST bestimmten Neutronenflüssen, Spektralindizes und Flussabsenkungsfaktoren wurden dann anschließend Aktivierungsrechnungen mit dem Rechencode GRSAKTIV durchgeführt.

Die Zusammenstellung aktueller Daten zu den Verunreinigungen ergab folgendes Bild bei den oben genannten kritischen Elementen: Für Brennstoff wurden die von der GRS in früheren Studien verwendeten Daten für N, Cl und Ni mit 4 ppm, 4,5 ppm und 3,5 ppm bestätigt. Allerdings zeigte sich, dass der Wert für Stickstoff vom Herstellungsverfahren abhängig ist und bei durch Trockenkonversion hergestelltem UO_2 deutlich höher liegen kann. Vom BE-Hersteller ANF Lingen wird hier ein Gehalt von 30 ppm Stickstoff als Obergrenze angegeben. Dieser Wert liegt sogar oberhalb des von IPSN angenommenen Wertes.

Die Ergebnisse der aktualisierten Rechnungen zeigen, dass die Inventare der meisten Radionuklide relativ gut mit den früher ermittelten Werten übereinstimmen. Sie unterscheiden sich um weniger als einen Faktor 2. Die Rechnungen mit einer N-Verunreinigung von 30 ppm führen gegenüber der Referenzrechnung mit 4 ppm N zu einem um den Faktor 3,6 erhöhten C-14-Inventar im abgebrannten Brennstoff. Dieser Wert liegt dann auch höher als der von IPSN.

Die Annahmen der GRS zu den Verunreinigungen in den Metallteilen wurden ebenfalls durch die aktualisierten Daten weitgehend bestätigt. Allerdings wurde gegenüber den alten Rechnungen für Zircaloy auch ein Cl-Verunreinigung von 5 ppm angenommen, die nicht ausgeschlossen werden kann.

2.4.3 C-14 Problematik

Ein wichtiges Thema stellt derzeit die Behandlung von C-14 in Langzeitsicherheitsanalysen dar. Im Rahmen der Sicherheitsanalyse „Projekt Opalinuston“ der NAGRA sind die Fragen zur Mobilisierung und Ausbreitung von C-14 diskutiert worden [63]. Zur Klärung offener Fragen hatte die NAGRA zusammen mit der japanischen RWMC im Oktober 2003 einen Workshop durchgeführt, auf dem der Stand des internationalen Wissens zusammengetragen wurde. Die wichtigsten Fragen waren dabei die Inventare von C-14 in den

einzelnen Abfallbestandteilen sowie die chemische Form, in der C-14 nach Auslaugen aus den Abfällen vorliegen wird. Die Vorträge des Workshops sind in einem internen Nagra-Bericht erschienen [37].

2.4.3.1 C-14 Inventar

C-14 entsteht u.a. durch Aktivierungsprozesse während des Betriebs von Kernreaktoren. Andere Abfälle, die aus medizinischen Anwendungen oder aus der Forschung stammen (dotierte C-14-Verbindungen), waren nur ein Randthema der Tagung. Nach Entnahme der Brennelemente aus dem Reaktor befinden sich die C-14-Inventare in den verschiedenen Fraktionen:

- UO₂-Matrix
- Zircaloy-Hüllrohre
- Stahlteile

Da C-14 über Aktivierungsprozesse entsteht, sind die Reaktionspfade und die Angaben zu den Verunreinigungen in den einzelnen Fraktionen für die Ermittlung des C-14-Inventars extrem wichtig. Wie in Abschnitt 2.4.2 beschrieben ist der Bildungspfad von C-14 über Neutroneneinfang von N-14 der wichtigste in allen Fraktionen der abgebrannten Brennelemente. Allerdings stellt nach Marimbeau (CEA), der Ergebnisse von Aktivierungsrechnungen mit dem Programm Cesar vorstellte, die Reaktion über O-17 den wichtigsten Bildungspfad von C-14 in der UO₂-Matrix dar [59]. Für diese Rechnung wurde eine Verunreinigung von 8 ppm N-14, also 0,57 mol pro Tonne Schwermetall im Brennstoff angenommen. Die O-17-Gehalte entsprechen dem natürlichen Anteil im Sauerstoff, also etwa 3,2 Mol O-17 pro Tonne Schwermetall. Da der bisher verwendete Wirkungsquerschnitt für den Reaktionspfad über N-14 nur eine knappe Größenordnung über dem für den Reaktionspfad aus O-17 liegt, könnte die Bildung aus O-17 bei Annahme geringer N-14-Verunreinigungen eine Rolle spielen.

Typische Stickstoff-Inventare für die oben genannten Fraktionen wurden von Lawrence Johnson (NAGRA) zusammengestellt. Für die Langzeitsicherheitsanalyse Opalinus 2000 wurde von der NAGRA ein Review über die in anderen Studien verwendeten Stickstoff-Verunreinigungen in UO₂, Zircaloy und Stahlteilen durchgeführt. Auf der Basis dieses Reviews hat die NAGRA in der Opalinus-Studie für die N-14-Verunreinigungen in UO₂-

Brennstoff 25 ppm, in Zircaloy 80 ppm und in Edelstählen 800 ppm angenommen. Die Werte für Brennstoff und Zircaloy entsprechen den in den aktualisierten Rechnungen verwendeten Werten von 4 bzw. 30 ppm für Brennstoff und 70 ppm für Zircaloy. Die Verunreinigungen im Stahl müssen noch einmal überprüft werden.

Es gibt einen gewissen Anteil des C-14, der relativ schnell aus dem UO₂-Brennstoff gelöst wird (Instantaneous Release Fraction, IRF). Ebenso gibt es auch in den Zircaloy-Hüllrohren einen C-14-Anteil, der sehr schnell mobilisierbar ist. Es wird angenommen, dass es sich bei diesem Anteil um C-14 in oxidierten Oberflächenschichten handelt.

2.4.3.2 Chemische Form von C-14

Die chemische Form, in der C-14 vorliegt, war das zentrale Thema dieses Workshops. Sie bestimmt ganz wesentlich dessen Transporteigenschaften. Die Löslichkeit von Carbonaten ist häufig begrenzt, während viele organische Moleküle sehr gut löslich sind und auch nicht bzw. nur wenig zurückgehalten werden.

In früheren Langzeitsicherheitsanalysen wurde angenommen, dass das C-14 aus den radioaktiven Abfällen als Carbonat gelöst vorliegt. In einer Arbeit von *Deng et al.* [17] wurden Experimente vorgestellt, bei denen unter reduzierenden Bedingungen bei der Korrosion von Gusseisen einfache Kohlenwasserstoffverbindungen gebildet werden. Als Quelle dieser Kohlenwasserstoffe wurde der als Carbid bzw. Graphit vorliegende Kohlenstoff im Stahl postuliert. Seitdem wurden insbesondere von japanischen Gruppen etliche Arbeiten zur Auslaugung von aktivierten Stählen und Zircaloy durchgeführt, um die chemische Form von C-14 in den Metallen und nach Auslaugung in Lösung zu bestimmen.

Viele japanische Arbeiten behandeln experimentelle Untersuchungen zur Auslaugung von C-14 aus aktivierten Zircaloy- und Stahlproben. Diese Experimente wurden unter alkalischen Bedingungen durchgeführt, da die Japaner einen Großteil ihres abgebrannten Brennstoffs wiederaufbereiten lassen und die Hülsen und Strukturteile dann im ILW anfallen. Dieser Abfall ist zementiert und wird in einem Endlager, in dem Zement als Versatz verwendet wird, eingelagert. In einem solchen Endlager werden sich alkalische Bedingungen einstellen.

Die Experimente deuten darauf hin, dass sich das aus bestrahltem Zircaloy ausgelaugte C-14 zum überwiegenden Teil in organischen Verbindungen befindet. Nachgewiesen wurden Alkohole, Aldehyde, Ketone, Carbonsäuren und Kohlenwasserstoffe. Zum Vergleich wurden auch einige Experimente bei pH 8 durchgeführt, Bedingungen, wie sie eher in einem Endlager für hochaktive Abfälle erwartet werden. Auch unter diesen Bedingungen lag der überwiegende Anteil des ausgelaugten C-14 in Form organischer Verbindungen vor.

Für den UO_2 -Brennstoff liegen bisher nur wenige Experimente zur Charakterisierung der chemischen Form des C-14 nach Auslaugung vor. Alle diese Experimente wurden unter oxidierenden Bedingungen durchgeführt. Unter diesen Bedingungen wird der Kohlenstoff zu Carbonat oxidiert. Da aber im Endlager große Mengen Wasserstoff gebildet werden, und dieser Wasserstoff die Verhältnisse über lange Zeiträume reduzierend halten wird, sind die bisher durchgeführten Experimente nicht repräsentativ. In welcher Form C-14 aus dem Brennstoff unter Endlagerbedingungen mobilisiert wird, ist auf Basis des heutigen Wissens unklar.

2.4.3.3 Schlussfolgerungen für Langzeitsicherheitsanalysen

Für zukünftige Langzeitsicherheitsanalysen ist die Frage, in welcher Form C-14 vorliegt, ein wichtiges Thema. Wenn ein großer Anteil des C-14 in organischer Form vorliegt, kann dieser Anteil deutlich schneller freigesetzt und transportiert werden als C-14 in carbonatischer Form. Eine wichtige Frage ist dabei, wie C-14 in organischer Form im Modell zu beschreiben ist. Von den Japanern wurden Verteilungskoeffizienten für Methanol, Ethanol, Aldehyde und andere organische Moleküle an Versatzstoffen, Korrosionsprodukten und natürlichen Mineralen gemessen. Für einige Stoffgruppen ist keine Rückhaltung festgestellt, für andere wurde aber eine deutliche Rückhaltung unter den experimentellen Bedingungen nachgewiesen. Diese Verteilungskoeffizienten sollen dann in Ausbreitungsrechnungen eingesetzt werden. Es ist aber wahrscheinlich nicht sinnvoll, den Transport dieser Moleküle vom Endlager bis in die Biosphäre unter Annahme einer entsprechenden Rückhaltung zu modellieren, da sie sicher nicht langzeitstabil sind.

Stabile Formen des C-14 stellen je nach Redoxbedingungen Carbonat bzw. Methan dar. Mit Ausnahme der aktuellen Arbeiten für ERAM wurde in bisherigen deutschen Langzeitsicherheitsanalysen ausschließlich eine Form des C-14, nämlich das Carbonat, betrach-

tet. Eine mögliche Vorgehensweise in zukünftigen Langzeitsicherheitsanalysen wäre es, anzunehmen, dass ein gewisser Anteil des C-14 in Form von Methan vorliegt und die Ausbreitung der beiden Spezies $^{14}\text{CH}_4$ und $^{14}\text{CO}_2$ zu modellieren.

Ein weiteres wichtiges Fazit der Tagung war, dass geeignete, repräsentative Experimente durchgeführt werden müssen, um genauere Aussagen zur chemischen Form von C-14 machen zu können. Dies gilt insbesondere für die Auslaugung von UO_2 -Brennstoff und die IRF.

2.4.4 Aktualisierte Quellterme

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 [2] hatte die Erstellung eines integrierten Nahfeldmodells für alle im Salzstock Gorleben einzulagernden Abfallarten zum Ziel. Im Jahr 2001 endeten die Arbeiten des INE zu diesem Projekt. Zu jedem Thema wurde von INE ein Abschlussbericht erstellt und an das BfS eingereicht. Im Bericht [76] wurde beschrieben, welche Ergebnisse bis zum Jahr 1999 vorlagen. Im Folgenden werden die in den anschließenden Jahren erzielten Ergebnisse vorgestellt.

Es gab im Berichtszeitraum zwei Fachgespräche, auf denen die experimentellen Ergebnisse und die Ergebnisse von Modellierungen diskutiert werden konnten. Das erste Gespräch am 17.02.2000 behandelte als Schwerpunkt die Themen „Versatzmaterialien“ und „Korrosionsexperimente“. Es wurden mehrere Versatzstoffe für Endlager im Steinsalz diskutiert, wie Salzgrus, Tonminerale und Zementprodukte. Auch die Rolle von Zuschlagstoffen wurde angesprochen. Versatzmaterialien und Zuschlagstoffe sind für die Einstellung des chemischen Milieus sowie für Sorption und Ausfällung von Radionukliden

relevant. Die ermittelten Daten und Modelle sind umfangreich, müssen aber bei Bedarf für konkrete Endlagerstandorte ergänzt werden, z.B. durch Ermittlung von Sorptionsparametern für alle relevanten Radionuklide bei Verwendung von Zuschlagstoffen.

Das Abschlussseminar des Projektes fand am 25. und 26.10.2001 statt. Während dieses Seminars wurden alle Themen des Projektes angesprochen und die Entwürfe der Abschlussberichte diskutiert. Zu den einzelnen Quelltermen wurden von GRS vereinfachte Anwendungsrechnungen durchgeführt, um die Relevanz der neuen Quellterme bewerten zu können.

Die Ergebnisse zu den Quelltermen für HLW-Glas, abgebrannte HTR-Brennelemente und zementierte Abfälle sind bereits in [76] dargestellt worden. Für HTR-Brennelemente und zementierte Abfälle gibt es keine Änderungen gegenüber den alten Quelltermen, lediglich die Parameterwerte wurden aktualisiert. Für HLW-Glas wurde der Quellterm durch Berücksichtigung der Silizium-Sättigung in Lösung ergänzt. Diese Ergänzung führt dazu, dass die Glaskorrosion langsamer abläuft und dass einige Radionuklide stark verzögert aus der Abfallmatrix mobilisiert werden.

Für abgebrannte LWR-Brennelemente wurden ebenfalls Änderungen am bisherigen Quellterm vorgeschlagen. Insbesondere wurde eine Abhängigkeit der Korrosionsraten vom chemischen Milieu im Einlagerungsort festgestellt, die dazu führt, dass die Mobilisierungsraten aus der Brennstoffmatrix in reduzierendem Milieu bis zu einem Faktor 100 kleiner sind als in oxidierendem Milieu. Auch für die Korrosionsraten der Strukturteile wurden modifizierte Werte vorgeschlagen. Insgesamt können sich durch Anwendung des neuen Quellterms und der neuen Parameterwerte deutlich geringe Freisetzungsraten ergeben als nach dem alten Quellterm. Wenn das chemische Milieu jedoch nicht genau zu ermitteln ist, sind pessimistische Annahmen zu den Parameterwerten zu treffen, wodurch die Auswirkungen weniger ausgeprägt sind. Hieraus ergibt sich auch, dass es erstrebenswert ist, das chemische Milieu innerhalb der Rechencodes für Sicherheitsanalysen genauer zu ermitteln, d.h. geochemische Rechencodes und Codes für Sicherheitsanalysen zu koppeln.

Neben den Mobilisierungsraten wurden auch maximale Lösungskonzentrationen für die Elemente Am, Np, Pu, U und Tc ermittelt, die sich in unterschiedlichen Einlagerungsorten einstellen können. Diese Konzentrationen hängen stark vom chemischen Milieu ab, das wiederum durch die zufließende Lauge und die Eigenschaften der Abfälle und Versatzstoffe bestimmt wird.

Im Rahmen des Projektes wurden auch Kolloide im geochemischen Milieu eines Endlagers im Salzgestein untersucht. Es zeigte sich, dass sie in diesem Milieu im allgemeinen nicht stabil sind und daher langfristig keinen relevanten Beitrag zur Radionuklidfreisetzung leisten. Allerdings kann die Bildung von Eigenkolloiden vierwertiger Actinide von Bedeutung sein. Außerdem kann es bei Verwendung von Zuschlagstoffen zu Versatzmaterialien zu einer geringen, aber eventuell relevanten Kolloidbildung kommen. Die Berücksichtigung von Kolloiden muss jeweils für einen konkreten Endlagerstandort geklärt werden.

Die Arbeiten des INE zur Ermittlung von geochemisch fundierten Quelltermen für den Standort Gorleben sind beendet. Die ermittelten Daten und Modelle sind eine gute Grundlage für zukünftige Anwendungsrechnungen, auch für andere Standorte. Für jeden zukünftigen Standort sind jedoch weitere Datenerhebungen und gegebenenfalls experimentelle Untersuchungen erforderlich.

Charakterisierung radioaktiver Abfälle

Kenntnisstand

- Die Inventardaten für Radionuklide sind gut bekannt und wurden durch aktualisierte abbrand- und Aktivierungsrechnungen bestätigt.
- C-14 liegt in abgebranntem Brennstoff, Hüllrohren und Strukturteilen zu einem Teil in organischer Form vor. Die genauen Anteile, besonders für UO₂-Brennstoff sind noch nicht ausreichend bekannt. Das C-14-Inventar im Brennstoff kann sich aufgrund variierender N-Verunreinigungen signifikant unterscheiden.
- Quellterm: Daten und Modelle stellen gute Grundlage für zukünftige Anwendungsrechnungen dar. Für zukünftige Standorte weitere Datenerhebung und ggf experimentelle Untersuchungen notwendig.

Relevanz

hoch: Die Berücksichtigung von C-14 in organischer Form kann zu erheblich höheren Dosisraten durch C-14 führen. Erniedrigte Freisetzungsraten aus der Abfallmatrix können zu reduzierten Dosisraten führen.

Empfehlungen für weitere FuE

- Weiterführende Untersuchungen zur Bestimmung der Anteile von organischem C-14 in abgebranntem Brennstoff, Zircaloy und Metallteilen.
- Quellterm: Ermittlung maximaler Radionuklidkonzentrationen für andere LZSA-relevante Elemente und Berücksichtigung des Einflusses von Carbonat.

2.5 Endlager in Tonformationen

Bisher wurden in Deutschland vorwiegend Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager in Salzformationen durchgeführt; Instrumentarien für Endlager in kristallinem Gestein sind in einem vorangegangenen Projekt ermittelt worden. Rechenprogramme für Sicherheitsanalysen in Tonformationen existieren in Deutschland bisher nicht. Zur Vorbereitung eines entsprechenden Projekts ist es wichtig, die Eigenschaften, Prozesse und Effekte (FEPs), die für den Radionuklidtransport aus einem Endlager in Tonformationen von Bedeutung sind, zusammenzustellen und zu bewerten. Diese Arbeit erfolgt u.a. auf Basis der Mitarbeit im Clay Club sowie durch Erkenntnisse, die bei den Reviews des FEP-Katalog der NEA, "FEP-CAT", und der "Sicherheitsstudie Opalinuston" gewonnen wurden.

2.5.1 Clay Club

In den NEA Mitgliedsländern wird eine große Bandbreite von Tonen als potentielle Wirtsgesteine für die oberflächennahe oder tiefe Endlagerung von radioaktiven Abfällen und/oder als Bestandteil technischer Barrieren untersucht. Tone weisen eine Reihe günstiger Eigenschaften, wie Homogenität, geringe Grundwasserbewegung, Neigung zur plastischen Deformation, Selbstheilung von Rissen durch Quellung, hohe chemische Pufferkapazität und eine hohe chemisch und physikalisch bedingte Kapazität der Radionuklidrückhaltung auf.

1990 hat die NEA eine Arbeitsgruppe unter dem Namen „IGSC working Group on Measurement and physical Understanding of Groundwater Flow through Argillaceous Media“ gegründet, die unter der Kurzbezeichnung „Clay Club“ bekannt ist. Der Clay Club untersucht die gesamte Bandbreite von plastischen bis spröden Tongesteine, wobei die Arbeiten zur Charakterisierung und Modellierung unter den Gesichtspunkten der Langzeitsicherheit im Vordergrund stehen. Folgende Aktivitäten werden vom Clay Club gefördert:

- kontinuierliche Vergleiche der Eigenschaften unterschiedlicher Tonformationen
- Austausch von technischen und wissenschaftlichen Informationen bezüglich der Eigenschaften und des Langzeitverhaltens von Tonen
- Entwicklung von Methoden und Strategien zur Überprüfung wesentlicher Parameter durch In-situ-Versuche
- Detaillierte Überprüfungen der verfügbaren Techniken der Standorterkundung

Der Clay Club initiierte und veröffentlichte 1996 eine Kompilation und Bewertung der relevanten Literatur zu den Grundkonzepten und Mechanismen, die die Bewegung von Wasser, Wasserinhaltsstoffen und Gasen durch alle Arten von Tongesteinen kontrollieren. Anschließend erfolgte eine Untersuchung der Fluidbewegung durch geklüftete Tone einschließlich der Wasser-Extraktionstechniken aus Tongesteinen. Ebenfalls auf die Initiative des Clay Club gehen eine Katalog der Eigenschaften von Tonformationen im „Catalogue of Characterisation of Argillaceous Rocks“ und deren „Features, Events und Processes“ im „FEPCAT“-Katalog zurück. Dies sind die bisher umfassendsten Dokumentationen des Wissens über Tongesteine (siehe auch <http://www.nea.fr/download/clayclub/fepcat.html> und <http://www.nea.fr/clayclub/argillaceous.html>). Die Daten stammen aus den Untersuchungen der Tonformationen, die in den einzelnen NEA-Mitgliedsländern als Endlagerformation ins Auge gefasst wurden. Ziel beider Kataloge war die Erstellung einer internationalen, breiten und unter wissenschaftlichen Gesichtspunkten bewerteten Datenbasis für Langzeitsicherheitsanalysen zu schaffen und mit allen verfügbaren Referenzen zu belegen.

Noch in Bearbeitung befindet sich eine weitere Kompilation des Wissens zum Thema Selbstverheilung von Tongesteinen unter Endlagerbedingungen. Laufende und zukünftige Aktivitäten des Clay Clubs konzentrieren sich auf natürliche Tracer-Profile in Tonformationen. Die in Auftrag gegebene Studie wird eine Datenkompilation zu Tracern (^2H , ^{18}O , Cl , ^{37}Cl , Edelgase), zu Formationseigenschaften, zu hydrologischen Randbedingungen (aktuelle und paleohydrologische), zur hydrogeochemischen Modellierung und zur Interpretation der Daten enthalten.

Im Dezember 2003 hat der Clay Club unter Mitwirkung der GRS in Braunschweig einen Workshop zum Thema „Geosphere Stability“ durchgeführt. Besonderes Augenmerk wurde folgenden Aspekte geschenkt:

- Unterstützende Argumente für die Langzeitstabilität und die Puffereigenschaften von Tonformationen
- Auswirkungen eines Endlagers auf tonige Wirtsgesteine
- Herangehensweisen der Langzeitsicherheitsanalyse bei der Evaluierung toniger Wirtsgesteine
- Dokumentation von Ansichten (auch unterschiedlicher) zur Vorhersagbarkeit der zeitlichen Entwicklung toniger Wirtsgesteine

Die wesentlichen Aussagen des Workshops, die hauptsächlich aus bisherigen Studien an potentiellen Wirtsformationen und/oder Standorten für Endlager für hochaktive Abfälle stammen sind:

Es wird erwartet, dass die oberflächennahen Sedimente von Endlagerstandorten durch klimatische Veränderungen und Erosionsprozesse signifikante Veränderungen erfahren können, dass die Einflüsse mit der Tiefe aber stark abnehmen. Generell wurde festgestellt, dass hydraulische, mechanische oder chemische Störungen durch die Tonformation abgepuffert werden können. Beispielsweise werden die günstigen reduzierenden Bedingungen durch Pyrit, Siderit und organisches Material gepuffert. Es gibt wenig Indizien dafür, dass Veränderungen an oberflächennahen Sedimenten die Eigenschaften der tieferliegenden Tonformation beeinträchtigen. Transportwege zur Biosphäre außerhalb der Tonformation können natürlich beeinflusst werden, insbesondere durch Veränderungen der hydraulischen und geochemischen Bedingungen.

Die Vorhersage der geologischen Entwicklung eines Standortes über für Langzeitsicherheitsanalysen relevanten Zeiträume (100 000 bis 1 Mio Jahre) erscheint auf Basis des heutigen Verständnisses und einer Kombination aus geowissenschaftlichen Argumenten möglich. Im Rahmen eines Safety Case wird von den Waste Management Organisationen derzeit ein großes Spektrum geowissenschaftlicher Argumente, das verschiedene räumliche und zeitliche Skalen abdeckt, zum Nachweis der Langzeitstabilität von Wirtsformationen verwendet. Zudem tragen Vergleiche mit weniger günstigen geologischen Situationen und entsprechende Modellrechnungen dazu bei, die Robustheit des Endlagersystems zu überprüfen.

Es gibt aber noch einen Bedarf zur Harmonisierung und Rechtfertigung der verschiedenen Argumente zur Langzeitstabilität der Geosphäre, da derzeit noch eine Inkonsistenz in der Verwendung von Argumenten für die unterschiedlichen Standorte besteht. Es sollte Wert darauf gelegt werden, darzustellen, warum ein Argument an einem Standort verwendet werden kann, an einem anderen Standort dagegen nicht gültig ist.

Der Bedarf, die „geologische Geschichte“ der Wirtsformation möglichst vollständig darzustellen, wurde hervorgehoben. Dies ist eine wichtige Basis, um die Kapazität der Tonformation zur Erfüllung der Sicherheitsfunktionen aufzuzeigen die zur Vertrauensbildung in einen Safety Case beiträgt. Hierzu existieren bereits umfangreiche Erfahrungen bei der Erdölindustrie, auf die in Zukunft zurückgegriffen werden sollte. In diesem Zusammen-

hang spielen auch die Spurenstoffprofile in Tonformationen eine wichtige Rolle, die zeigen, dass in vielen Tonformationen Diffusion den bestimmenden Transportprozess über lange Zeiträume darstellt. Die Ergebnisse begleitender Modellrechnungen zeigen, dass Diffusionsprozesse in diesen Formationen über Zeiträume von 10^5 bis 10^6 Jahre dominierend waren .

Ein weiterer wichtiger Punkt betrifft den Selbstverheilungsprozess in Tonformationen. da die EDZ unter ungestörten Bedingungen ja den einzigen Bereich in dem ein signifikanter Wasser- und Gastransport stattfinden kann, darstellt. Hier ist die die Kopplung von Hydraulik, Mechanik und Geochemie noch nicht verstanden und bedarf sowohl noch experimenteller als auch theoretischer Untersuchungen. Arbeiten dazu laufen in den EU-Projekt SELFFRAC und der Self Healing Initiative des Clay Club.

2.5.2 Review FEPCAT

Die Arbeitsgruppe Clay Club der IGSC hat zur Feststellung des derzeitigen Wissensstands und zur Identifikation zukünftiger Forschungsarbeiten einen Katalog mit Features, Events and Processes (FEPs) für Endlager für radioaktive Abfälle in Tonformationen erarbeitet [68]. Dieser FEPCAT-Katalog enthält insgesamt 59 FEPs. Alle FEPs wurden hinsichtlich ihrer Relevanz für die Langzeitsicherheitsanalyse sowie hinsichtlich des heutigen Wissensstands in fünf Kategorien unterteilt.

- **(1)** FEP ist potentiell relevant für Langzeitsicherheitsanalysen (PA) und gut charakterisiert. Es existieren Methoden und Rechenprogramme für eine quantitative Beschreibung.
- **(2)** FEP ist potentiell relevant für PA. Es gibt ein Basiswissen, das aber noch nicht ausreicht und weitere FuE-Arbeiten erfordert.
- **(3)** FEP ist potentiell relevant für PA aber noch nicht gut charakterisiert, das Wissen ist sehr begrenzt. Grundlegende FuE-Arbeiten sind erforderlich
- **(4)** FEP ist von geringer Relevanz für PA und gut charakterisiert.
- **(5)** FEP ist von geringer Relevanz für PA und noch nicht gut charakterisiert.

Für FEPs, die in die Kategorien 1, 4 und 5 fallen, besteht kein dringender Forschungsbedarf. Zukünftige Forschungsarbeiten sollten deshalb auf die FEPs konzentriert werden, die in die Kategorien 2 und 3 eingestuft wurden. Bei der Einteilung der FEPs wurde zwischen geklüfteten und nicht geklüfteten Tonformationen unterschieden. Im Fall von ge-

klüfteten Tonformationen sind zusätzliche FEPs von Relevanz, die bei nicht geklüfteten Systemen von untergeordneter Bedeutung und deshalb vernachlässigbar sind oder dort besser charakterisiert sind als in geklüfteten Systemen. Die FEPs, zu denen Forschungsbedarf besteht, sind in der Tabelle aufgelistet und nach Themenbereichen geordnet. Diejenigen FEPs, für die nur in geklüfteten Systemen Forschungsbedarf besteht sind mit einem Kreuz in der entsprechenden Spalte markiert. Für die übrigen FEPs besteht noch Forschungsbedarf unabhängig davon, ob es sich um eine geklüftete Tonformation handelt oder nicht.

Tab. 2.9 Liste mit FEPs, für die noch Forschungsbedarf besteht

FEPs, für die noch Forschungsbedarf besteht	geklüftet
Hydrogeologische Bedingungen in der Endlagerformation	
Advektion / Dispersion	x
Migrationsweg inklusive Heterogenität	x
Unentdeckte geologische Einheiten	x
Hydraulisches Potential / Gradient im Wirtsgestein, Randbedingungen	x
Hydraulische Eigenschaften des Wirtsgesteins	x
Flow wetted surface und Zugänglichkeit der Matrix	x
Paleohydrologie der Wirtsgesteinsformation und angrenzender Einheiten	
Verweilzeiten des Wassers in der Wirtsgesteinsformation	
Chemische Effekte in normaler geologischer Umgebung	
Zusammensetzung von Poren- und Kluftwasser	
Auflösung / Ausfällung von Festphasen	
Mischphasenbildung / Mitfällung	
Oberflächenkomplexierung	
Natürliche Organika, Komplexierung	
Kolloidbildung, -transport und -filtration	x
Daten für thermodynamische und kinetische Modellierung	
Chemische Effekte in Wechselwirkung mit dem Endlagersystem	
Redox-Kapazität des Wirtsgesteins	
Auswirkungen von Endlagerkomponenten auf die Porenwasserchemie im Wirtsgestein	
Wechselwirkungen stark alkalischer Lösungen mit dem Wirtsgestein	
Organische Substanzen aus dem Abfall und seine Auswirkungen auf die Transporteigenschaften im Wirtsgestein	

Tab. 2.9 Liste mit FEPs, für die noch Forschungsbedarf besteht

FEPs, für die noch Forschungsbedarf besteht	geklüftet
Entwicklung der Porenwasser- und Porengas-Chemie und der Mineralogie des Wirtsgesteins und angrenzender Einheiten	
Chemische Osmose	
Veränderungen durch mikrobielle Effekte	
Bildung und Auswirkungen von Gasen	
Gaslösung, chemische Wechselwirkung zwischen Gas und Porenwasser	
Gasmigration durch druckinduzierte Porosität (Risse, Porenvergrößerung)	
Gasinduzierter Transport in Wasser	
Hydro-Mechanische Effekte	
Geomechanische Stabilität	
Abmessungen und Struktur der Excavation Disturbed Zone (EDZ)	
Geomechanische Gesteinseigenschaften	
Hydraulische Eigenschaften der EDZ	
Gekoppelte Thermo-Hydro-Mechanische Prozesse (THM)	
Quellverhalten	
Selbstverheilung	
Auswirkungen des Quellens von Bentonit auf das Wirtsgestein	x
Langzeitentwicklung des Endlagers	
Zurückliegende Deformationen des Wirtsgesteins	
Zukünftige Veränderungen der Hydrochemie des Wirtsgesteins und angrenzender Horizonte (z.B. durch Diffusion, Wasser-Gesteins-Wechsel-	x
Zukünftige (Wieder)Aktivierung von Klüften, Änderungen der Migrationswege und hydraulischer Parameter,	x
Zukünftige Veränderung von hydraulischem Potential und Gradienten (z.B. durch Erosion oder Errichtung des Endlagers)	x

Zu vielen der genannten FEPs laufen derzeit schon nationale bzw. internationale Forschungsarbeiten. Auf der Basis ihrer FEP-Liste schlagen die Autoren vordringliche FuE-Arbeiten zu ausgewählten Themen vor. Diese Liste ist nicht vollständig, sondern enthält Arbeiten auf solchen Gebieten, auf denen der größte Fortschritt zu erwarten ist:

1. Druckanomalien in der Wirtsgesteinsformation

- Identifikation der verantwortlichen Mechanismen (Osmose, Horizontale Spannungen, Erosion, ...)

- Quantitative Auswertung aller relevanten Mechanismen
- Aussagen zur Begrenztheit großräumiger hydraulischer Leitfähigkeiten
- Aussagen zur Langzeitentwicklung der Formation
- Vergleichende Studie, die die Arbeiten an allen Standorten integriert
- Bewertung von Unsicherheiten (z.B. Wahl von Anfangs- und Randbedingungen)
- Modellgestützte Erklärung, warum Druckanomalien an manchen Standorten auftreten und an anderen Standorten nicht beobachtet werden

2. *Tracer-Profile entlang der Tonformation*

- Ermittlung der Relevanz von Diffusion und Advektion als Transportprozesse
- Überprüfung der Diffusionskoeffizienten für großräumigen Transport
- Überprüfung der erwarteten Langzeitentwicklung des Systems
- Vergleichende Studie, die die Arbeiten an allen Standorten integriert
- Bewertung von Unsicherheiten (z.B. Wahl von Anfangs- und Randbedingungen)
- Modellgestützte Erklärung, warum Diffusionsprofile an manchen Standorten auftreten an anderen dagegen nicht

3. *Geochemische Stabilität*

- Bewertung von Prozessen, die die geochemische Stabilität beeinflussen
- Ermittlung der Pufferkapazität des Wirtsgesteins gegenüber geochemischen Einflüssen
- Bewertung der Kinetik möglicher chemischer Reaktionen
- Vergleichende Studie, unter Berücksichtigung aller Standorte

4. *Zeitliche Entwicklung und Geometrie der EDZ, Selbstverheilung*

- Integriertes Modell zur Beschreibung der Entwicklung von EDZs: Bewertung von Gemeinsamkeiten und Unterschieden in verschiedenen verfestigten Tonformationen
- Untersuchung der Kinetik der Selbstverheilung unter realistischen Bedingungen für Tonformationen mit unterschiedlichem Verfestigungsgrad; dazu großräumige Experimente in Untertagelaboratorien.
- Verbesserung des Verständnisses und Quantifizierung der Prozesse, die zur Selbstverheilung führen

5. *Heutiger Spannungszustand in Tonformationen*

- Entwicklung von In-situ Messmethoden für Spannungszustände in Tonformationen

6. Auswirkung von Endlager-Komponenten auf Wirtsgestein und Porenwasserchemie

Derzeitig ist das Wissen zu diesem Thema sehr beschränkt. Bisher wurden Zement, Stahl und in geringem Umfang Organika berücksichtigt.

- Zusammenstellung aller möglichen Effekte
- Anhand erster Übersichtsuntersuchungen Überprüfung der Relevanz der Effekte
- Detaillierte Studien zu möglicherweise relevanten Effekten

7. Gas-induzierter Transport in Wasser

- Vordringlich sind Arbeiten zum Upscaling des Effektes notwendig. Untersuchung existierender Unsicherheiten durch ein In-situ Experiment in größerem Maßstab

8. Mikrobielle Einflüsse

Bisher gibt es zahlreiche Untersuchungen zum Bentonit, nicht aber zu Tonformationen.

- Überprüfung der Behauptung "aufgrund der engen Poren ist keine Mikrobenaktivität möglich" durch Untersuchungen in Untertagelaboren (z.B. durch sterile Bohrungen)
- Untersuchung der Bedeutung von Mikroben in der EDZ durch
 - mikrobiologische Charakterisierung von Kluft und Matrixwasser
 - Untersuchung durch Mikroben katalysierter geochemischer Reaktionen

Forschungsschwerpunkte in Deutschland

Im folgenden werden solche FuE-Arbeiten zum Thema Ton diskutiert, die aus deutscher Sicht eine hohe Priorität haben, bzw. zu denen von deutscher Seite wichtige Beiträge beigesteuert werden können. Da in Deutschland bisher kein Endlagerstandort in einer Tonformation betrachtet wurde, existiert bisher kein Instrumentarium zur Durchführung von Langzeitsicherheitsanalysen. Aus diesem Grund ist die Entwicklung eines Rechenmoduls für Radionuklid-Freisetzungs- und Ausbreitungsrechnungen für ein Endlager im Ton ein Schwerpunkt der Arbeiten. Auf der Basis eines Konzepts für ein potentielles deutsches Endlager soll dann mit dem Rechenprogramm exemplarisch eine Langzeitsicherheitsanalyse durchgeführt werden.

Das neu entwickelte Transportprogramm kann zur Modellierung natürlicher Spurenstoffprofile an ausgewählten Standorten im Ausland, z.B. Mont Terri oder Bure eingesetzt werden. Diese haben sich über geologische Zeiträume entwickelt und können als natürliches Analogon für den Schadstofftransport aus einem Endlager betrachtet werden. Derartige

Modellrechnungen können wichtige Beiträge insbesondere zu dem oben genannten offenen Punkt 2. *Tracerprofile entlang der Tonformation* sowie zu Punkt 1. *Druckanomalien in der Wirtsgesteinsformation* leisten. Dazu ist auch eine deutsche Mitarbeit im zukünftigen EU-Projekt FUNMIG geplant. Diese Anwendungsrechnungen würden zum einen der Überprüfung des neu entwickelten Rechenprogramms dienen, zum anderen auch Erfahrungen bei der methodischen Vorgehensweise bei der Charakterisierung möglicher Tonformationen in Deutschland liefern.

Aus geotechnischer Sicht können Beiträge zu Fragestellungen zur hydraulischen Leitfähigkeit sowie der Bestimmung und Überprüfung von Diffusionskoeffizienten geliefert werden. Diese wiederum dienen als Eingangsdaten für die Transportmodellierung. Neben entsprechenden In-situ-Untersuchungen zur Ermittlung großräumiger Auswirkungen erscheint es notwendig, insbesondere auch Laborversuche unter wohl definierten Bedingungen zu Klärung und Ermittlung gekoppelter hydraulischer und mechanischer Prozesse vorzunehmen.

Weiterhin sind Untersuchungen zur EDZ in Tonformationen bezüglich ihrer Ausdehnung und zeitlichen Entwicklung von Relevanz. Entsprechende Messungen wurden und werden von deutscher Seite bereits im Hartgestein durchgeführt. Aufbauend auf bereits existierenden Spannungsmessmethoden, sind Arbeiten zur Einsetzbarkeit in Tonformationen oder ggf. Weiter- bzw. Neuentwicklungen erforderlich und können somit Forschungsbeiträge zu den offenen Punkten „*Zeitliche Entwicklung und Geometrie der EDZ, Selbstverheilung*“ und „*Heutiger Spannungszustand in Tonformationen*“ liefern.

Darüber hinaus ist es notwendig, die Prozesse der Selbstverheilung in Langzeituntersuchungen im Labor bei unterschiedlichen Bedingungen, (Feuchte, Druck und Temperatur unter Einbeziehung des Kriechens von Ton) zu klären und damit prognostizierbar zu machen.

Aus geochemischer Sicht bilden Arbeiten zum Verhalten von Bentonit einen Schwerpunkt. Für die Dichtfunktion von Bentoniten ist der sich im Kontakt mit wässrigen Lösungen einstellende Quelldruck eine ausschlaggebende Größe. Der Quelldruck selbst wird durch eine Vielzahl von Faktoren bestimmt. Um die experimentelle Arbeit, die die Grundlagen für ein Modell liefert, in einem überschaubaren Rahmen zu halten, werden derzeit einige wenige Einflussfaktoren untersucht. Unter Einhaltung relevanter Randbedingungen für die Anfangsfeuchte und die Trockendichte wird der Quelldruck mit typischen Ton-

wässern unterschiedlicher Mineralisierung und mit gesättigten Salzlösungen untersucht. Die Versuche sehen zunächst die Bestimmung des unter den gegebenen Flutungsbedingungen realisierbaren, maximalen Quelldruckes vor. Weitere Versuche haben zum Ziel, die Quelldrucke zu bestimmen, die sich bei unvollständiger Durchfeuchtung des Bentonits einstellen.

Die Barriereeigenschaft der Tonformation muss über lange Zeiträume vorhanden sein. Zutritt von Lösungen, die nicht im Gleichgewicht mit dem jeweiligen Ton stehen wie z.B. Lösungen, die mit Endlagerkomponenten in Kontakt waren, kann zu Veränderungen der Toneigenschaften führen. Für die Prognose der Langzeitstabilität von Tonmineralen ist es deshalb wichtig, Umlöseprozesse von bestimmten, wichtigen Zweischicht- und Dreischichtmineralen in thermodynamische Modellrechnungen zu integrieren. Dazu ist es erforderlich, Kenntnisse über die Kinetik der stattfindenden Mineralumbildungen zu erlangen, sowie Parameter zu gewinnen, mit denen sich die Tonmineralkonstituenten in wässrigen Salzlösungen thermodynamisch beschreiben lassen. Um Gleichgewichtsreaktionen zwischen Tonmineralen und wässrigen Lösungen modellierbar zu machen, bedarf es ferner eines neuen Konzeptes, da die Anwendung des aus der Thermodynamik stammenden Phasenbegriffs in diesem Kontext problematisch ist. Dazu müssten in wässriger Lösung suspendierte Tonminerale einer Phasenanalyse unterworfen und rechnerisch untersucht werden, ob die Lösungszusammensetzung sich als im Gleichgewicht befindlich mit einfacheren Phasen angesprochen werden kann.

2.5.3 Review Opalinus-Ton

Die NEA hat auf Ersuchen des Schweizer Bundesamtes für Energie ein Review der Langzeitsicherheitsanalyse des Projekts Opalinuston der Nagra durchgeführt. Für diesen Review wurde eine internationale Expertenkommission gebildet, die den Review vorgenommen hat. Das Ergebnis der Beurteilung ist von der NEA veröffentlicht worden [66]. Neben dem Review zur Beurteilung der Qualität der Sicherheitsanalyse wurde weiterhin untersucht, welche neuen Aspekte sich aus der Sicherheitsanalyse für den Opalinuston bezüglich der Durchführung von Sicherheitsanalysen für potenzielle deutsche Endlager in Ton- oder anderen Formationen ergeben. Dabei wurden einzelne wichtige Aspekte identifiziert, die im Folgenden aufgelistet sind.

2.5.3.1 Quellterm

Bei dem Quellterm für abgebrannte Brennelemente wurde in der Sicherheitsstudie für Opalinuston zwischen zwei chemischen Formen für C-14 unterschieden: einer organischen und einer anorganischen Form. In bisherigen Sicherheitsanalysen für abgebrannte Brennelemente wurde davon ausgegangen, dass C-14 in anorganischer Form vorliegt. Aufgrund neuerer Forschungsarbeiten zeigt sich aber, dass zumindest in Zircaloy und Metallteilen der aus Stickstoff durch Aktivierung gebildete Kohlenstoff in Form organischer Verbindungen in Lösung geht (vgl. Abschnitt 2.4.3). Dies ist konsistent mit der Annahme, dass dieser Kohlenstoff als Carbid vorliegt. Bei der Sicherheitsstudie für Opalinuston wurde deshalb davon ausgegangen, dass das gesamte C-14-Inventar der Zircaloy-Hülsen in organischer Form vorliegt.

Hinsichtlich der Mobilisierung von C-14 aus dem Zircaloy wurde angenommen, dass sich 20 % des C-14-Inventars in einer Oxidschicht befinden, die sich direkt nach Behälterausfall und Wasserzutritt löst. Diese Annahme wird durch Experimente von *Yamaguchi et al.* gestützt [114]. Der restliche Anteil des C-14 aus der Zircaloyhülle wird durch Korrosion des Zircaloy mit einer Rate von 10 nm/a freigesetzt, entsprechend der Beobachtungen aus Korrosionsexperimenten.

Es wird davon ausgegangen, dass die organische Form von C-14 sehr mobil ist und weder im Bentonit noch im umgebenden Tonstein durch Sorption zurückgehalten wird. Bei der anorganischen Form wird dagegen in Bentonit und Opalinuston eine gewisse Rückhaltung beobachtet. Diese Rückhaltung resultiert aus einer isotopischen Verdünnung, durch das Carbonat, das in Form von Calcit in Bentonit und Opalinuston vorliegt. Sie wird durch Kd-Werte für den Bentonit und für den Opalinuston berücksichtigt.

Aufgrund der geringen Rückhaltung und der frühen Freisetzung aus dem Zircaloy spielt das organische C-14 eine wichtige Rolle und stellt hinsichtlich der Strahlenexposition im Referenzfall eines der vier wichtigsten Radionuklide dar. Das anorganische C-14 ist insbesondere durch die Rückhaltung im Opalinuston von untergeordneter Bedeutung.

Diese Ergebnisse sind von hoher Relevanz für eine deutsche Sicherheitsstudie für ein Endlager in Tonformationen. Die Annahme, dass C-14 ausschließlich in anorganischer Form vorliegt, kann zu einer Unterschätzung der durch C-14 bewirkten Dosis führen. Deshalb muss berücksichtigt werden, dass ein Teil des C-14 in organischer Form vorliegt.

2.5.3.2 Übergang Nahfeld / Fernfeld

Für die Modellierung des Radionuklidtransports wurden von der Nagra zwei unterschiedliche, unabhängig rechnende Codes für das Nahfeld, das den Bentonitbuffer mit einschließt (STMAN), und das Fernfeld (PICNIC) verwendet. Dadurch ergibt sich das Problem, auf welche Weise der Übergang an der Grenze zwischen Nahfeld und Fernfeld modelliert wird. Zur exakten Modellierung des diffusiven Transports an der Schnittstelle wäre eine direkte, zeitabhängige Rückkopplung zwischen den Modellen für das Nahfeld und das Fernfeld notwendig. Bei Verwendung zweier vollständig entkoppelter Codes ist dies allerdings nicht möglich. Deshalb wurde von der Nagra eine Flussrandbedingung für den Nahfeldcode eingeführt, indem der diffusive Schadstofffluss an der Grenze durch einen effektiven advektiven Fluss ersetzt wird. Um diesen zu bestimmen, wurde eine charakteristische Diffusionslänge von 5 m anstelle der realen Transportlänge von 40 m verwendet. Durch diesen willkürlichen Ansatz soll die Konservativität sichergestellt werden, indem der Transport in jedem Fall überschätzt wird. Nach Aussage der Sicherheitsanalyse für den Opalinuston ist dies durch verschiedene Vergleichsrechnungen belegt, ein schlüssiger Nachweis der Konservativität existiert jedoch ebenso wenig wie eine belegbare Aussage über das Ausmaß der Überschätzung. Indem an der Schnittstelle zwischen Bentonit und Wirtsformation ein fester Schadstoffstrom künstlich aufgeprägt wird, wird außerdem eine Bewertung der Wirksamkeit der einzelnen Barrieren für die Schadstoffrückhaltung verhindert. Aus diesen Gründen erscheint es sinnvoller, das Nahfeld und das Fernfeld mit ein und demselben Code innerhalb einer einzigen zeitabhängigen Rechnung zu modellieren und somit die zeitabhängige Kopplung der Transportvorgänge in beiden Bereichen korrekt zu berücksichtigen. Diese Überlegungen wurden bereits im konzeptuellen Modell im derzeit laufenden Projekt zur Modellierung des Radionuklidtransports in Tonformationen (TONI, FKZ 02 E 9813) berücksichtigt.

2.5.3.3 Gastransport

Für den Gastransport in Tonformationen wurden in der Sicherheitsstudie Opalinuston vier Prozesse in Betracht gezogen:

- der diffusive Transport gelöster Gase,
- der Zweiphasenfluss,

- der Fluss der Gase durch Mikrorisse, d.h. durch Porenbereiche, die durch den Gasdruck erweitert werden („pathway dilation“) und
- der Gastransport in gasdruckinduzierten Klüften („gas frac“).

Welcher dieser Transportprozesse maßgebend ist, hängt vom Gasdruck, dem Gebirgsdruck und der Gasbildungsrate sowie von den angenommenen Parametern für den Zweiphasenfluss ab. Als relevant für den Opalinuston wurde erstens der Zweiphasenfluss als Folge einer geringen und mittelstarken Gasbildung und zweitens die Mikrorissbildung als Folge einer starken Gasbildung identifiziert. Dass der diffusive Transport gelöster Gase vernachlässigt werden darf und dass der Druckaufbau durch Gasbildung nicht schnell genug erfolgt, um druckinduzierte Klüfte zu erzeugen, wurde durch abschätzende Rechnungen gezeigt.

Zum Zweiphasenfluss wurden ebenfalls nur abschätzende Rechnungen durchgeführt. Der Prozess der Mikrorissbildung wurde mit Hilfe eines ad hoc Ansatzes beschrieben, der oberhalb eines kritischen Gasdrucks eine mit dem Druck linear veränderliche Permeabilität vorsieht.

Der Gastransport in Tonformationen ist insgesamt nicht vollständig verstanden, so dass für potenzielle deutsche Tonformationen noch Forschungsbedarf besteht. Dies betrifft zum einen theoretische Untersuchungen zur mikroskaligen Rissbildung und zu den Konsequenzen dieser Rissbildung auf den Gastransport. Zum anderen sind experimentelle Untersuchungen erforderlich, die die Parameter für den Zweiphasenfluss und - für hohe Gasbildungsraten - die Daten zur Bildung und Ausbreitung von Mikrorissen und den einhergehenden Änderungen der hydraulischen Parameter liefern. Auf dieser Grundlage lassen sich auf Prozessebene numerische Modelle entwickeln, mit denen die Berechnung des Gasdrucks im Endlagerbereich und der Verteilung des Gases in der Formation möglich ist. Solche Modelle sind in Deutschland bisher nicht vorhanden.

2.5.3.4 Radionuklidtransport über den Gaspfad

Für den Radionuklidtransport gasförmiger Spezies wurde in der Sicherheitsanalyse der Nagra der Transport von gasförmigen C-14 in Form von Methan betrachtet. In einem alternativen Szenario wird angenommen dass Methan in der Gasphase durch Wegsamkeiten in der Tonformation transportiert wird und im oberflächennahen Aquifer wieder ge-

löst wird. Im Referenzfall wird dagegen betrachtet, dass das Methan im Nahfeld wieder gelöst und diffusiv durch den Opalinus-Ton bis in den Aquifer transportiert wird. Dort wird die Konzentration durch den Grundwasserstrom verdünnt. Wird das Wasser als Trinkwasser aus einem Brunnen zum Verzehr entnommen führt die Kontamination mit dem radioaktiven Methan zu einer potenziellen Exposition der Bevölkerung.

In deutschen Sicherheitsanalysen wurde der Gaspfad als Ausbreitung der gasförmigen Radionuklide bis in die Atmosphäre betrachtet. In der Atmosphäre erfolgt eine Verdünnung auf Grund der Luftzirkulation. Die Exposition der Bevölkerung beruht hauptsächlich darauf, dass das gasförmige C-14 von Pflanzen aufgenommen wird, die wiederum entweder als Nahrungsmittel dienen, oder als Futter für Tiere verwendet werden.

Der Pfad der Wiederauflösung der Gase im Aquifer führt jedoch unter bestimmten Umständen zu höheren potenziellen Strahlenexpositionen als die Ausbreitung in der Atmosphäre. Die Wiederauflösung der gasförmigen Radionuklide wurde nach folgendem Szenario erstmalig in der Sicherheitsanalyse für das Endlager Morsleben betrachtet [105]: Das C-14 wird als Methan aus dem Endlager freigesetzt und in der ungesättigten Bodenzone mikrobiell in Kohlendioxid umgewandelt. werden. Im Wasser stellt sich eine Kohlendioxid-Gleichgewichtskonzentration mit der Atmosphäre ein. Dieses Wasser wird als Trinkwasser und zur Bewässerung von Pflanzen eingesetzt.

Die für das Endlager Morsleben durchgeführten Betrachtungen beruhen auf sehr konservativen und unrealistischen Annahmen. Welches Ausbreitungsszenario für den Gaspfad realistisch ist, hängt sowohl von der Freisetzungsrate und dem Transportprozess der gasförmigen Radionuklide als auch von dem Grundwasserstrom und dem Expositionspfad ab. Aus diesem Grund sollten die Szenarien zur Ausbreitung gasförmiger Radionuklide in Abhängigkeit der genannten Parameter neu bewertet und standardisierte Ausbreitungsszenarien erstellt werden.

2.5.4 Konzeptuelle Modelle für die Modellierung des Radionuklidtransports aus Endlagern in Ton

Die Modellierung des Radionuklidtransports in einer Tonformation erfolgt im Rahmen von Sicherheitsanalysen bis zur Freisetzung der Radionuklide in den umgebenden Aquifer oder bis in eine durchlässige Kluftzone in der Tonformation, in der der advective Wassertransport so schnell ist, dass die Transportzeit in der Kluftzone bis zum Aquifer vernachlässigbar ist.

Für die Ausbreitung der im Wasser gelösten Radionuklide in einer Tonformation sind die Transportprozesse Advektion, Diffusion und Dispersion in Betracht zu ziehen. Weiterhin können Radionuklide in der Gasphase transportiert werden. Die Rückhaltung erfolgt durch Sorption. Die genannten Transport- und Rückhalteprozesse für Radionuklide in Tonformationen werden im Folgenden beschrieben.

2.5.4.1 Advektion und Dispersion

Die Advektion hängt von den hydraulischen Gradienten in der Tonformation und deren Permeabilität ab. Für die Errichtung eines Endlagers für radioaktive Abfälle werden im Allgemeinen klutfreie Tonformationen in Betracht gezogen. Die Permeabilität von klutfreien Tonformationen ist sehr gering und liegt typischerweise bei 10^{-20} m^2 . Neben dem natürlichen hydraulischen Gradienten muss unter Umständen auch der in manchen Tonformationen existierende, sogenannte anomale Porenwasserdruck berücksichtigt werden. Für die meisten Tonformationen, die für eine Errichtung eines Endlagers in Betracht gezogen werden, kann auf Grund der geringen Permeabilität die Advektion und somit auch die Dispersion gegenüber der Diffusion vernachlässigt werden.

2.5.4.2 Diffusion

Die Beschreibung der Diffusion in Tonformationen zeigt einige Besonderheiten gegenüber jener in anderen Formationen, die in den Modellen berücksichtigt werden müssen. Diese Besonderheiten sind zum einen Effekte, die durch den geringen Durchmesser der Poren in Tonen zurückzuführen sind und zum anderen die Anisotropie.

Der Porenradius in Tonen beträgt nur wenige Nanometer [78] und ist somit im Vergleich zu anderen Gesteinen besonders gering. Aufgrund des sehr geringen Porenradius und der elektrisch geladenen Oberflächen der Poren in Tonformationen entsteht eine Wechselwirkung zwischen den transportierten Radionukliden und der Tonmatrix. Die Wechselwirkung wiederum führt dazu, dass ein Teil des Porenraums für den diffusiven Transport der Schadstoffe nicht zugänglich ist. Die Nichtzugänglichkeit eines Teils des Porenwassers wird durch drei Effekte verursacht: die elektrostatische Wechselwirkung des Porenwassers mit der Tonmatrix, der Ausschluss der gelösten Radionuklide aus der Stern-Gouy- Schicht und der Ausschluss der gelösten Radionuklide aus kleinen Poren aufgrund ihrer Größe. Die Wechselwirkung zwischen dem Schadstoff und der Porenwand hängt somit von der Ladung und der Größe des Schadstoffteilchens ab.

Die genannten Wechselwirkungen haben Auswirkungen sowohl auf die in der Modellierung zu verwendende Porosität und den Diffusionskoeffizienten. Die für den Radionuklidtransport maßgebliche diffusionszugängliche Porosität n_{diff} ist elementspezifisch und kleiner als die totale Porosität n_{tot} . Weiterhin ist der Weg den die Schadstoffe bei der Diffusion durch die Tonformation zurück legen unterschiedlich, was sich in elementspezifischen Diffusionskoeffizienten auswirkt. Da die Datenlage für die Elementspezifität der Porosität und des Diffusionskoeffizienten noch schwach ist, werden für die Modellierung meist nur drei Werte in Abhängigkeit der elektrischen Ladung des Schadstoffs verwendet: für Anionen und Kationen und für elektrisch neutrale Spezies.

Ein weiterer Unterschied der Diffusion in Tonformationen gegenüber anderen Formationen ergibt sich auf Grund der Schichtstruktur der Tonformationen, die eine Folge der Entstehung durch Sedimentation ist. Parallel zur Schichtung ist der Diffusionskoeffizient größer als senkrecht zur Schichtung. Dieser Effekt wird als Anisotropie bezeichnet, und die unterschiedlichen Diffusionskoeffizienten sind in der Modellierung zu berücksichtigen.

2.5.4.3 Rückhaltung

Eine Rückhaltung der Schadstoffe kann in der Tonformation durch Sorption erfolgen. Bei der Sorption werden zwei Prozesse unterschieden, zum einen die Oberflächenkomplexbildung und zum anderen der Ionenaustausch. Die Oberflächenkomplexbildung kann noch in die unspezifische und spezifische Adsorption unterteilt werden. Prinzipiell kommen diese Sorptionsprozesse auch an anderen Mineraltypen vor, aber vor allem die spe-

zifische Adsorption und der Ionenaustausch haben bei Tonmineralien aufgrund ihrer ausgeprägten Oberflächenladung eine größere Bedeutung. Die Beschreibung der Sorption erfolgt meistens durch Sorptionsisothermen.

Für die spezifische Sorption und den Ionenaustausch in Ton sind jedoch Oberflächenkomplexbildungsmodelle angebracht. Diese stellen eine mechanistische Beschreibung der Sorption dar. Betrachtet werden dabei Reaktionen der Oberflächenplätze mit Schadstoffionen. Die Reaktionen werden über Massenwirkungsgesetze beschrieben, so dass bei einer Modellierung mit geochemischen Rechenprogrammen für jeden Oberflächenkomplex Komplexbildungskonstanten erforderlich sind.

2.5.4.4 Gastransport

Der Mechanismus des Transports von Gasen in einer Tonformation - inklusive gasförmiger Radionuklide - ist bisher Gegenstand der Forschung und noch nicht vollständig geklärt. Die Gastransportprozesse in Tonformationen sind, wie in Abschnitt 2.5.3.3 beschrieben, die Diffusion gelöster Gase, der Zweiphasenfluss und der Gastransport auf Wegsamkeiten, die durch den hohen Gasdruck erst gebildet werden.

Im Fall des Untersuchungsstandortes Benken geht man von einem klassischen Zweiphasenfluss im Opalinuston aus, solange die Gasdrücke mehr als 3-4 MPa unterhalb der minimalen Gebirgshauptspannung von 14-15 MPa liegen. Darüber setzt zuerst eine dilatanzgesteuerte Mikrorissbildung ein, bis die Gasdrücke dann schließlich den Fracdruck des Gebirges überschreiten. Im Beispiel Benken liegt der Fracdruck mit etwa 17,7 MPa ca. 2,5 MPa über der minimalen Gebirgsspannung. Aufgrund des langsamen Druckanstiegs infolge der langsamen Gasbildung wird am Untersuchungsstandort Benken davon ausgegangen, dass sich der Druck immer im Bereich des dilatanzgesteuerten Gastransports bewegt und nicht den Fracdruck des Gebirges überschreitet. In dem Moment, in dem die Transportpfade bestehen, sinkt der Druck aufgrund des Gasflusses wieder ab. Das Eindringen von Gas und der Gasfluss hat nur eine geringe Ent sättigung des Porenraums zur Folge und die Gastransportpfade verschließen.

Sicherheitsanalyse für Tonformationen

Kenntnisstand

- Prozesse des Radionuklidtransports in Tonformationen sind gut verstanden
- Gastransport in Tonformationen ist noch nicht im Detail verstanden

Relevanz:

Hohe Relevanz, wenn ein Endlager in Tonformation in Betracht gezogen wird

Empfehlungen für weitere FuE

Entwicklung von Modellen zur Beschreibung des Gastransports auf Prozessebene
Erarbeitung standardisierter Szenarien für die Ausbreitung gasförmiger Radionuklide

2.6 Vorschläge zur Erstellung eines neuen Bentonit-Aufsättigungsmodells

2.6.1 Stand bei der Modellierung der Bentonitaufsättigung

2.6.1.1 Tagungen

Jüngste Forschungsergebnisse zur Bentonitaufsättigung wurden auf den folgenden Veranstaltungen präsentiert:

- Workshop der Geodevelopment AB in Zusammenarbeit mit SKB, Posiva Oy und der EU: „Clay microstructure and its importance to soil behaviour“, Lund, Schweden, Oktober 2002.
- Internationale Konferenz der International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: „From experimental evidence towards numerical modelling of unsaturated soil“, Weimar, September 2003.
- Internationales Meeting von SKB und Geodevelopment AB: „Task force-related meeting on buffer and backfill modelling“, Lund, Schweden, März 2004.

Bei dem Workshop 2002 in Schweden lag die Betonung auf Methoden und Ergebnissen zur Grundlagenforschung über Tone und Tongemische. Überwiegend mit Blickrichtung auf die Verschlusseigenschaften in Untertagedeponien wurden Untersuchungen zu Effekten sowohl auf mikroskopischer als auch auf makroskopischer Ebene vorgestellt. Dabei wurde auch der Prozess der Aufsättigung und die damit verbundenen Einflüsse des eindringenden Wassers auf die Mikrostruktur des Bentonits im Detail diskutiert [85]. Konsequenzen für die Modellbildung wurden jedoch nicht aufgezeigt.

Der Schwerpunkt der Konferenz in Weimar lag dagegen auf dem Zweiphasenfluss sowie dessen Kopplung mit mechanischen Effekten. Dies galt auch für die bentonitbezogenen Beiträge. Wie auch auf dem Workshop in Lund stand die Diskussion von Phänomenen gegenüber Präsentationen von konkreten Modellierungsaufgaben im Vordergrund.

Im Gegensatz zu den vorangehenden Tagungen war das Meeting 2004 in Lund vorwiegend den Erfahrungen bei der THM-Modellierung in granitischen Formationen gewidmet. Der aktuelle Stand der Modellentwicklung wurde herausgearbeitet, um mögliche künftige Forschungsgebiete zu identifizieren. Abschließend wurde die Bildung einer Task-Force unter dem gemeinsamen Management von SKB und UPC vorgeschlagen:

2.6.1.2 Aktuelle Grenzen bei der THM-Modellierung

Modellrechnungen zu hydraulischen Aspekten der Bentonitaufsättigung wurden sowohl auf dem Workshop 2002 in Lund als auch auf der Konferenz in Weimar lediglich von den Entwicklern des COMPASS-Codes aus Cardiff vorgestellt [14], [108]. Die Simulation eines In-situ Versuchs zur Aufsättigung eines Buffers im kanadischen URL mit dem klassischen Zweiphasenflussansatz für die Hydraulik gelang dabei erst, als ein signifikanter Teil des Porenwassers durch Modifikation der Relative-Permeabilitäts-Sättigungs-Funktion immobilisiert wurde. Mit diesem Ansatz sollte die Speicherung von Wasser in den Zwischenschichten der Tonminerale, das heißt der Einfluss der Mikrostruktur, berücksichtigt werden, der nicht im konzeptuellen Modell des Codes enthalten ist. Dies entspricht auch heute noch dem Entwicklungsstand des Programms, wie sich auf dem Meeting 2004 in Lund gezeigt hat [109].

Bei der Modellierung eines Laborversuchs mit CODE-BRIGHT zur Aufsättigung mit salinen Lösungen zeigte sich, dass der Code die Aufsättigungsgeschwindigkeit über einen weiten Bereich an Wassersättigungen befriedigend reproduziert. Bevor die vollständige Sättigung jedoch erreicht wurde, gingen die gemessene und die simulierte Kurve für den Wassergehalt deutlich auseinander. Welcher Prozess das beobachtete Phänomen letztlich verursacht hatte, ist zur Zeit nicht klar. Favorisiert wurde auch hier die Erklärung, dass die Veränderungen der Mikrostruktur die Aufsättigung behindern. Verbesserungen wurden durch Anpassung des mechanischen Modells erzielt, was aber wie im Fall der Anpassungen des hydraulischen Modells beim COMPASS-Code eine rein empirische Maßnahme darstellt.

Die Entwickler von CODE-BRIGHT sind mit Bezug auf ihre Modellrechnungen zum Prototype Repository Projekt nicht zufrieden. Die Vorhersagen zu diesem Versuch waren nach eigener Aussage nicht sehr erfolgreich. Auch nach einer Kalibrierung der Parameter ließen sich nur Temperatur und Hydraulik, nicht aber Spannungen und Verformungen befriedigend reproduzieren. Sie schlussfolgern daher, dass eine blinde Vorhersage der THM-Entwicklung der Aufsättigung zur Zeit noch nicht möglich ist.

2.6.1.3 Neue Entwicklungen bei etablierten Rechenprogrammen

ROCKFLOW

Nicht ganz so lange wie der COMPASS-Code wird das Programm ROCKFLOW für die Modellierung der Bentonitaufsättigung eingesetzt [46] (vgl. auch [83]). Während BGR ROCKFLOW für die THM-Modellierung mit dem Strukturmechanikprogramm ADYNA koppelt, wird an der Universität Tübingen ein im Code integrierter Mechanikteil verwendet. Im Rahmen des Vorhabens "Experimentelle und numerische Untersuchungen des Langzeitverhaltens von Abschlussbauwerken im Salinar mit Bentonitgemischen als Dichtelement", FKZ 02 C 0881, wurden die mechanisch-hydraulischen Ansätze in ROCKFLOW weiter entwickelt. Dabei wurde unter Anderem versucht, die Wasseraufnahme und das damit verbundene Quellen durch Ansätze zu beschreiben, die sich auf den Kenntnissen über ein einzelnes Tonpartikel abstützen. Grundlage waren dabei die Daten zur Belegung der Zwischenschichten mit Wassermolekülen und die damit einhergehenden Schichtabstände. Auf diese Weise sollten makroskopische Phänomene durch die auf mikroskopischer Ebene ablaufenden Prozesse beschrieben werden. Inwieweit dadurch die empirischen Stoffgesetze ersetzt werden können, ist allerdings unklar. Da in diesen Ansätzen Mittelwerte für die Geometrie und die Anzahl der Zwischenschichten eines Tonpartikels verwendet werden, ist der Erfolg des neuen Modells grundsätzlich davon abhängig, wie gut es gelingt, diese Mittelwerte experimentell zu bestimmen.

MUFTE_UG

Ebenfalls von Interesse für die Modellierung der Bentonitaufsättigung erscheint eine Weiterentwicklung des thermisch-hydraulischen Zweiphasenfluss-Codes MUFTE_UG [30]. Im Gegensatz zu den zur Zeit verwendeten Rechencodes wird hier erstmalig eine pragmatische Trennung von mobilem und gebundenem Wasser vorgenommen, die als Unterscheidung zwischen Porenwasser und Zwischenschichtwasser gedeutet werden kann.

CODE-BRIGHT

Mit CODE-BRIGHT sind durch eine Kopplung mit dem Programm PHREEQC nunmehr auch THMC-Rechnungen möglich.

DELPHIN 4

Am Institut für Bauklimatik in Dresden wurde der Code DELPHIN zur gekoppelten Simulation des Wärme-, Feuchtigkeits-, Luft- und Salztransports entwickelt. Der Code wird hauptsächlich für Untersuchungen zu Feuchteschutz und der Wärmedämmung an Bauwerken unter natürlichen klimatischen Bedingungen eingesetzt. Seit kurzem wird DELPHIN auch für Modellrechnungen zum Mock-up Versuch am Centre for Experimental Geotechnics (CEG) der Tschechischen Technischen Universität Prag verwendet.

BEM

Ein Code zur Modellierung von Strömung und Transport in geklüftet porösen Medien auf der Grundlage der Randelementmethode wurde am Wessex Institute of Technology, Southampton, England entwickelt. Ähnlich wie im ROCKFLOW-Code besteht die Möglichkeit einer Verknüpfung von unterschiedlich dimensional Elementen zur Beschreibung von Klüften und Fließkanälen im porösen Gestein.

2.6.1.4 Ergebnisse des EBS-Projekts

Das EBS-Projekts [48] stellt eine Datenbasis für die Aufsättigung unter Umgebungsdruck und -temperatur mit einer bislang nicht erreichten zeitlichen und räumlichen Auflösung zur Verfügung. Erstmals existieren derartige Daten auch für die ausschließliche Aufsättigung über den Wasserdampf.

Mit einem parallel zu den experimentellen Arbeiten entwickelten Code zur Simulation der Aufsättigung über den Wasserdampf - dem „Dampfdiffusionsmodell“ - wurde die hohe Relevanz des Dampftransports bei der Aufsättigung mit flüssigem Wasser nachgewiesen. Aufgrund der im Modell zugelassenen Vereinfachungen konnte der Anteil der Dampfdiffusion am Wassertransport im Porenraum allerdings nicht quantifiziert werden. Die Ergebnisse lassen deshalb sogar die Möglichkeit offen, dass der Wassertransport überwiegend über die gasförmige Phase des Wassers stattfindet.

2.6.1.5 Ergebnisse des ARTE-Projekts

Im Rahmen des ARTE-Projekts [7] wurden orientierende Modellrechnungen zur Aufsättigung eines Bentonitbuffers mit einer frühen Version des Dampfdiffusionsmodells aus [48] durchgeführt. Dabei wurden Fälle mit Atmosphärendruck und mit erhöhtem Druck, nicht aber mit erhöhter Temperatur betrachtet. Die Referenzhydratationsrate, die die Stärke der Hydratation als Folge einer Differenz der chemischen Potentiale des Poren- und des Zwischenschichtwassers bestimmt, wurde in diesen Modellrechnungen um zwei Größenordnungen variiert. Wie sich nachträglich zeigte, lag der in [48] ermittelte Wert innerhalb der Variationsbandbreite. Für die betrachteten Fälle zeigte sich, dass die Geschwindigkeit der Aufsättigung über Dampf einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Entwicklung der Wassergehaltsverteilung hatte.

2.6.2 Schlussfolgerungen für die konzeptuellen Modelle

2.6.2.1 Etablierte Ansätze für die THM-Modellierung der Bentonitaufsättigung

Bei der Entwicklung der zur Zeit etablierten Aufsättigungsmodelle wurde hinsichtlich der Hydraulik von den phänomenologischen Ähnlichkeiten der klassischen Zweiphasenströmung mit der Bentonitaufsättigung ausgegangen [47]. Dabei wird als Primärvariable sowohl für die Differentialgleichungen als auch für die Zustandsgleichungen der Wassergehalt bzw. der dazu äquivalente Grad der Sättigung¹ verwendet. In diesem Ansatz wird also darauf verzichtet, zwischen dem mobilen Porenwasser und dem hydratisierten Zwischenschichtwasser zu unterscheiden².

Auch die mit der Aufsättigung einhergehende Veränderung der Porosität wird als Funktion des Wassergehalts bestimmt. Ein empirischer Zusammenhang verknüpft den Wassergehalt mit dem Quelldruck. Zusammen mit dem ebenfalls wassergehaltsabhängigen

¹ Der Grad der Sättigung ist ein auf den Bereich von 0 bis 1 normiertes Maß für die Menge an Wasser, die vom Bentonit aufgenommen werden kann. Dieses Maß ist nicht zu verwechseln mit der Sättigung in der klassischen Zweiphasenflusstheorie, mit der der volumetrische Anteil des Wasser am Porenraum gemeint ist.

² Ausgenommen sind davon lediglich CODE-BRIGHT [25] und MUFTE_UG [30]. In CODE-BRIGHT handelt es sich um einen ad-hoc Ansatz für eine spezielle Aufgabe, der rein empirisch ist und in den bekannten Modellen keine Rolle spielt. Der Anteil an immobilisiertem Wasser in MUFTE_UG ist in der aktuellen Version nicht unabhängig vom Porenwassergehalt. Es bedarf hier ebenfalls weiterer Entwicklung, um eine realitätsnahe Beschreibung beider Wasseranteile bei der Bentonitaufsättigung zu liefern.

Elastizitätsmodul und einem elastoplastischen Materialgesetz³ geht der Quelldruck in eine strukturmechanische Differentialgleichung ein. Diese liefert ein Verschiebungsfeld, aus dem schließlich die Porosität berechnet wird.

Diese Vorgehensweise wirft Widersprüche im etablierten konzeptuellen Modell der Aufsättigung auf. Zwei Beispiele:

- Einerseits hängen die Kapillarkräfte und die chemisch bedingten Saugspannung von unterschiedlichen Größen ab, andererseits wird lediglich die Summe aus beiden Größen als Funktion des Wassergehalts (retention curve) betrachtet [49].
- Der Grad der Aufsättigung hinsichtlich Permeabilität, Saugspannung etc. wird durch Zustandsgleichungen beschrieben, die allein vom Wassergehalt abhängen. Tatsächlich sind diese Phänomene eine Folge der Einlagerung von Wasser in den Zwischenschichten der Tonminerale. Da die Zustandsgleichungen rein algebraische Funktionen sind, wird die Dynamik des Aufsättigungsvorgangs, genauer gesagt die Dynamik der Hydratation nicht berücksichtigt. Die Verwendung von algebraischen Zustandsgleichungen impliziert damit eine instantane Hydratation. Instantane Hydratation bedeutet jedoch, dass eine Strömung von flüssigem Wasser in einem teilgesättigten Bentonit nicht möglich ist.

Offensichtlich ist die gängige Beschreibung der Bentonitaufsättigung nicht sehr realitätsnah. Relevante physikalische Prozesse werden nicht oder nicht angemessen berücksichtigt. Dies schränkt die Anwendbarkeit der betreffenden Codes stark ein. Fehler im Ansatz des mathematischen Modells können zwar durch Kalibrierung der Parameter und Zustandsgleichungen kompensiert werden, das Modell ist dann aber nicht mehr ohne Rekalibrierung des gesamten Parametersatzes auf andere physikalische Bedingungen übertragbar. Der Aufwand für die Kalibrierung der Parameter für thermisch und hydraulisch transiente Bedingungen wäre dabei beträchtlich.

³ Die Wahl eines zutreffenden Materialgesetzes ist zur Zeit Gegenstand der Forschung.

2.6.2.2 Alternative konzeptuelle Modelle

Aufbauend auf den Ergebnissen des EBS-Projekts wurde das Dampfdiffusionsmodell als alternatives konzeptuelles Modell der Aufsättigung eines Bentonitbuffers entwickelt [50]. Es gliedert sich in Vorlaufphase, Hauptphase und Auslaufphase.

In der Vorlaufphase sättigt sich der Bentonit im Bereich der Kontaktfläche zum Wasserleiter sehr schnell vollständig auf. Die Eindringtiefe des Wasser beträgt dabei unter Atmosphärendruck nur wenige Millimeter. Danach ist die Strömung flüssigen Wassers durch diese aufgesättigte Zone sehr stark behindert. An der Grenzfläche zwischen dem flüssigem Wasser und der Luft wird die Porenatmosphäre durch Verdunstung mit Dampf gesättigt.

In der Hauptphase wird das Wasser dann als Dampf durch Gasdiffusion weiter in das Innere des Buffers transportiert. Die Wasserflussdichten infolge Advektion in der aufgesättigten Zone und infolge Gasdiffusion an der Grenzfläche sind dabei praktisch identisch [48], das heißt, die aufgesättigte Zone breitet sich nicht weiter aus. Das Phänomen der Aufsättigung wird damit ausschließlich durch die Prozesse „Dampfdiffusion“ und „Hydratation“ beschrieben.

Erst in der Auslaufphase findet wieder ein Transport von flüssigem Wasser statt, wenn der ständig abnehmende Dampfstrom kleiner wird als der ebenfalls abnehmende Wasserstrom in der aufgesättigten Zone. Porosität und Permeabilität sind im fortgeschrittenen Stadium der Aufsättigung sehr klein, so dass die Signifikanz der Auslaufphase zur Zeit noch unklar ist.

Ein weiteres Aufsättigungsmodell, das nicht auf dem Transport von flüssigem Wasser im Porenraum beruht, wird in [86] vorgeschlagen. Danach erfolgt der isotherme Wassertransport im Porenraum durch Oberflächendiffusion von Wasser in den elektrischen Doppelschichten an den Außenflächen der Tonpartikel. Zusätzlich findet ein nicht näher bezeichneter, zweiter diffusiver Transport von Wasser von der Partikeloberfläche in die Zwischenschichten der Tonminerale statt.

Qualitativ sind beide Modelle sehr ähnlich, weil sie einen diffusiven Transport im Porenraum unterstellen und einen weiteren kinetischen Prozess für die Aufnahme von Wasser in den Zwischenschichten annehmen. Gegenüber den etablierten THM-Modellen haben sie den Vorteil, dass sie unkomplizierter sind und sehr viel unaufwändiger zu bestimmende Parameter benötigen.

Zur Zeit ist jedoch keines der beiden Modelle ausreichend abgesichert. Die Schlussfolgerungen aus [86] stützen sich auf Vergleiche des Mock-up Experiments bei der Technischen Universität Prag mit dem empirischen Diffusionsmodell. Das in [50] vorgeschlagene Dampfdiffusionsmodell beruht ausschließlich auf isothermen Aufsättigungsversuchen. Beide Modelle sind aber konsistent mit einem Hinweis in [35], dass bei niedrigem Wassergehalt der Dampftransport und bei hohem Wassergehalt der Transport von flüssigem Wasser dominiert⁴.

2.6.3 Weiterführende Arbeiten

Angesichts der aktuellen Diskussion über ein realitätsnahes konzeptuelles Modell der Bentonitaufsättigung ist die Frage nach dem dominierenden Wassertransportprozess von Bedeutung. Dazu sind drei Dinge zu klären:

- die Relevanz des Flüssigkeitstransports im Porenraum,
- die Relevanz des Dampftransports im Porenraum und
- die Relevanz weiterer, bislang nicht berücksichtigter Transportprozesse.

Eine direkte Beantwortung dieser Fragen ist außerordentlich schwierig, da sich die entscheidenden Vorgänge auf submikroskopischer Ebene abspielen. Die Antworten lassen sich aber indirekt aus makroskopischen Beobachtungen ableiten. Nachfolgend wird eine Strategie zur Beantwortung der drei obigen Fragen skizziert.

⁴ Die Begründung für diese Behauptung konnte jedoch nicht ermittelt werden, da die zitierte Originalliteratur in japanisch veröffentlicht ist.

2.6.3.1 Relevanz des Flüssigkeitstransports

Ein Flüssigkeitstransport im Porenraum des Bentonits findet beim Aufsättigungskonzept mit Zweiphasenflussansatz während der gesamten Dauer des Aufsättigungsvorgangs statt. In den alternativen Modellen ist die Flüssigkeitsbewegung dagegen nur in einer kurzen Vorphase von Bedeutung, die die Anfangsbedingungen für die eigentliche, diffusive Wasserausbreitung herstellt.

Das Hauptproblem bei der Einschätzung der Relevanz des Flüssigkeitstransports liegt darin, dass sich Porenwasser und Zwischenschichtwasser in Aufsättigungsexperimenten mit flüssigem Wasser nur schwer unterscheiden lassen. Die Messungen des Wassergehalts liefern lediglich den totalen Wassergehalt, das heißt, die Summe aus beiden Anteilen. Bei teilgesättigten Proben kann man daher nicht unterscheiden, ob sich noch flüssiges Wasser im Porenraum befindet oder ob das Wasser bereits vollständig hydratisiert ist.

Allerdings lassen sich Schlüsse aus der Aufsättigungsgeschwindigkeit ziehen. In der Literatur finden sich einerseits Hinweise darauf, dass die Aufsättigung über flüssiges Wasser sehr schnell stattfindet [84], [85]. Andererseits war die Aufsättigung der 10 cm langen, kompaktierten Bentonitproben im EBS-Projekt nach einem halben Jahr noch nicht abgeschlossen. Wenn die lokale Aufnahme von flüssigem Wasser also tatsächlich eher im Bereich von Minuten als von Tagen anzunehmen ist, dann kann die Aufsättigung nicht über einen so langen Zeitraum hinweg mit einem nennenswerten Transport von flüssigem Wasser im Porenraum verbunden sein.

Aus diesem Grund sollte die Geschwindigkeit der Hydratation von flüssigem Wasser durch ein Experiment demonstriert werden. Dabei reicht ein Beleg der hohen Hydratationsgeschwindigkeit aus. Eine quantitative Bestimmung der Hydratationsrate ist nicht erforderlich.

Darüber hinaus sind Versuche von Interesse, mit denen die Dauer der Vorlaufphase, das heißt der Wasseraufnahme infolge von Kapillarkräften ermittelt wird. und die nach Abschluss dieser Phase vorliegende Wassergehaltsverteilung festgestellt wird. Eine Variation der Temperatur und des Kompaktionsgrads wären bei Letzterem sinnvoll.

2.6.3.2 Relevanz des Dampftransports

Bei Aufsättigungsversuchen mit Wasserdampf ist die Unterscheidung zwischen Poren- und Zwischenschichtwasser erheblich einfacher als bei Versuchen mit flüssigem Wasser. Die Partialdichte von Wasserdampf liegt selbst bei erhöhtem Druck und bei erhöhter Temperatur um Größenordnungen unter der Dichte des hydratisierten Zwischenschichtwassers. Die Messungen des Wassergehalts liefern in diesem Fall eine sehr gute Näherung für die Menge des aufgenommenen Zwischenschichtwassers, so dass der Prozess der Aufsättigung über Wasserdampf experimentell sehr gut quantifizierbar ist.

Eine Strategie für die Untersuchung der Relevanz der Dampfdiffusion könnte also folgendermaßen aussehen: In einem ersten Schritt wird der Aufsättigungsvorgang über Wasserdampf mit einem Modell zu reproduziert, das lediglich die Prozesse „Dampfdiffusion im Porenraum“ und „Hydratation“ berücksichtigt. Dafür wurde im EBS-Projekt eine weitgehend verwendungsfähige Datenbasis geschaffen. Das für erste Simulationsrechnungen erstellte Dampfdiffusionsmodell ist dafür allerdings noch nicht ausgereift genug. Verbesserungspotenzial besteht vor allem im Hinblick auf den Einfluss der Knudsendiffusion und in der Beschreibung der Aufsättigungskinetik.

Im zweiten Schritt werden die Ergebnisse dieses Dampfdiffusionsmodells mit den Ergebnissen der Aufsättigungsversuche mit flüssigem Wasser verglichen. Unter Berücksichtigung der entsprechenden Anfangs- und Randbedingungen zeigt sich dann, ob ein Dampfdiffusionsmodell ausreicht, um die Aufsättigungsexperimente mit flüssigem Wasser zu erklären.

Der dritte Schritt besteht darin, das Dampfdiffusionsmodell für erhöhte Temperaturen und erhöhte hydraulische Drücke zu überprüfen, um die Richtigkeit der Ansätze für endlagerrelevante Bedingungen sicherzustellen. Dabei stehen experimentelle Arbeiten im Vordergrund, die sowohl zur Parameterbestimmung für das Modell als auch zur Messung der Wassergehaltsverteilungen dienen. Wünschenswert im Sinne einer umfassenden Datenbasis ist dabei eine möglichst große Analogie zu den Experimenten im EBS-Projekt.

Parallel dazu lassen es die Ergebnisse des ARTE-Projekts (s. Kap. 2.6.1.5) sinnvoll erscheinen, die Relevanz der Hydratationskinetik im Dampfdiffusionsmodell zu untersuchen. Sollte die Hydratation von Wasserdampf im Vergleich zur Dampfdiffusion im Poren-

raum tatsächlich einen sehr schnellen Prozess darstellen, kann der Vorgang im Modell dahingehend idealisiert werden, dass sich zu jedem Zeitpunkt instantan ein Gleichgewicht zwischen der relativen Luftfeuchtigkeit im Porenraum und dem Wassergehalt der Zwischenschichten einstellt. Die damit einhergehenden Vereinfachungen und Einsparungen bei der Parameterbestimmung und letztlich bei der Rechenzeit wären erheblich.

2.6.3.3 Relevanz weiterer Transportprozesse

Weitere Transportprozesse wären dann zu berücksichtigen, wenn sich im vorangehenden Schritt herausstellen würde, dass die Dampfdiffusion nicht der einzige relevante Wassertransportprozess sein kann. In diesem Fall ist zum Beispiel der Einfluss der Oberflächendiffusion von Wasser zu untersuchen.

Bentonitaufsättigungsmodelle

Kenntnisstand

- Der in den etablierten THM-Modellen verwendete Zweiphasenflussansatz führt zu Unstimmigkeiten im konzeptuellen Modell.
- Bei Kontakt des Bentonits mit flüssigem Wasser ist die Aufsättigung unter Laborbedingungen in erheblichem Maße durch die Dampfdiffusion im Porenraum bestimmt.

Relevanz:

hoch. Die Qualität des konzeptuellen Modells entscheidet über die Übertragbarkeit von Modellparametern auf Aufsättigungsmodelle für physikalisch neue Situationen.

Empfehlungen für weitere FuE

- Messungen zur Aufsättigungsdynamik unter endlagerrelevanten Bedingungen.
- Ermittlung der bedeutsamen Wassertransportprozesse bei der Aufsättigung.
- Erstellung eines abgesicherten konzeptuellen Modells für die Bentonitaufsättigung unter direkter Berücksichtigung der Hydratation.

2.7 Durchlässigkeit von Auflockerungszonen

2.7.1 EDZ-Workshop

Vom 3. bis 5. November 2003 wurde in Luxemburg ein Workshop zu dem Thema „Impact of the Excavation Disturbed or Damaged Zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories“ veranstaltet. Organisatoren waren die Europäische Kom-

mission und ESV EURIDICE GIE/Belgien. Der Workshop wurde gesponsert von den folgenden Institutionen: ANDRA, ENRESA, GRS, NAGRA, NIRAS/ONDRAF, POSIVA, SCK/CEN und SKB.

Das generelle Ziel des Workshops bestand darin, Experten zusammen zu führen, um den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik bezüglich der Entwicklung und Charakterisierung von Auflockerungszonen in Endlagern für radioaktive Abfälle in den drei Wirtsgesteinsformationen Ton, kristalline Gesteine und Salz zu diskutieren sowie ihre Bedeutung für das Gesamt-Endlagerverhalten abzuschätzen.

Der Workshop wurde am ersten Tag in Form einer Plenarversammlung mit einführenden Übersichtsvorträgen begonnen. Am Abend des ersten Tages schloss sich eine Posterpräsentation mit Beiträgen vieler Europäischer Forschungsinstitutionen an. Am zweiten Tag wurden Fachdiskussionen in wirtsgesteinsspezifischen Arbeitsgruppen geführt. Die Ergebnisse der Arbeitsgruppen wurden am Abend des Tages von den Chairmen der Arbeitsgruppen zusammen mit einem von den Veranstaltern und Sponsoren benannten Berichterstatter zusammengefasst. Die Zusammenfassungen wurden den Workshopteilnehmern schließlich am dritten Tag des Workshops im Plenum präsentiert und in einer Zusammenschau abschließend diskutiert.

Der Berichterstatter jeder Arbeitsgruppe hat später im Nachgang zum Workshop einen kurz gefassten wirtsgesteinsspezifischen schriftlichen Beitrag für den zusammenschauenden Workshopbericht erstellt. Der Gesamt-Workshopbericht wurde vom General Chairman des Workshops, Prof. Chin-Fu Tsang/LBNL zusammengestellt und ist in einem EU-Bericht veröffentlicht worden [16].

Die wesentlichen Ergebnisse der Salz-Arbeitsgruppe, an der von deutscher Seite BfS, BGR, DBE, FZK-INE, GRS, IfG, PtWT+E, TUC und von französischer Seite École Polytechnique/G.3S beteiligt waren, werden nachfolgend beschrieben, wobei die Untergliederung von den Organisatoren vorgegeben war.

2.7.1.1 Was ist die EDZ:

Die *Excavation Disturbed Zone (EDZ)* ist charakterisiert durch eine Änderung des Spannungszustandes im Vergleich zum Anfangszustand. Ihre äußere Grenze ist nicht eindeutig. Im Inneren der gestörten Zone am Rand eines Hohlraums existiert eine Zone mit Mikrorissen, die zu einer signifikanten Änderung der mechanischen und hydraulischen Gebirgseigenschaften führen.

2.7.1.2 Was führt zur Entstehung der EDZ und welche Vorgänge bestimmen ihre Entwicklung

Im Gegensatz zu kristallinen Gesteinen, wie z. B. Granit, wird das Deformationsverhalten von Steinsalz vorrangig durch sein viskoplastisches Verhalten bestimmt. Steinsalz reagiert auf Spannungsänderungen durch Kriechen, wodurch deviatorische Spannungen am Hohlraumrand reduziert werden. Die Entstehung von Makrorissen ist somit praktisch ausgeschlossen. Andererseits entsteht eine Zone mit Mikrorissen, welche von einigen Dezimetern bis zu zwei Metern in das Gebirge hinein reicht. Mikrorissbildung tritt ein, wenn im Spannungsraum die Dilatanzgrenze überschritten wird. Je näher sich der Spannungszustand an der Versagensgrenze befindet, je schneller erfolgt die Schädigung des Gesteins. Unterhalb der Dilatanzgrenze findet nur Kompaktion statt.

2.7.1.3 Wie entwickelt sich die EDZ

Die Entwicklung der EDZ ist stark abhängig von der Hohlraumgeometrie, den Gebirgseigenschaften, der Auffahrtechnik, der Bewetterung, der thermischen Belastung, sowie von Versatzmaßnahmen.

In einem fachgerecht ausgelegten Endlager werden alle Hohlräume zu einer gesamt gestörten Zone mit gestörtem Spannungsfeld beitragen. Die Hohlräume können allerdings soweit voneinander entfernt errichtet werden, dass eine Überlappung ihrer EDZ vermieden wird.

Nach Betriebsende, wenn das Endlager komplett verfüllt und verschlossen ist, wird die EDZ ihre größte Ausdehnung erreicht haben. Infolge der Hohlraumkonvergenz und Versatzkonsolidierung wird sich der Spannungszustand nun wieder auf einen Zustand un-

terhalb der Dilatanzgrenze entwickeln. Wenn dieser Zustand erreicht ist, wird die EDZ im gesamten Endlager reduziert. In dieser Periode wird es keine Mikrorissbildung mehr geben und die Verheilung des Gebirges wird voranschreiten.

2.7.1.4 Einfluss der EDZ auf Endlagerverhalten und –sicherheit

Die Bedeutung der EDZ in der Betriebsphase ist gering. In der Nachbetriebsphase kommt ihr jedoch eine höhere Bedeutung zu, da sie die Wirksamkeit von Strecken- und Schachtverschlüssen maßgeblich bestimmt. Bei Untersuchungen im Forschungsbergwerk Asse wurde herausgefunden, dass die Fuge zwischen einem Dammbauwerk und dem Gebirge die schwächste Zone im Dichtsystem darstellt. Hier kann die Permeabilität um zwei Größenordnungen über der des intakten Gebirges liegen. Es wird gefolgert, dass diese Fuge einer speziellen Behandlung unterzogen werden muss, um die Langzeit-Dichtwirkung des Systems sicher zu stellen.

Gaserzeugung und –migration im Versatz kann einen Einfluss auf größere Teile des Endlagers haben. Zwar wird durch die Gasmigration das Risiko der Bildung höherer Gasdrücke minimiert und die Gasdruckverteilung vergleichmäßigt, aber die Installation effektiver Dichtsysteme und die Verheilung der EDZ führen zu einer Abtrennung von Endlagerbereichen mit verminderter Gasmigration. Die Entscheidung zur Bildung von abgeschlossenen Endlagerbereichen bei der Endlagerauslegung kann daher eine Bedeutung für die Langzeitsicherheitsanalyse haben.

Ein Phänomen, das bei allen In-situ-Heizversuchen beobachtet wurde, ist die Bildung von Abkühlrissen nach Beendigung der Versuche. Es ist nicht vollständig auszuschließen, dass Abkühlrisse auch in der Nähe von HLW-Einlagerungsfeldern im Endlager entstehen können. Die Verschlussysteme eines Endlagers können aber so weit von den Einlagerungsfeldern entfernt errichtet werden, dass diese Rissbildung für ihre Dichtwirkung ohne Bedeutung ist.

2.7.2 Zusammenfassung des gegenwärtigen Wissens / Unsicherheiten

Detailliertere Forschungsarbeiten zur EDZ-Entwicklung wurden vor etwa einem Jahrzehnt begonnen. Im Nachgang zu Laboruntersuchungen der Dilatanz sowie der damit verbundenen Erhöhung von Porosität und Permeabilität wurden In-situ-Untersuchungen

zur Bestimmung von Ausdehnung und Entwicklung durchgeführt. Basierend auf zahlreichen Labordaten wurden Dilatanzfunktionen und Permeabilitäts-Porositätsrelationen von verschiedenen Wissenschaftlern veröffentlicht. Die vielen verfügbaren In-situ- und Labordaten werden verwendet, um die Vorhersagegenauigkeit von numerischen Modellen zu bewerten. Felduntersuchungen zeigen, dass die EDZ gewöhnlich 0,5 bis 1,5 m in das Gebirge hineinreicht. Die EDZ entwickelt sich unmittelbar im Anschluss an die Hohlraum-auffahrung in einer relativ kurzen Zeitspanne von wenigen Monaten. Eine weitergehende langfristige Entwicklung ist vergleichsweise gering. Nach der Installation von Verschluss-systemen verkleinert sich die EDZ infolge anhaltender Konvergenz des viskoplastischen Gesteins. Untersuchungen in der Umgebung eines alten Dammjochs in der Asse zeigen eine deutliche Reduktion der EDZ-Ausdehnung innerhalb von 90 Jahren, eine vollständige Verheilung wurde allerdings in dieser Zeitspanne nicht erreicht. Konstitutive Modelle zur Vorhersage von Schädigung, Dilatanz und Permeabilitätsverteilungen in der Umgebung von Endlagerstrecken wurden in jüngerer Zeit entwickelt. Erste Ergebnisse numerischer Simulationen von In-situ-Experimenten/Analoga sind erfolversprechend.

Die vollständige Verheilung der EDZ in der Umgebung der TSS-Versuchsstrecken in der Asse innerhalb der neunjährigen Heizdauer wurde bisher allerdings in allen Modell deutlich unterschätzt. Zur Verbesserung der Modelle in dieser Hinsicht besteht also noch erheblicher Forschungsbedarf. Weitere Untersuchungen zur EDZ-Charakterisierung vorzugsweise in der Umgebung von Hohlräumen unterschiedlichen Alters, Größe und Form wären hierfür nützlich. Auch Messungen in der Umgebung installierter Verschluss-systeme (Dämme) wären zur Bewertung numerischer Ergebnisse sinnvoll, da nur über „natürliche oder technische Analoga“ validierte Modelle eine zuverlässige Analyse der Langzeitentwicklung der EDZ gestatten und damit eine vertrauenswürdige Einschätzung der Notwendigkeit ihrer Berücksichtigung in Langzeitsicherheitsanalysen ermöglichen.

Der Wissensstand zur EDZ im Salz nimmt zu und hat in den letzten Jahren deutlich von der internationalen Zusammenarbeit profitiert. Konstitutive Modelle der Schädigungsentwicklung sowie der (angenommenen) Rückbildung sind vielversprechend. Um das Schädigungsmodell für Sicherheitsanalysen weiter zu entwickeln, müssen weitere Entwicklungsarbeiten zur Berücksichtigung von Anisotropie und der Verknüpfung von Schädigung und Permeabilität noch erfolgen.

2.8 Aktualisierte Modellrechnungen zu huminstoffgetragem Transport

Während der Projektlaufzeit wurden weitere Modellrechnungen zu neuen Europium-Humat-Migrationsexperimenten durchgeführt. Die Ergebnisse der Modellrechnungen wurden ausführlich in [75] beschrieben und auf dem GeoTrap-Workshop vorgestellt [74].

Die neuen Simulationsrechnungen für die Versuche an fünf verschiedenen nichtbindigen Sedimenten bestätigen die Ergebnisse aus vorangegangenen Untersuchungen an einem sandigen Sediment aus dem Raum Gorleben [58]. Mit Ausnahme der Sorptionswerte von Eu an der Matrix und der Desorptionsraten, die aus den Simulationsrechnungen ermittelt wurden, wurden die in den vorangegangenen Untersuchungen verwendeten Eingangsparameter auch hier verwendet, da in allen Experimenten das gleiche Grundwasser verwendet wurde. Die Sorptionswerte von Eu an der Sedimentmatrix wurden aus neuen Batch-Experimenten an den jeweiligen Sedimenten abgeleitet. Für alle Säulenexperimente wurde eine gute Übereinstimmung zwischen simulierter und experimenteller Durchgangskurve erhalten. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen.

- Die Migration des Europium-Tracers verläuft im wesentlichen kolloidgetragen ohne signifikante Rückhaltung durch die Säule.
- Die Wiedererhaltung ergibt sich aufgrund der Desorption des Europiums von den Kolloiden mit anschließender Sorption an die Matrix. Ein Beitrag durch irreversible Filtration kolloider Partikel, die die gleiche Auswirkung auf die simulierte Kurve hat, kann nicht ausgeschlossen werden.
- Die Desorptionsraten des Europiums von den Kolloiden nehmen in Abhängigkeit der Transportzeit exponentiell ab. Der Verlauf der effektiven Desorptionsrate als Funktion der Transportzeit ist in Abbildung 2.11 dargestellt. Die in den neuen Rechnungen für die Sedimente 1 bis 5 ermittelten Raten zeigen eine gute Übereinstimmung mit den aus früheren Modellrechnungen ermittelten Raten.
- Reversible Kolloid-Matrix-Wechselwirkungen erklären das in allen Experimenten beobachtete Tailing. Mit der Annahme eines konstanten Verhältnisses zwischen mobiler und immobilisierter Schadstoffkonzentration können die Experimente an allen fünf Se-

dimenten zufriedenstellend simuliert werden. Die Raten, mit der die Kolloide an die Matrix gelangen, nehmen mit zunehmender Darcy-Geschwindigkeit zu und liegen in der Größenordnung, die aus theoretischen Ansätzen berechnet wird [74].

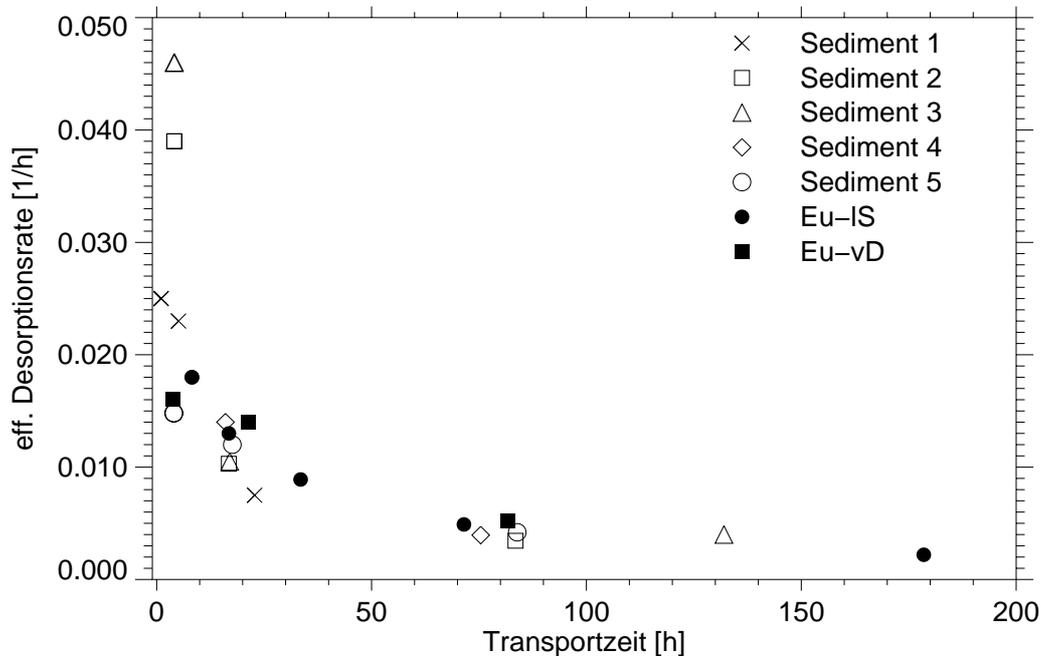


Abb. 2.11: Effektive Desorptionsraten in Abhängigkeit der Transportzeit. Die ausgefüllten Symbole zeigen die Ergebnisse vorangegangener Modellrechnungen an 50 cm langen Säulen (Eu-vD) und an einer 10 m langen Säule (Eu-IS)

Um die Ergebnisse auf längere Transportwege und größere Zeiten extrapolieren zu können, ist insbesondere noch der Mechanismus der Desorption aufzuklären. Arbeiten dazu und zur Wechselwirkung von Kolloiden mit der Sedimentmatrix werden u. a. vom Institut für Nukleare Entsorgung des FZK, Institut für Radiochemie des Forschungszentrum Rossendorf, Institut für Anorganische und analytische Chemie und Radiochemie der Universität des Saarlands, Institut für Kernchemie der Universität Mainz und dem Institut für Interdisziplinäre Isotopenforschung Leipzig durchgeführt (z.B. [60]). Zum jetzigen Zeitpunkt ist noch unklar, ob ein gewisser Anteil von Actiniden - bezogen auf Transportzeiten von einigen 1000 Jahren - irreversibel an Kolloide gebunden bleibt. Dies hätte Einfluss auf die Dosisrelevanz von Actiniden in Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager mit radioaktiven Abfällen.

2.9 Feldstudien zur Schadstoffausbreitung in großen Modellgebieten

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden Studien gesichtet und zusammengestellt, in denen eine Schadstoffausbreitung in großräumigen Modellgebieten untersucht und detailliert beschrieben wurde. Hintergrund ist die Erprobung des neuentwickelten Rechencodes r^3t [21], der hinsichtlich des Transports in großräumigen, komplexen Modellgebieten erprobt werden soll. Dabei sollen 2D- und 3D-Rechnungen durchgeführt werden und mit Ergebnissen der Modellrechnungen anderer Institutionen insbesondere aber mit Felddaten verglichen werden. Als Ergebnis der Analyse vieler Feldstudien wurden vier Studien identifiziert, für die in einem zukünftigen Projekt eine Modellierung mit r^3t durchgeführt werden soll. Diese Studien werden im folgenden kurz beschrieben.

2.9.1 Transport von Chlorid und Kalium im Gebiet der Insel Langeoog

Überwachung und Schutz der Wasserqualität in Süßwasserlinsen stellen für die meisten Inseln einen wesentlichen Bestandteil der öffentlichen Daseinsvorsorge dar. Daher wird in den letzten Jahren verstärkt versucht, durch Modellrechnungen das Verhalten von Süßwasserlinsen besser zu verstehen. So wird derzeit am Institut für Geowissenschaften der TU Braunschweig ein Strukturmodell des Grundwasserleiters der ostfriesischen Insel Langeoog erstellt. Messdaten zur chemischen Zusammensetzung des Grundwassers liegen ebenfalls vor [79].

Das Modellgebiet umfasst einen Ausschnitt der Insel mit Abmessungen von etwa 2.5 km x 2.5 km x 75 m. Es besteht aus vier Schichten, deren Permeabilitäten über mehrere Größenordnungen variieren. Die Grundwasserströmung unterliegt einem relevanten Dichteinfluss.

Hier ist es möglich, zuerst mit dem Programmpaket d^3f die Entstehung der Süßwasserlinse zu modellieren. Als Ergebnis des d^3f -Modells liegt dann ein stationäres Geschwindigkeitsfeld und die ebenfalls stationäre Konzentrationsverteilung von NaCl für den Fall der vollständig ausgeprägten Süßwasserlinse vor. Im Anschluss daran kann mit dem Transportprogramm r^3t der Transport von Chlorid als idealem Tracer und von Kalium als schwach sorbierendem Tracer berechnet werden.

Ausgehend vom Zustand einer vollständig ausgeprägten Süßwasserlinse können weitere Szenarien für den Chlorid- und Kaliumtransport betrachtet werden. Hierzu gehören z.B. eine Salzwasserintrusion durch erhöhte Wasserentnahme sowie ein Salzeintrag durch Wasser der Nordsee bei einer Überflutung.

2.9.2 Transport von Radionukliden im Grundwassermessfeld Krauthausen

Das Testfeld Krauthausen befindet sich in der südlichen Niederrheinischen Bucht, etwa 7 km südwestlich von Jülich. Es wird vom FZ Jülich zur Untersuchung der Ausbreitung ausgewählter Tracer genutzt [18], [111].

Der untersuchte Aquifer besitzt eine Ausdehnung von etwa 200 m x 70 m. Er besteht aus drei Schichten mit verschiedenen hydraulischen Durchlässigkeiten und unterschiedlichem Tongehalt. Seine Basis bilden dünne Ton- und Schluffschichten in einer Tiefe von 11 m bis 13 m. Es stehen Daten aus mehr als 100 Bohrungen zur Verfügung. Das Gebiet ist hydrogeologisch sehr gut charakterisiert. Es wurden hydraulische Leitfähigkeiten, lokale Darcy-Geschwindigkeiten und Porositäten gemessen.

Die dort betrachteten Tracerexperimente wurden mit dem idealen Tracer Bromid und den reaktiven Tracern Uranin und Lithium durchgeführt. Uranin und Lithium wurden dabei gleichzeitig über drei nebeneinander liegende Einleitbohrungen über einen Zeitraum von 5 Stunden in einer Tiefe von 6-7 m in den Aquifer injiziert. Mit dem Bromid wurde zu einem späteren Zeitpunkt auf dieselbe Weise verfahren, diesmal über einen Zeitraum von 11 Stunden. Die Einleitkonzentrationen sind bekannt. Die Ausbreitung der Tracer wurde über einen Zeitraum von 449 bzw. 398 Tagen beobachtet.

Bei der Ausbreitung von Uranin und Lithium wurde eine signifikante Rückhaltung festgestellt, die mit abnehmender Stoffkonzentration zunahm und entsprechend mit einer Freundlich-Isotherme beschrieben werden kann. Die Parameter der Freundlich-Isotherme wurden vom FZ Jülich aus Batch-Experimenten abgeleitet. Das Sorptionsverhalten von Uranin und Lithium hängt zusätzlich vom Tonanteil des Bodenmaterials ab. Daher unterscheiden sich die Sorptionsparameter in den drei verschiedenen Sedimentschichten.

Diese Feldstudie bietet die Möglichkeit die Auswirkungen der räumlichen Heterogenität eines Aquifers zu untersuchen und insbesondere die Modellierung der nichtlinearen Sorption in r^3t abzusichern.

2.9.3 Transport von Uran, Nickel und Eisen im ehemaligen ostthüringischen Uranbergbaugebiet Ronneburg

Im ostthüringischen Uranbergbaurevier wurden von 1952-1990 in Schächten mit einer Teufe von bis zu 940 m ca. 113 000 t Uran abgebaut. Das Gebirge ist in diesem Bereich flächendeckend durch Bohrungen erkundet. Im ehemaligen Ronneburger Revier befindet sich ein etwa 70 km² großer Grundwasser-Absenktrichter. Im Bereich dieses Trichters existieren eine Vielzahl von Schächten und mehrere Abraumhalden.

Im Rahmen der Sanierungstätigkeit der Wismut GmbH werden die Gruben in diesem Revier seit Anfang 1998 geflutet. Nach Abschluss der Flutung wird ein Schadstoffeintrag aus den Grubenwässern und aus den Haldensickerwässern in derzeit noch entwässerte Grundwasserleiter erwartet. Es liegen Messungen zum Uran-, Radium-, Eisen- und Nickelgehalt der Grubenwässer vor, so dass die Quellen für den Schadstoffeintrag quantifiziert werden können [24].

Zu den durch die Grundwasserabsenkung trockengefallenen Bereichen zählen unter anderem auch Teile des östlichen Gessentales, das sich im Bereich des Absenktrichters von Südosten nach Nordwesten erstreckt. Nach der Flutung der Grube und der Wiederauffüllung des Absenktrichters wird eine Entwässerung des Ronneburger Reviers von Südosten her in dieses Tal hinein erwartet. Daher wurden im Gessental in den 90er Jahren umfangreiche hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen betrieben. Der Aquifer besteht hauptsächlich aus quartären Lockersedimenten. Für diese Sedimente wurden k_f -Werte bestimmt. Es wurden auch Säulenexperimente zur Bestimmung der Dispersionsparameter durchgeführt. Batch- und Säulenexperimente zur Untersuchung der Sorption der drei Elemente Uran, Nickel und Eisen an ausgewählten Sedimenten des Aquifers sind derzeit noch in Arbeit.

Am Institut für Geowissenschaften der Universität Jena liegt umfangreiches Datenmaterial zur Hydrogeologie des östlichen Gessentales vor. Dort wurde bereits ein hydrogeologisches Modell erstellt. Davon ausgehend ist ein Grundwasserströmungsmodell des Gebietes zu erarbeiten. Das Modell wird von der Größenordnung 1.5 km x 0.5 km x 20 m

sein und aus vier Schichten bestehen, deren Durchlässigkeiten sich um etwa eine Größenordnung unterscheiden. Für die Grundwasserstände können die aus der Zeit vor der Bergbautätigkeit bekannten Werte angenommen werden. Die Strömungsverhältnisse nach der Flutung der Grube werden simuliert. Die Grundwasserströmung unterliegt keinem relevanten Dichteeinfluss.

Der Eintrag der Radionuklide U-238, U-234, Th-230, Ra-226 und der Elemente Fe und Ni wird durch die Angabe einer Randbedingung für die Konzentration des jeweiligen Nuklids auf dem Einstromrand im Südosten des Modellgebietes modelliert. Die Modellierung des Sorptionsverhaltens der einzelnen Stoffe wird auf der Grundlage der Ergebnisse der Batch- und Säulenexperimente erfolgen. Aus den bisher durchgeführten Experimenten lässt sich ableiten, dass sich die Sorptionsparameter für die verschiedenen Sedimentschichten unterscheiden. An diesem Standort soll die zeitliche Entwicklung der Schadstoffverteilung für die Zeit nach der Flutung prognostiziert werden. Die Modellierung erfolgt über Zeiträume der Größenordnung von 10 000-100 000 Jahren.

2.9.4 Transport von Zink im Bereich Cape Cod, Massachusetts

Schadstoffaustritte aus den Becken einer Abwasseraufbereitungsanlage in Cape Cod, Massachusetts, verursachten fast 60 Jahre lang die Verunreinigung eines oberflächennahen Aquifers [43]. Erst im Dezember 1995 wurde der Schadstoffeintrag durch die Inbetriebnahme einer neuen Anlage beendet. Die zeitliche und räumliche Ausbreitung der Schadstofffahne ist durch ein dichtes Netz von Messpunkten bekannt. Im Gegensatz zu den nichtreaktiven Bestandteilen der Ausbreitungswolke, die noch in 5 500 m Entfernung zur Quelle und in einer Tiefe bis zu 30 m aufgefunden wurden, konnte der Schadstoff Zink nur bis zu einer Entfernung von etwa 400 m und auch nur in einem 2-4 m mächtigen Bereich an der Oberfläche der Wolke nachgewiesen werden. In den tieferliegenden Bereichen hatte sich der Schadstoff weniger als 100 m von der Quelle fortbewegt. Zudem drang er nur bis zu 15 m tief in den Aquifer ein. Diese unterschiedliche und räumlich begrenzte Ausbreitung wird auf pH-Wert-abhängige Sorptionsvorgänge zurückgeführt.

Das untersuchte Gebiet ist 600 m lang und etwa 15 m tief. Der Aquifer ist weitgehend homogen und besteht aus Grobsand und Kies. Das Grundwasser strömt horizontal, Richtung und Geschwindigkeit sind aus Messungen bekannt. Das Strömungsmodell wird anhand der Messwerte kalibriert. Ein Übersichtsbild mit der Schadstofffahne ist in Abb. 2.12: dargestellt.

Der Schadstoffeintrag wird als eine Konzentrationsrandbedingung für das Zink über den gesamten Querschnitt auf dem Einstromrand des Modellgebietes modelliert. Die hierfür benutzten Werte basieren auf den unterhalb der Abwasserbecken gemessenen Zink-Konzentrationen. Der Transport von Zink soll unter Berücksichtigung der Grundwasserströmung und der Rückhaltung durch Gleichgewichtssorption modelliert werden.

Das Sorptionsverhalten des Zink ist stark abhängig vom pH-Wert, der im Modellgebiet räumlich und zeitlich variiert. Im gesamten Modellgebiet nimmt der pH-Wert mit der Tiefe zu. Von etwa pH 5.6 an der Oberfläche steigt er bis auf etwa pH 6.6 in 15 m Tiefe. In den tiefergelegenen Bereichen steigt er zusätzlich mit zunehmender Entfernung von der Schadstoffquelle an. Die geringeren pH-Werte im oberflächennahen Bereich werden auf den Einfluss der Grundwasserneubildung zurückgeführt. Die Zink-Sorption ist bei niedrigen pH-Werten schwächer als bei höheren. Dies erklärt die stärkere Ausbreitung des Stoffes im oberflächennahen Bereich.

Dieser Standort eröffnet die Möglichkeit die Abhängigkeit der Sorption von der Konzentration anderer Agenzien zu erproben. Für die Rechnungen mit r^3t kann der pH-Wert durch das Agenz H^+ modelliert werden, für das eine tiefenabhängige Konzentrationsrandbedingung auf dem Einstromrand vorgegeben wird. Die niedrigeren pH-Werte im oberflächennahen Bereich werden zusätzlich dadurch bedingt, dass dem versickernden Niederschlagswasser eine entsprechend erhöhte Konzentration des H^+ aufgeprägt wird. Der K_d -Wert für das Zink kann dann durch eine Funktion der H^+ -Konzentration im Modellgebiet abgebildet werden.

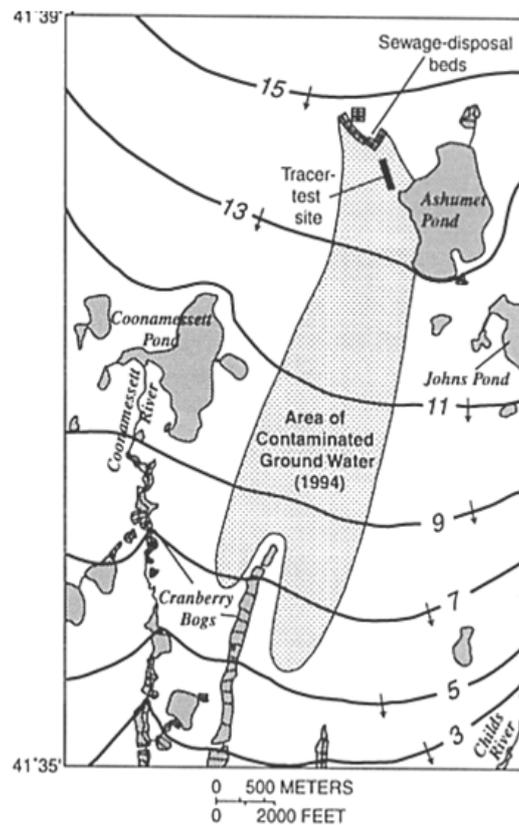


Abb. 2.12: Schadstoffahne am Standort Cape Cod [43]

2.10 Klimatische Veränderungen

Ein wichtiges Ergebnis der Arbeitsgruppe AKEnd ist, dass auch extreme klimatische Bedingungen wie z.B. Eiszeiten in der Zukunft die Integrität der Endlager nicht beeinträchtigen dürfen [1]. In bisherigen deutschen Langzeitsicherheitsanalysen sind die Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die Entwicklung des Endlagersystems bisher nicht berücksichtigt wurden. In [76] wurden einige Langzeitsicherheitsanalysen anderer Länder im Hinblick auf die Berücksichtigung klimatischer Veränderungen gesichtet. Basierend auf diesen Arbeiten wurden hier Arbeiten zusammengestellt, die sich mit Klimaprognosen über lange Zeiträume befassen. Weiterhin wurden in einem ersten Schritt mögliche Auswirkungen dieser Veränderungen auf Fernfeld und Biosphäre eines Endlagers diskutiert.

2.10.1 Klimaprognose über lange Zeiträume

Das Klima der Erde ist erheblichen Schwankungen unterworfen, die sich in der Ausprägung von Zeiten extremer Klimata bemerkbar machen. Die Wechsel gehen in unterschiedlicher Geschwindigkeit vonstatten. Der Übergang von einer Warm- zu einer Kaltzeit dauerte bisher zwischen 3 000 und 5 000 Jahre [102]. Als Kaltzeit werden Zeiträume definiert, in denen die globale Durchschnittstemperatur 3 bis 6 °C unter der heutigen und damit bei 10 bis 13 °C liegt. Sie ist geprägt durch die Ausbildung von Glazial- und Periglazialgebieten. Die grundlegenden Ursachen eines Klimawechsels sind weitgehend bekannt. Vielfältige Faktoren spielen dabei eine Rolle, deren Zusammenwirken und gegenseitige Beeinflussung jedoch auch heute nur ansatzweise geklärt sind. So ist das Klima vor allem Resultat der Plattentektonik sowie der Periodizitäten der Erdbahnparameter [90]. Zu letzteren gehören die Exzentrizität der Erdbahn mit einem Zyklus von etwa 100 000 Jahren, die Ekliptikschiefe mit etwa 40 000 Jahren sowie die Wanderung des Perihel mit etwa 26 000 Jahren [45]. Untersuchungen haben ergeben, dass mindestens 50 % der Temperaturschwankungen im Quartär als Folge astronomischer Effekte und der durch sie bedingten Klimaänderungen verursacht wurden [76]. Die Auswirkungen auf den Wasserkreislauf spielen eine Schlüsselrolle in der Klimaentwicklung. So gehört Wasserdampf neben Kohlendioxid zu den wichtigsten Treibhausgasen. Eis- und Schneeflächen besitzen die Oberfläche mit der höchsten Albedo - Altschnee mit 40 bis 70 %, Neuschnee mit 75 bis 95 %. Zudem wird die Zirkulation in den Ozeanen durch den Süßwassereintrag in die Ozeane beeinflusst. Maßgeblich dafür sind die Niederschlagshöhe, -verteilung und der Anteil des Oberflächenabflusses sowie die Abschmelzvorgänge an den Gletschern. Alle klimarelevanten Prozesse sind in hohem Maße nicht-linear und daher schwer zu erfassen [27]. Dies bezieht sich vor allem auf die komplexen Rückkopplungseffekte zwischen Atmosphäre, Ozean, Kryosphäre und Festland.

Aus den bisherigen Studien der Paläoklimatologie lassen sich jedoch gewisse Regelmäßigkeiten für die langfristige Klimaentwicklung folgern. Zusätzlich geben Klimamodellrechnungen, wie sie beispielsweise im Projekt Bioclim durchgeführt wurden, Aufschluss über die nächsten 200 000 Jahre [9].

Tabelle 2.10 zeigt eine Übersicht über die wesentlichen Prozesse, die das Klima beeinflussen, und die Zeitskala, auf der diese Prozesse wirksam werden. Für Sicherheitsanalysen sind Zeiträume bis zu 1 Millionen Jahre von Bedeutung. Entsprechend wurden im

EU-Projekt Bioclim nur diejenigen Prozesse berücksichtigt, die innerhalb dieses Zeitraums wirksam werden. Ebenso wurden Prozesse, die innerhalb einer sehr kurzen Zeitspanne ablaufen, nicht berücksichtigt.

Tab. 2.10 Wichtige Faktoren für die Klimaausbildung, Zeitraum über den sie wirksam sind und Berücksichtigung bei der Modellierung zur Studie BIOCLIM [8]

Zeitskala [Jahre]	10 ⁻¹	10 ⁰	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸	10 ⁹	Modell
Galaktischer Stäube												Nein
Erdbahnparame- ter												Ja
Sonnenaktivität												Nein
Plattentektonik und Polwanderung												Nein
Isostasie												Ja
Staub und Aero- sole in der Atmos- phäre												Ja
Ozeanzirkulation												Ja
Atmosphäre- Meer-Eis-Land Rückkopplungsef- fekte												Ja

Aus der Rekonstruktion des Klimas im Quartär mit dem Verlauf der vier großen Eiszeiten und der bis in das Tertiär zurück zu verfolgenden Abkühlungsgeschichte der Erde lässt sich die verlässliche Aussage ableiten, dass der gegenwärtigen Warmzeit trotz Treibhauseffekt auch wieder eine Abkühlung folgen wird. Das gegenwärtige Klima entspricht daher einem Interglazial [98]. Dieses bestätigen auch holozäne Pollenanalysen, die eine ähnliche Abfolge zeigen wie in früheren Warmzeiten [39]. Zudem herrschten lediglich während 5 % der vergangenen 425 000 Jahre so hohe Temperaturen, wie sie gegenwärtig auf der Erde bestehen. Dieses wird in Abbildung 2.13 verdeutlicht. Aus $\delta^{18}\text{O}$ -Analysen in Tiefseesedimenten lässt sich folgern, dass etwa während 90 % der genannten Zeitspanne kaltzeitliche Bedingungen auf der Erde herrschten.

Die Tatsache, dass über die letzten 15 000 Jahre, die der Zeitspanne einer Interglazialzeit entsprechen, recht gleichmäßige Witterungsverhältnisse herrschten, zeigt, wie außergewöhnlich das heutige Klima der Erde ist. Aus Sicht der Paläoklimatologen kann dieses Klima nur von relativ kurzer Dauer sein [39].

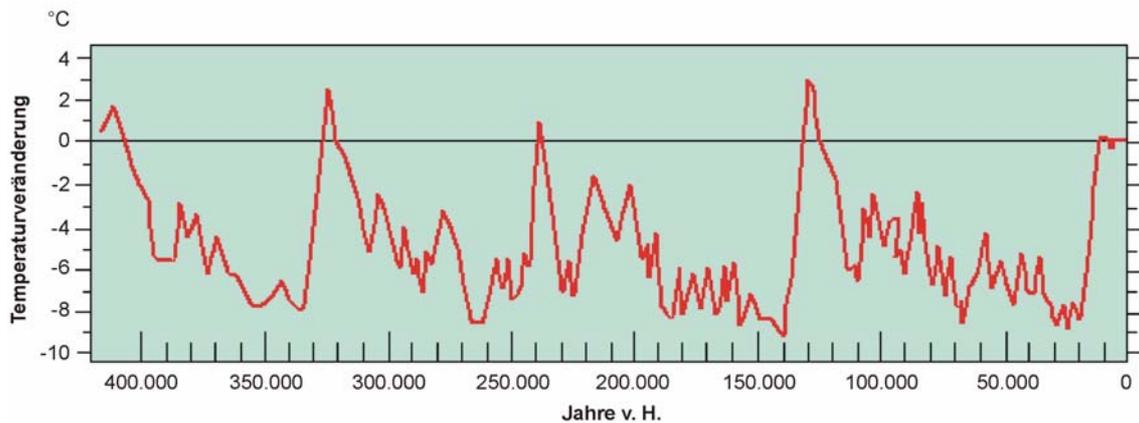


Abb. 2.13: Relative Temperaturveränderung der Erde in den letzten 420 000 Jahren nach [80]

Die gegenwärtige Warmzeit begann vor etwa 11 500 Jahren. Die bisher höchsten Temperaturen in dieser Zeit gab es im frühen Holozän vor ca. 8 000 bis 6 000 Jahren und damit etwa 3 000 Jahre nach dem Ende des letzten Glazials. Dieser im Verlauf der Klimageschichte relativ warme Zeitraum wird auch als Klimaoptimum bezeichnet. Seitdem wurde es unter kurzzeitigen Schwankungen kühler. Dies zeigt sich an insgesamt etwa zehn kleineren Eisvorstößen, die jeweils etwa 600 bis 900 Jahre andauerten. Die Klimaschwankungen waren somit viel häufiger als es die „klassischen“ vier Eiszeiten andeuten. Der große und noch anhaltende Temperaturanstieg im Holozän wird mit der seit der Industrialisierung vor ca. 150 Jahren ansteigenden CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre in Verbindung gebracht. Die holozänen Klimaschwankungen sind in Abbildung 2.14 anhand der absoluten Temperaturen der Erde dargestellt.

Die Meinungen über den Beginn der nächsten Kaltzeit gehen stark auseinander. Es werden auf der Grundlage von zwei verschiedenen Ansätzen Klimaprognosen erstellt: Im ersten Ansatz wird das künftige Klima allein aus den bisher zusammengetragenen Paläodaten und astronomischen Veränderungen abgeleitet. Der zweite Ansatz berechnet die künftige Klimaentwicklung mit Hilfe komplexer Klimamodelle. Die Ansätze unterscheiden sich im Hinblick auf die Vorhersage des neuerlichen Klimaoptimums sowie des Eintritts-

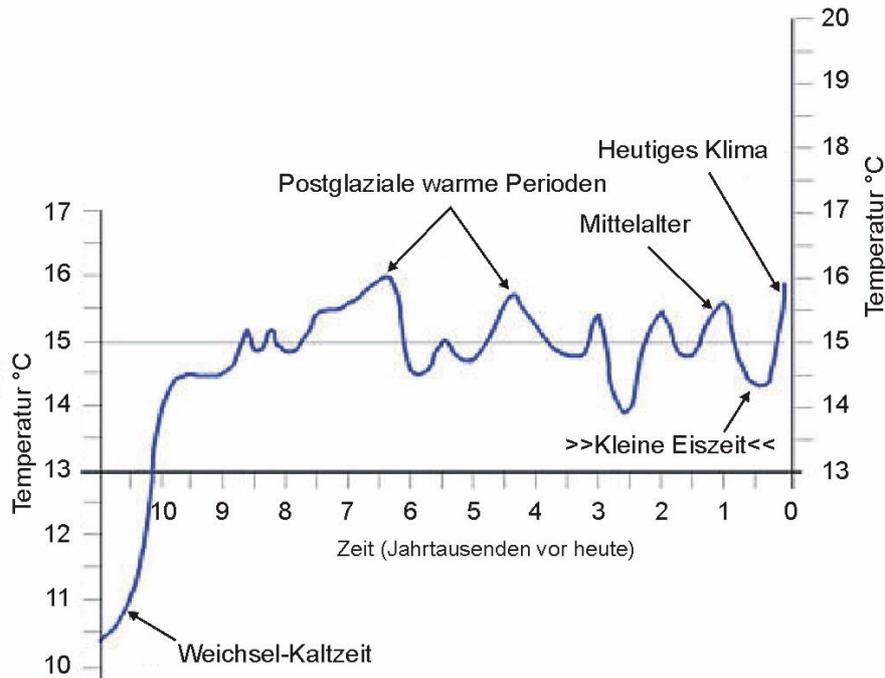


Abb. 2.14: Die absoluten Temperaturen der Erde während des Holozäns (verändert nach [96])

zeitpunkts des nächsten Glazials erheblich voneinander. Es besteht jedoch kein Zweifel daran, dass die momentan anhaltende Warmzeit ein Interglazial darstellt, dass anthropogen durch Treibhausgase verstärkt bzw. verlängert wird und die globalen Durchschnittstemperaturen noch um 1,5 bis 6 °C ansteigen lässt [34]. Nach dem Aufbrauch der fossilen Brennstoffe wird eine Fortsetzung der durch die Effekte der Treibhausgase unterbrochenen Abkühlung erwartet, die zum nächsten Glazial überleitet.

Emiliani ist ein Vertreter des ersten Ansatzes [39]. Er erkannte aufgrund von Sauerstoff-Isotopen-Analysen in Tiefseebohrkernen eine erstaunliche Regelmäßigkeit zwischen den bisherigen interglazialen Maxima und glazialen Minima, obwohl es in der Zwischenzeit häufig zu kurzfristigen Temperaturänderungen aufgrund explosiver Vulkanausbrüche oder dem plötzlichen Abfluss großer glazialer Süßwasserseen kam. Er ist daher der Meinung, dass auch die derzeitige durch die atmosphärischen CO₂-Konzentration hervorgerufene Temperaturerhöhung keinen langfristigen Einfluss auf das Klima ausübt. Der Wechsel zwischen einem interglazialen Maximum und glazialen Minimum zeigt eine Periodizität von etwa 100 000 bis 120 000 Jahre pro glaziärem Zyklus. In den letzten 500 000 Jahren dauerten die Warmzeiten etwa 10 000 bis 15 000 Jahren an. Da das jet-

zige sogenannte Flandrische Interglazial schon etwa 10 000 Jahre andauert, befinden wir uns daher nach dieser Theorie bereits in der Auslaufphase dieser Warmzeit. *Emiliani* vermutet, dass in etwa 20 000 Jahren der Höhepunkt der nächsten Kaltzeit erreicht sein wird. *Keller* hält dagegen erst nach etwa 70 000 Jahren einen Höhepunkt der nächsten Kaltzeit für wahrscheinlich [42].

Der zweite Ansatz, mit Hilfe eines Rechenmodells eine Klimaprognose zu erstellen, ist Teil vieler nationaler und internationaler Projekte. Aufgrund der benötigten Rechnerleistung stellt es jedoch ein noch recht junges Arbeitsfeld dar und lässt in den meisten Fällen lediglich Aussagen für ein grobes Raster über das nächste Jahrtausend zu. Einige wenige Studien wie das EU-Projekt BIOCLIM [8, 10] berechnen jedoch auch langfristige Klimaänderungen bis hin zu 200 000 Jahre in einem hoch aufgelösten Raster. Dadurch sind auch Aussagen über Klimaveränderungen für sehr lange Zeiträume in Deutschland möglich. Daneben existieren auch Forschungsarbeiten deutscher Arbeitsgruppen, die sich mit der Klimamodellierung über sehr lange Zeiträume beschäftigen (z.B. [56], [87]).

Für die nächsten 55 000 bis 180 000 Jahre wird danach eine Fortsetzung der bestehenden Warmzeit erwartet, die von kurzen Kälteeinbrüchen unterbrochen wird. Die Temperaturerniedrigung während dieser Kälteperioden reicht jedoch nicht aus, um in Deutschland Glazial- oder Periglazialbedingungen entstehen zu lassen. Die Temperaturerhöhung steht in direkter Abhängigkeit zu der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre. In der Studie BIOCLIM wurde eine globale Temperaturerhöhung zwischen 2 und 5,5 °C errechnet. Die IPCC-Studie [51] geht schon in den nächsten 100 Jahren von einer zu erwartenden durchschnittlichen Erwärmung von 1,5 bis 6,0 °C gegenüber dem heutigen Wert aus. Und Modellergebnisse der Wissenschaftler des Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI) zeigen eine Temperaturerhöhung von 3 bis 5°C bis zum Ende des 21sten Jahrhunderts [100]. Die durchschnittliche Temperaturerhöhung von ca. 3 °C führt zu einem Klima, das in den letzten drei Millionen Jahren zu keinem Zeitpunkt aufgetreten ist [99] und Klimaverhältnissen entspricht, wie sie bereits im Pliozän gegen Ende des Tertiärs vor 5 bis 3 Million Jahren herrschten. Die globalen Temperaturen im Sommer steigen dann um 3 bis 9 °C und im Winter um 4,5 °C. Der atmosphärische Wasserkreislauf wird dadurch verstärkt und führt zu einem Anstieg der durchschnittlichen globalen Niederschlagsmenge von mehr als 10 % [99].

Es zeigen sich jedoch deutlich regionale Differenzierungen. Für Deutschland wird beispielweise ein mittlerer jährlicher Temperaturanstieg von derzeit 15 °C auf lediglich ca. 17 °C prognostiziert. Die jährliche Niederschlagsmenge verringert sich geringfügig. Modellrechnungen verschiedener deutscher Institute ergeben als wichtigste Auswirkungen in Deutschland [27], [28], [38], [51], [99]:

- Rückgang der mittleren Jahresniederschläge, insbesondere in Süddeutschland
- Auftreten von trockenen Sommern und etwas feuchteren Wintern
- Abnahme von Regentagen mit Niederschlägen >1 mm, gleichzeitige Zunahme lokal begrenzter Starkniederschläge
- Verschiebung der Schneegrenzen aufgrund der mildereren Wintertemperaturen

Nach dieser durch die Treibhausgase verlängerten Warmzeit erfolgt in etwa 55 000 bis 180 000 Jahren ein globaler Temperaturrückgang mit Sommertemperaturen, die etwa 3 bis 4 °C unter den heutigen liegen und Wintertemperaturen zwischen 0 und -3 °C. Nach 180 000 bis 200 000 Jahren setzt den Modellrechnungen zufolge wieder eine globale Erwärmung ein.

Nur großräumige Abtauprozesse aller derzeit vorhandenen Gletscher könnten, die derzeitige Warmzeit verkürzen und die nächste Kaltzeit schneller herbeiführen. Dies würde in Europa zu einem Temperaturrückgang von 4 bis 6 °C führen, was auch erhöhte Niederschlagsraten von etwa 8 % zur Folge hätte.

Als Ergebnis der Modellrechnungen ist daher festzuhalten, dass das Abtauen der Gletscher der entscheidende Faktor für den Beginn der nächsten Kaltzeit ist. Findet lediglich ein kleinräumiges Abschmelzen der Gletscher statt, so bleibt die derzeitige Warmzeit für die nächsten 55 000 bis 180 000 Jahre bestehen. Kommt es jedoch zu einem großräumigen Abschmelzen, findet die Abkühlung weitaus schneller statt.

2.10.2 Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Prozesse in der Geosphäre

Eine Klimaänderung beeinflusst primär die Höhe und Verteilung der Temperatur und des Niederschlags und leitet so genannte Warm- und Kaltzeiten ein. Diese nehmen in unterschiedlicher Weise und Stärke Einfluss auf die Boden- und Gesteinseigenschaften in der

Geosphäre, führen so zu einer langfristigen Veränderung des Grundwasserströmungsverhaltens und greifen als Folge davon in Transportprozesse innerhalb der Geosphäre ein.

Warm- und Kaltzeiten nehmen aufgrund ihres Eingriffs in die Oberflächenformen und die hydraulischen Eigenschaften der Geosphäre großen Einfluss auf die Grundwasserhydraulik und Hydrochemie. Die wichtigsten Klimaelemente und ihre für die Endlagersicherheit bedeutsamen Auswirkungen auf die Geo- und Hydrosphäre sind in Abbildung 2.15 veranschaulicht und werden in den folgenden Ausführungen näher erläutert.

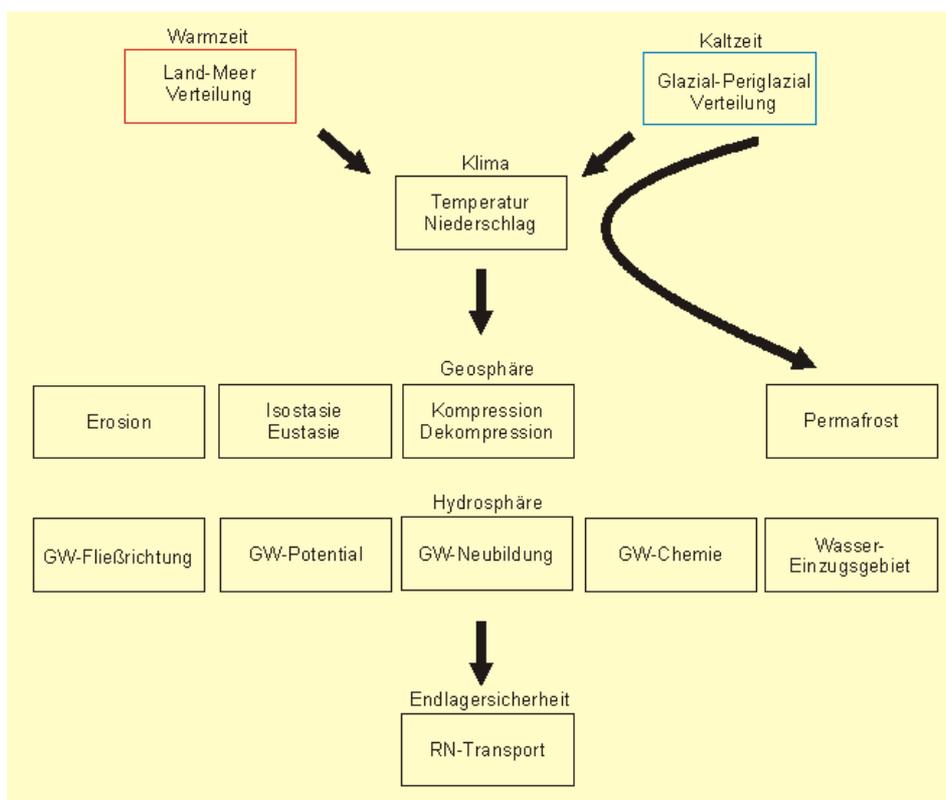


Abb. 2.15: Übersicht über die Auswirkungen von Warm- und Kaltzeiten auf Prozesse in der Geo- und Hydrosphäre

Im Folgenden werden die sich aus einer Warm- bzw. Kaltzeit ergebenden Gesteinseigenschaften und die daraus resultierenden Änderungen in Fließ- und Transportprozessen für die in Deutschland endlagerrelevanten Gesteinsformationen Salz, Ton und Granit dargestellt. Ein wichtiges Dokument stellt der von der BGR im Rahmen des Projektes "Ermitt-

lung und Analyse von Szenarien für Endlagerstandorte mit unterschiedlichen Wirtsgesteinen (Deutschland)“ verfasste Zwischenbericht dar, der eine wichtige Grundlage für die folgenden Ausführungen bildet [41].

Die verschiedenen Gesteinsformationen Salz, Ton und Granit sind in Deutschland ungleichmäßig verteilt und in verschiedener Mächtigkeit anzutreffen. Abbildung 2.16 zeigt ihre räumliche Verteilung.

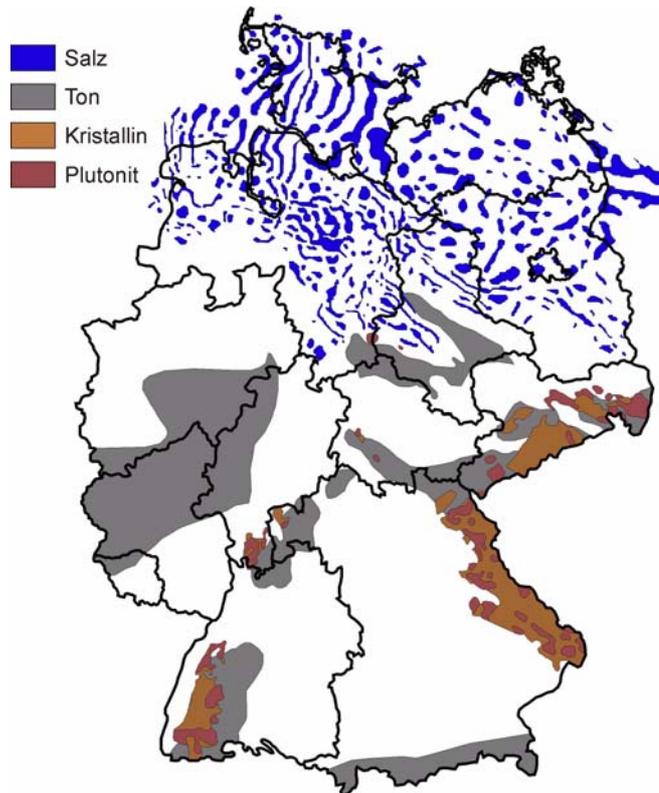


Abb. 2.16: Verbreitung bedeutender Salz-, Ton- und Kristallin-Formationen in Deutschland auf der Grundlage von [42]

Die Salzformationen in Deutschland befinden sich im Wesentlichen innerhalb einer breiten Zone, die sich von der südlichen Nordsee über die Norddeutsche Tiefebene erstreckt. Sie wurden während des Perms vor etwa 290 bis 250 Millionen Jahren als ebene Schichten abgelagert und sind in der Folgezeit aufgrund ihrer plastischen Eigenschaften und des Dichteunterschiedes zwischen dem Salz und den überlagernden Deckschichten meist in Form von Diapiren aufgestiegen. Es gibt jedoch auch im mittel- und süddeutschen Raum Salzlagerstätten. Sie wurden überwiegend während des Zechsteins und Muschelkalks gebildet und befinden sich auch heute noch in vorwiegend horizontaler Lagerung.

Tone und Tonsteine, die vorwiegend aus dem Paläozoikum und Mesozoikum vor etwa 360 bis 66 Millionen Jahren stammen, sind vor allem in Mittel- und Süddeutschland verbreitet. Aber auch in der Norddeutschen Tiefebene finden sich tertiäre und quartäre Tone beispielsweise im Deckgebirge der norddeutschen Salzlagerstätten.

Kristallin-Formationen größerer Ausdehnung trifft man in Deutschland selten an. Vorkommen finden sich beispielsweise im Schwarzwald, dem Erzgebirge, der Lausitz, dem Oberpfälzer Wald oder auch dem Bayerischen Wald.

2.10.2.1 Auswirkungen einer Kaltzeit auf endlagerrelevante Gesteinsformationen

Kaltzeiten verursachen Glazial- und Periglazialgebiete. Als Glazialgebiete werden solche Gebiete bezeichnet, die mit Gletschern bedeckt sind aber keinen Permafrost aufweisen. Grund für die fehlende Bodengefrorenis ist der, durch die große Auflast hervorgerufene hohe Druck im Boden, der das Bodenwasser selbst bei Temperaturen unter 0°C nicht gefrieren lässt [42]. Das Periglazialgebiet schließt sich an das Glazialgebiet an. In ihm bildet sich aufgrund des über das Jahr anhaltenden Dauerfrostes sowie des Fehlens der Eisschicht ein Permafrostboden aus.

Eine Kaltzeit nimmt in Folge des Eingriffs in die Oberflächenformen, der Umlegung von Vorflutern und der Änderung der hydraulischen Eigenschaften der Geosphäre großen Einfluss auf die Grundwasserhydraulik und Hydrochemie. Vor allem die glazial überprägten Gebiete bilden charakteristische Oberflächenformen und Ablagerungen aus, welche die Stratigraphie und Topographie verändern. Der glaziale Formenschatz ist sehr vielfältig. Einige wichtige Oberflächenformen und Ablagerungen werden durch die Glaziale Serie von Penck und Brückner beschrieben. Zu ihnen gehören die vor Gletschern aufgeschobene Endmoräne, die im Bereich der Gletscher mitgeführte Grundmoräne, das parallel zur Endmoräne verlaufende Urstromtal sowie die zwischen Endmoräne und Urstromtal glazifluvial aufgeschütteten Sander- und Schotterflächen.

Neben dem Eingriff in die Oberflächenformen ist das in den Gletschern gebundene Süßwasser Hauptursache für die sogenannte eustatische Meeresspiegelabsenkung. Das Meeresspiegelniveau hat in früheren Kaltzeiten Werte bis zu 200 m NN erreicht. Durch die Festlegung des Süßwassers in Form von Gletschern steigt die Salzkonzentration der Meere an.

Auswirkungen in Glazialgebieten

In Glazialgebieten bewirkt das vorrückende Eis vor allem eine große Umgestaltung des Untergrundes durch Gletscherschurf. Während die Erosion in Norddeutschland großräumig und bis zu einer Tiefe von bis zu mehreren zehner Meter erfolgte [41], beschränkt sie sich in reliefreichen Gebieten auf bevorzugte Fließwege wie Täler und ist daher dort lokal sehr begrenzt. Im Lockergestein können zusätzlich auch flache „Wannen“ von bis zu 50 m Tiefe ausgehoben werden. Ein Beispiel hierfür ist die heutige Elbtalwanne bei Meissen. Durch die Lage der Gletscher und die veränderten Oberflächenformen werden Flüsse aufgestaut und in ihrem Verlauf verändert. Die Landmasse unter dem Eis gefriert nicht, wird jedoch durch die gewaltige Auflast, in Niedersachsen von bis zu 3 500 m mächtigen Eisschilden, einer mechanischen Deformation unterzogen. Die Kompression führt in Lockergesteinen zu einem verkleinerten Porenvolumen und in Folge davon zu verringerten Wassergehalten und Fließgeschwindigkeiten. Im Festgestein kommt es dagegen zu der Ausbildung von Klüften.

Im Folgenden werden die Auswirkungen auf die verschiedenen potentiellen Wirtsgesteine unter Annahme einer erneuten Kaltzeit dargestellt:

- Salzformation: Diejenigen Salzstöcke, deren Entwicklung noch nicht abgeschlossen ist, erfahren während einer Kaltzeit große Veränderungen. Es wird angenommen, dass sowohl ihre Form, als auch ihre Aufstiegraten verändert werden. Der Hauptgrund dafür liegt in der Eigenschaft des Salzes, sich unter genügend großem Druck plastisch zu verformen. Studien belegen, dass für eine 300 m mächtige Salzschieht der Druck von etwa 1 000 bis 1 500 m mächtigen Sedimenten oder einer entsprechend mächtigen Gletscherbedeckung ausreicht, um das Salz fließfähig zu machen. Die Plastizität von Salz steigt mit zunehmendem Druck stark an. Der Zusammenhang zwischen Viskosität und Druck wird durch das sogenannte Kriechgesetz beschrieben, in das die durch die Auflast erzeugte Spannung im Gestein mit dem 5. Exponenten eingeht [29]. Die Aufstiegraten liegen daher während einer Eisauflast deutlich höher als in Warmzeiten. Überschlagsrechnungen belegen, dass die Konvergenz des Salzes im Norddeutschen Tiefland bei einer angenommenen Mächtigkeit des überlagernden Eises von 3 500 m, einer Deckschicht von 400 m sowie einer Salzschieht von 400 m um den Faktor 150 bis 200 schneller abläuft. So bewegen sich die Salzstöcke unter der erhöhten Auflast schneller aufwärts [41]. Das seitlich am Diapir nachsackende Deckgebirge verursacht zudem einen Druck auf die in der ursprünglichen Tiefenlage verbliebene Restsalzmenge und führt so zu einem nahezu vollständigen

digen Auspressen der ehemals eben abgelagerten Salzschrift. Die Entwicklung eines Diapirs ausgehend von einer ebenen Salzschrift zeigt Abbildung 2.17. Ein bereits hoch aufragender Salzdiapir kann zudem von Gletscherschurf freigelegt und sogar abgetragen werden.

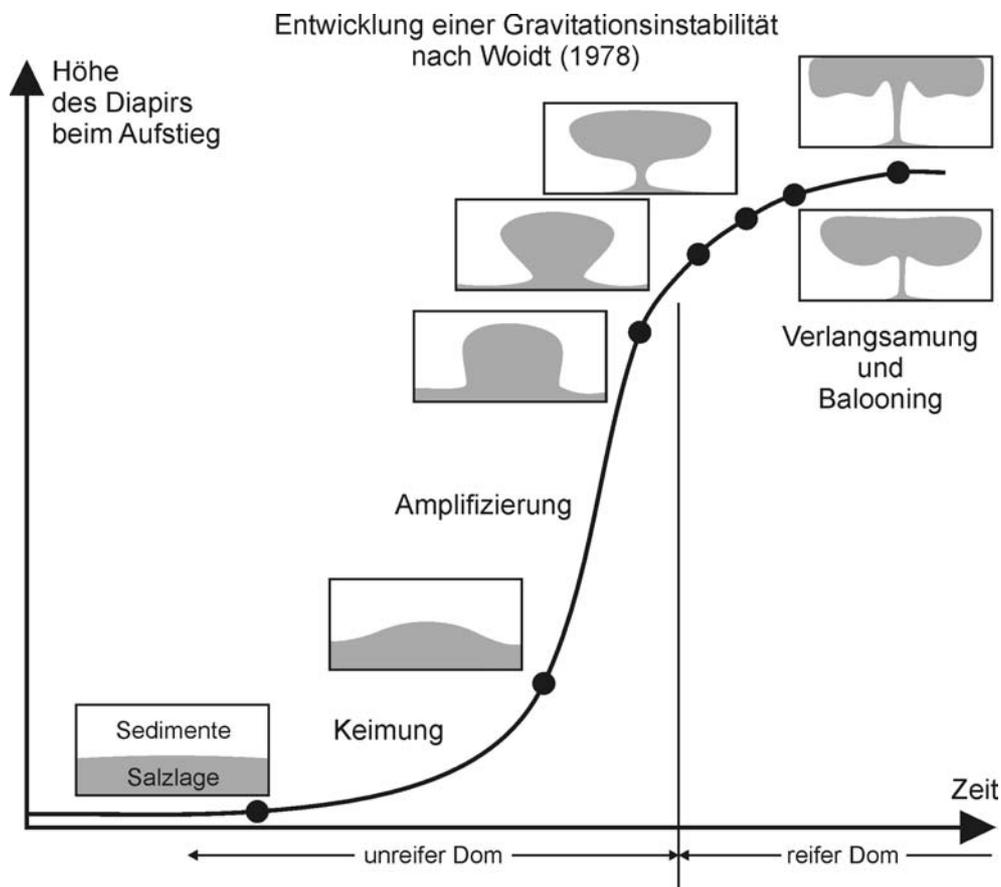


Abb. 2.17: Entwicklung eines Diapirs

- Tonformation: Der Druck durch die überlagernden Sedimente und die Gletscherbedeckung führt zu einer Abnahme der Porosität. Ab einer etwa 2 000 m mächtigen Sedimentüberdeckung ist die mechanische Verdichtung abgeschlossen und das Porenwasser nahezu vollständig ausgepresst. Innerhalb der Tone kommt es zu mineralogischen Umwandlungsprozessen, die zu Veränderungen der hydraulischen Eigenschaften führen. Sedimentschichten ab 1 500 m Mächtigkeit führen z.B. zu einer Umwandlung von Smektit zu Illit, was zu einer Verringerung bis hin zum Verlust der Quellfähigkeit [41] des Tones führt. Eine große Auflast kann zudem im Einzelfall dazu führen, dass stark plastische Tone ähnlich dem Salz mit Fließbewegungen reagieren [41].

- In Festgesteinsgebieten können Gletscher durch glaziale Erosion zu einer Übersteilung der Talwände führen. Die durch Gletscher erzeugten Spannungen im Gestein führen zu der Bildung von Kluftstrukturen.

Auswirkung in Periglazialgebieten

Im Gegensatz zu den Glazialgebieten besitzen Periglazialgebiete einen gefrorenen Untergrund, den sogenannten Permafrost. Dieser wird in drei verschiedene Typen, den kontinuierlichen, diskontinuierlichen und sporadischen Permafrost unterteilt. Sie unterscheiden sich in der Mächtigkeit und flächenmäßiger Ausprägung. Der kontinuierliche Permafrostboden bildet sich bei Jahresmitteltemperaturen zwischen -6 bis -8 °C und kann bis in mehrere 100 m Tiefe reichen. Der diskontinuierliche Permafrost ist nicht durchgehend vorhanden und bildet sich bei Jahresmitteltemperaturen von -3 bis -4 °C aus. Der sporadische Permafrost bildet sich bei einer Jahresmitteltemperatur von -1 bis -2 °C und nimmt weniger als 50 % der Gesamtfläche ein [42]. Die Permafrostgebiete werden daher durch die -2 °C Jahresisotherme begrenzt. Für den Aufbau eines 450 m mächtigen Permafrostes werden etwa 10 000 Jahre veranschlagt [42]. Die Oberflächenformen und Tiefenstrukturen in diesen Gebieten sind durch das häufige Gefrieren und Wiederauftauen geprägt. Die Abkühlungsgeschwindigkeit sowie die Permafrostmächtigkeit sind abhängig von [9]:

- der Jahresmitteltemperatur,
- den Boden- und Gesteinseigenschaften und der Topographie,
- der isolierenden Schneebedeckung,
- dem Vorhandensein bzw. Fehlen von Oberflächengewässern,
- dem Salzgehalt des Grundwassers und
- dem geothermischen Wärmefluss.

In Norddeutschland geht man davon aus, dass sich in einer künftigen Kaltzeit Permafrostmächtigkeiten zwischen 100 und 300 m bilden können. Die weichselzeitlichen Permafrostmächtigkeiten erreichten mehrere zehn bis wenige hundert Meter [42]. Die BGR nimmt für ihre Modellbetrachtung in Gorleben eine künftige Permafrostmächtigkeit von 40 bis 140 m an [95].

Die Höhe der Permafrostgrenze ist weltweit in den letzten 100 Jahren um 150 bis 200 Meter angestiegen. Bis zum Jahr 2100 droht bei einer Erwärmung um 1 bis 2 °C ein weiterer Rückzug der Permafrostgrenze um 200 bis 750 Meter [107].

Die Entwicklung eines tiefen und über lange Zeiträume andauernden Permafrostgebietes hat signifikante Änderungen der Grundwasserreserven und des Grundwasserströmungsverhaltens zur Folge [8], da der Permafrost die Durchlässigkeit des Gesteins durch Verschluss des Porenraums mit Eis stark herabsetzt und einen advektiven Transport in dieser Zone nahezu unmöglich macht [102]. Eine Grundwasserneubildung findet aufgrund der geringeren Permafrostmächtigkeit bzw. des sporadischen Permafrostes hauptsächlich im Bereich von Oberflächengewässern oder salzhaltigen Grundwassers statt. Im darunter befindlichen Aquifer verringern sich in Folge davon zum einen die Grundwasserneubildungsraten, was zu einem Absinken des Grundwasserspiegels führt, zum anderen die Grundwasserfließgeschwindigkeiten, was längere Transportzeiten zur Folge hat [103].

Auswirkungen auf verschiedene Wirtsgesteine

Die Grundwässer über Salzstöcken gefrieren aufgrund ihres hohen Salzgehaltes später als diejenigen mit geringem Salzgehalt. Gesättigte Lösungen wie sie sich im Bereich des Salzstockes Gorleben mit etwa 300 g l^{-1} ergeben, unterbinden die Ausbildung eines kontinuierlichen Permafrostes sogar vollständig [42]. Zusätzliche Wasserwegsamkeiten bilden sich vor allem im Bereich des Hutgesteins, können jedoch auch bis in das Salzgestein vordringen. So wurden beispielsweise in einigen Salzstöcken im Raum Hannover Klüfte nachgewiesen, die bis zu 600 m Tiefe erreichen. Diese sind im Laufe der Zeit mit tonig, schluffigen Sedimenten verfüllt oder blieben zunächst offen und wurden erst später durch auskristallisierte Salzminerale verfüllt [41].

Im Festgestein kann es durch das Eindringen und Gefrieren von Wasser in den Kluftstrukturen zu deren Aufweitung kommen. Hierdurch wird der Bereich der Einflusszone vergrößert.

Nach heutigem Kenntnisstand kann davon ausgegangen werden, dass eine Kaltzeit den Radionuklidtransport aufgrund der

- verringerten Grundwasserfließgeschwindigkeiten,
- verlängerten advektiven Transportwege um den Permafrost und
- den im Permafrost lediglich durch Diffusion erfolgenden Transport

verlangsamt.

Weiterhin ist anzunehmen, dass auch die künftigen Gletscher wie in der Vergangenheit vor allem aus Skandinavien aber auch aus den Alpen in Richtung Deutschland vorrücken. Innerhalb Deutschlands sind neben den Alpen nur Gletscherbildungen im Bereich des Feldbergs im Schwarzwald und evtl. im Erzgebirge zu erwarten. Klimaprognosen weisen darauf hin, dass die nächste Kaltzeit voraussichtlich eine große Ähnlichkeit mit der Weichsel-Kaltzeit haben wird [41, 42].

Geht man davon aus, dass die nächste Kaltzeit in einer ähnlichen zeitlichen wie auch räumlichen Größenordnung wie die Weichsel-Kaltzeit abläuft und auch die Eisgrenze in ähnlicher Weise verläuft, so bedeutet dies für die einzelnen Gesteinsformationen, dass der Hauptanteil aller in Deutschland relevanten Salz-, Ton- und Granit-Formationen nicht in den Einflussbereich der Gletscher fällt, sondern sich im Periglazialgebiet befindet (vgl. Abbildung 2.18). Legt man dagegen die bisher maximale Gletscherausdehnung zugrunde, so unterliegen sämtliche relevante Salzgesteinsvorkommen Glazialbedingungen. Im Bezug auf die Ton-Formationen würden sich nur die nördlichsten Gebiete innerhalb des vergletscherten Bereiches befinden. Granit-Formationen wären auch von dieser Gletscherausdehnung nahezu unberührt.

2.10.2.2 Auswirkungen einer Warmzeit auf endlagerrelevante Gesteinsformationen

Eine Warmzeit ist vor allem durch Gletscherschmelze, die sich daraus ergebenden Auswirkungen auf die Oberflächenformen sowie die Geo- und Hydrosphäre gekennzeichnet. Die Gletscherschmelze schließt sich direkt an den Höhepunkt der Kaltzeit an und findet bis zum Optimum der sich anschließenden Warmzeit hinein statt. Die sich daraus ergebenden Auswirkungen auf Geo- und Hydrosphäre werden in diesen Ausführungen der Warmzeit zugeordnet.

Schmelzwässer bilden ihren eigenen glazifluvialen Formenschatz aus. Dazu gehören in Lockergesteinen bis zu 400 m tiefe Rinnensysteme. Als wahrscheinliche Ursache wird heute angenommen, dass Schmelzwasser unter großem Druck und mit hoher Fließgeschwindigkeit die Gletscherspalten passiert. Die gebildeten Rinnen können mehrere Kilometer breit und mehr als 100 km lang sein (vgl. Abb. 2.19:). Beispiele hierfür sind die Gorlebener Rinne mit 300 m und die Panzenberg Rinne mit 286 m Tiefe (vgl. Abb. 2.19:). Diese Vertiefungen werden aufgrund der mit der Zeit abnehmenden Fließgeschwindig-

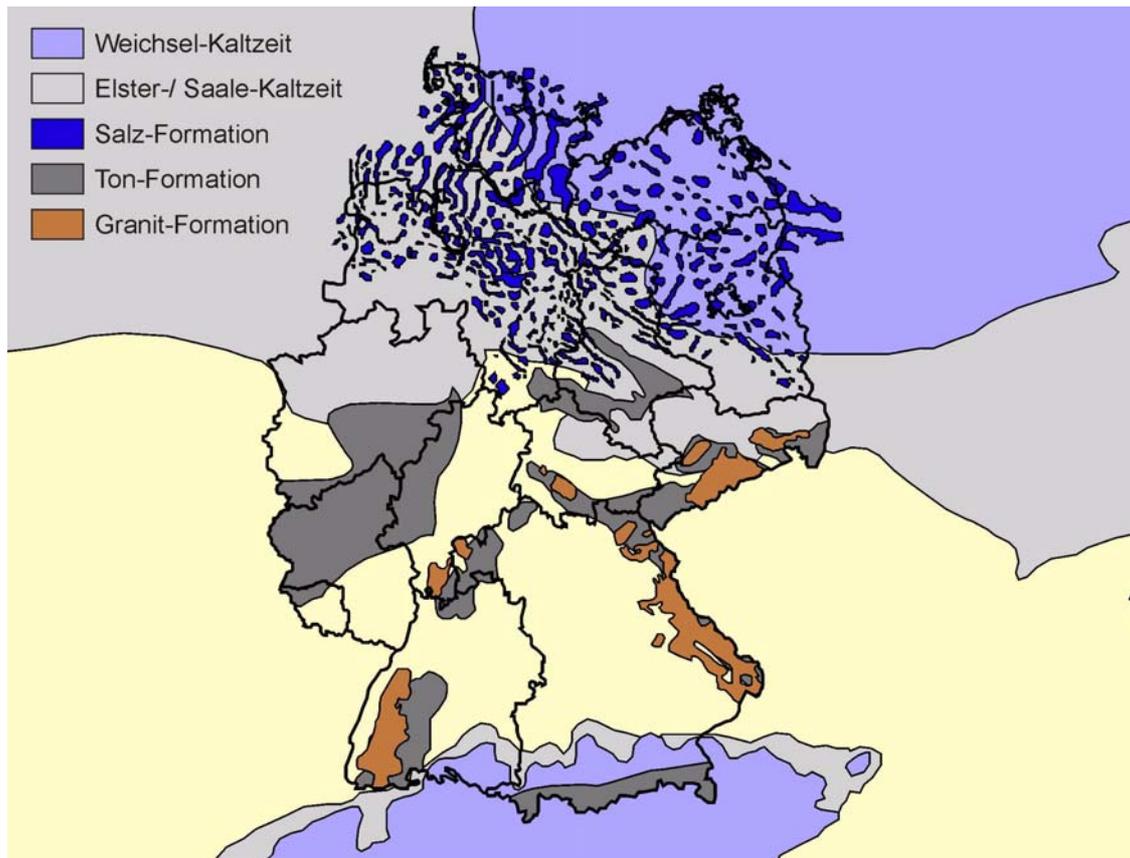


Abb. 2.18: Verbreitung bedeutender Salz-, Ton- und Granit-Formationen in Deutschland und quartäre Eisgrenzen (modifiziert nach [55], [97])

keiten mit Sedimenten aufgefüllt. Die Rinnensysteme Norddeutschlands enthalten in der Regel Schichtungen von Kiesen und Sanden mit gering mächtigen Schlufflagen und bilden ein bevorzugtes Grundwasserreservoir.

Das in die Meere abfließende Schmelzwasser verursacht eine Transgression der Meere. Die im Verlauf der Warmzeit steigende Temperatur des Meerwassers verstärkt aufgrund der Expansion des warmen Wassers diesen Effekt [41]. Wenn die heutigen weltweit vorhandenen Gletscher vollständig abschmelzen, würde dies einen Meeresspiegelanstieg von etwa 60 m hervorrufen [41]. Abbildung 2.20 zeigt die sich daraus ergebenden überfluteten Gebiete in Deutschland. Das gesamte Grundwasserregime würde sich aufgrund des eindringenden Meerwassers verändern und die Grundwasserdynamik beeinflussen.

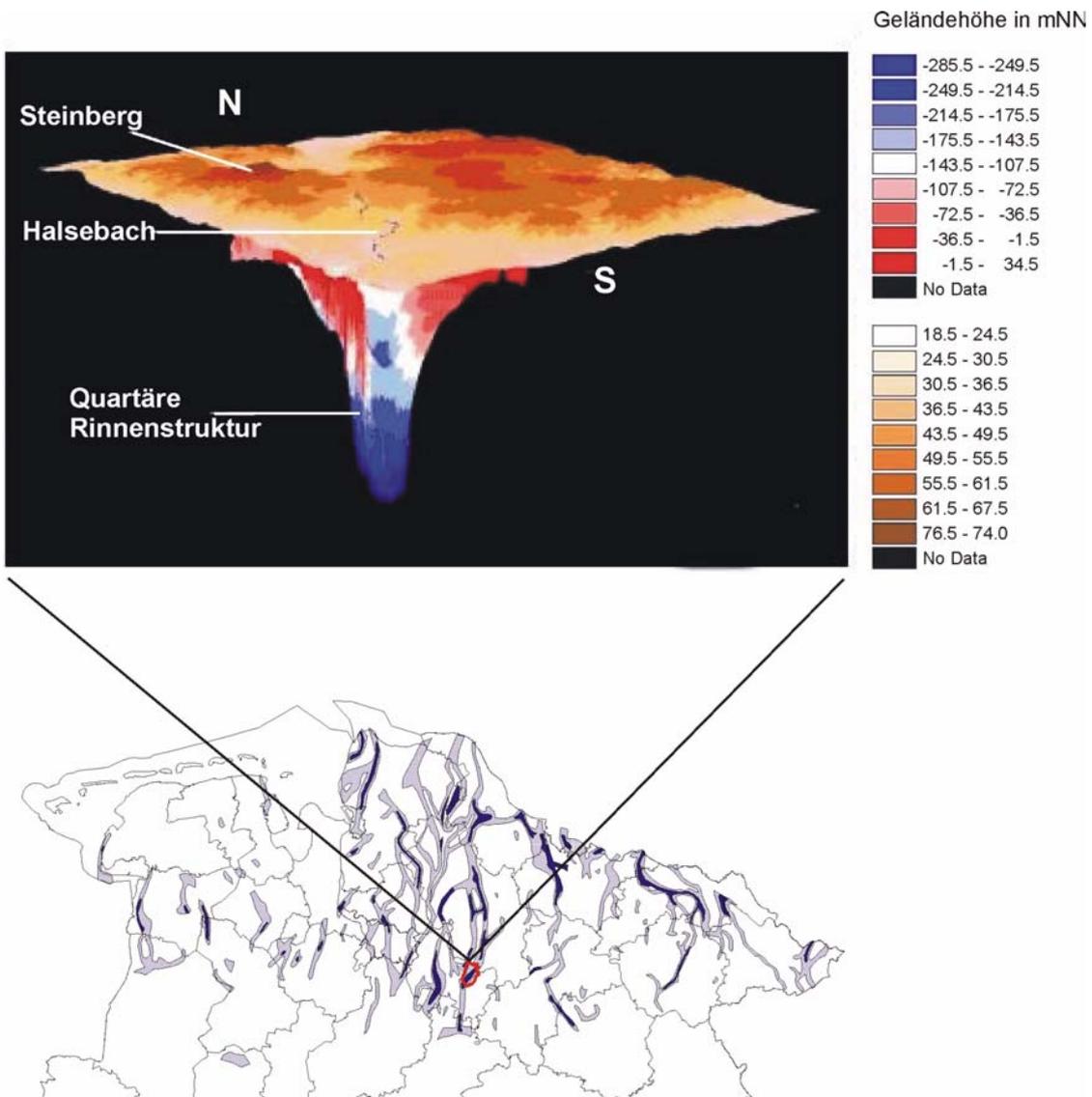


Abb. 2.19: Die quartären Rinnensysteme in Niedersachsen, sowie eine 3-d Ansicht der Panzenberggrinne bei Verden

Durch den Gletscherrückzug findet eine Entlastung der Landmasse statt, in dessen Folge langsam eine isostatische Wiederanhebung des Untergrundes der früheren Glazialgebiete durch elastische Wiederausdehnung stattfindet. In Deutschland wurden in Folge dieses Prozesses nach der letzten Weichsel-Kaltzeit die südlich der Linie Papenburg-Nienburg-Allertal liegenden Gebiete angehoben.

Die große Schmelzwassermenge lässt vor allem in Gegenden mit geringem Reliefunterschied viele Seen und Flüsse entstehen, verändert deren Hydrochemie und hat in den Flüssen größere Fließgeschwindigkeiten zur Folge, was mit der Zeit zu einer Verbreiterung und Vertiefung des Flussbettes führt. Die großen Flüsse, wie die heutige Weser,

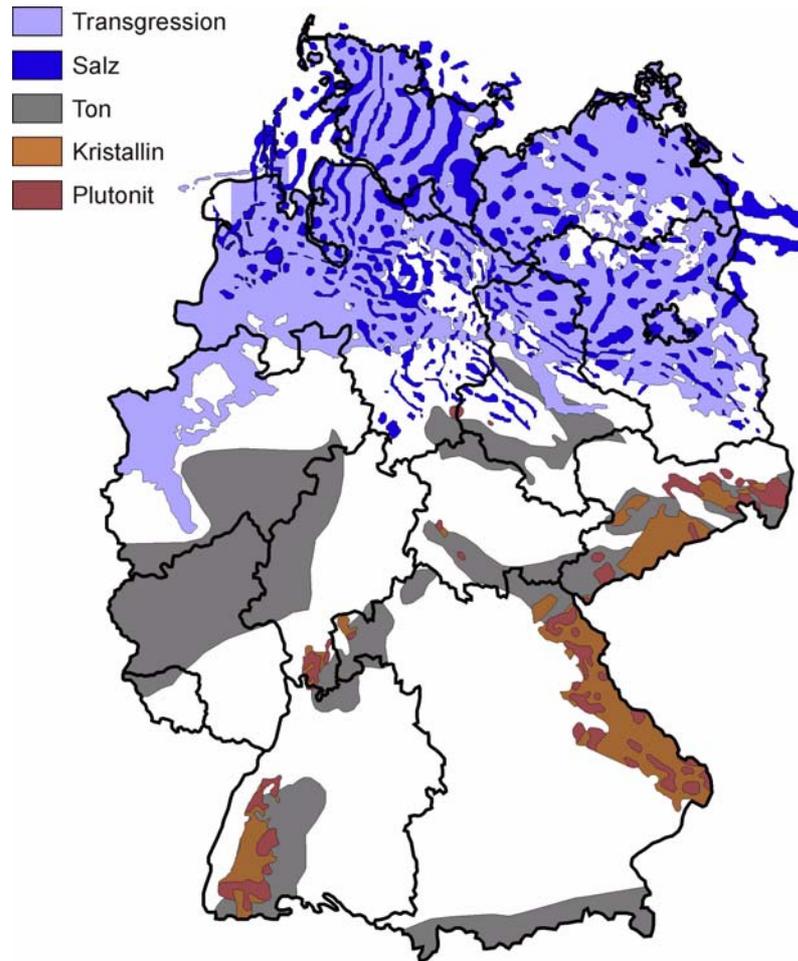


Abb. 2.20: Verbreitung bedeutender Salz-, Ton- und Granit-Formationen in Deutschland und bei einem Meeresspiegelanstieg von 60 m ausgehend von einem vollständigen Abschmelzen der Gletscher überflutete Gebiete [42]

Oder, Elbe oder Ems nutzen die Flussbetten der in der Eiszeit gebildeten Urstromtäler. Modellrechnungen belegen, dass der durchschnittliche Wasserfluss der Elbe aufgrund der anfallenden Schmelzwassermengen nahezu doppelt so groß werden würde. Die durchschnittliche Abflussspende würde von heute 6,5 bis 7,3 auf 10 bis 13 l km⁻² s⁻¹ ansteigen [10].

Die während der Kaltzeit gebildeten Oberflächen- und Tiefenformen können auch zu einer Verlagerung von Wasserscheiden und damit veränderten oberflächlichen Wassereinzugsgebieten führen.

Durch das unregelmäßige Abschmelzen des Eises entstehen Toteisblöcke, die als Hohlformen, sogenannte Sölle erhalten bleiben. Diese werden im Laufe der Zeit vielfach mit Torf oder Wasser aufgefüllt. Die so entstehenden Seen können ihrerseits wieder Einfluss auf den regionalen Grundwasserfluss nehmen.

Während des Rückzugs des Gletschers erfolgt kurzfristig aufgrund der Druckentlastung ein Grundwasseraufstieg [82]. Langfristig sind die Grundwasserneubildungsraten während des Abtauens des Eises um ein vielfaches erhöht. Das Schmelzwasser kann in wenigen tausend Jahren Tiefen von einigen Kilometern erreichen. Dadurch wird die Hydrochemie des Tiefengrundwassers verändert.

Auswirkungen auf die verschiedenen Wirtsgesteine

- Salz: Die Aufwärtsbewegung der Salzstöcke geht aufgrund der aus der Druckentlastung resultierenden lateralen Druckgradienten im Salz weiter. Die BGR geht bei unveränderten Klimabedingungen in den nächsten 1 Millionen Jahre von einem Gesamtaufstieg des Salzstocks in Gorleben von 10 bis 20 m aus.
Die Subrosionsgeschwindigkeit steht in Abhängigkeit von der Salzkonzentration des Grundwassers. Daher wird sie mit dem Eindringen von Schmelzwasser stark ansteigen, während eine Meerwasserintrusion eine Abschwächung der Subrosion zur Folge hat. Durch die isostatische Wiederanhebung der Erdkruste erfahren die Salzstrukturen einen zunehmenden Grundwassereinfluss, der die Subrosion verstärkt. Zudem können sich im Bereich von Schwächezonen, wie sie sich entlang des Salzspiegels zwischen einem Salzstock und einer Rinnenstruktur ergeben, Risse bilden, über die ein Grundwasserzustrom erfolgen kann.
- Festgestein: In Bergregionen sind große Veränderungen der Oberflächenformen zu erwarten. Gletscher können durch glaziale Erosion zu einer Übersteilung der Talwände führen. Beim Abschmelzen des Eises kommt es dadurch vermehrt zu Felsstürzen. Durch wassersättigten Sedimente erfolgen vermehrt Hangrutschungen und Murenabgänge. Das Auftauen des Permafrostbodens sowie die Unterspülung von Berghängen durch vermehrt auftretende Extremniederschläge (vgl. Kapitel 2.10.1) führt zu Fels- und Bergstürzen. Die Entlastung des Gesteins durch den Rückzug der Gletscher macht sich zudem durch eine vermehrte Bildung von Gesteinsklüften bemerkbar. Lokal begrenzt kommt es im Bereich von Schmelzwasserflüssen zu tief in das Gestein eindringende Gletschermühlen. Durch die Belastung des Gesteins mit dem

Gletscher und seiner Entlastung beim Abschmelzvorgang wird die Bildung von Klüften herbeigeführt. Diese bilden in der Folgezeit bevorzugte Wasserwegsamkeiten im Gestein.

Auswirkung einer Warmzeit auf den Radionuklidtransport

Der Radionuklidtransport wird während dieser Zeit durch eine günstige Hydrochemie und hohe Grundwasserfließgeschwindigkeit verstärkt. Die Lösungsgeschwindigkeiten der Radionuklide im Nahbereich des Endlagers werden durch den hohen Sauerstoffgehalt und hohe Eh-Werte des eindringenden Schmelzwassers erhöht und auch der Radionuklidtransport nimmt aufgrund der schnelleren Grundwasserfließgeschwindigkeiten und der abnehmenden Permafrostmächtigkeit zu. Für redoxsensitive Element wird auch die Sorption an den Sedimentoberflächen geringer sein.

2.11 Verfolgung natürlicher Analoga (NAnet)

Das thematische Netzwerk NAnet ("Network to review natural analogue studies and their applications to repository safety assessment and public communication") wurde von der Europäischen Kommission im 5. Rahmenprogramm über eine Laufzeit von Januar 2003 bis Dezember 2004 gefördert. Projektkoordinator war Enviros Consulting Limited (UK). Als Partner waren neben der GRS Institutionen aus Schweden, Großbritannien, Finnland, Tschechien, Frankreich, Belgien und Spanien beteiligt.

Das übergeordnete Ziel von NAnet war es, Reviews von abgeschlossenen und noch laufenden Studien zu natürlichen Analoga (NA) durchzuführen, um die Anwendung dieser Studien in Langzeitsicherheitsanalysen und in der Kommunikation mit der Öffentlichkeit zu fördern. Daraus ergaben sich die folgenden projektspezifischen Ziele:

- Durchführung von kritischen Review für eine große Anzahl von Analoga-Studien und Überprüfung der bisherigen Anwendungen in Langzeitsicherheitsanalysen.

- Identifikation der Gründe, warum Informationen aus Analogastudien bisher nicht in großem Rahmen in Langzeitsicherheitsstudien eingeflossen sind. Erarbeitung von Empfehlungen, wie qualitative und quantitative Informationen aus Analoga-Studien in zukünftige Sicherheitsanalysen bzw. Safety Cases oder in die Kommunikation mit Stakeholdern einfließen können.
- Identifikation und Zusammenstellung von qualitätsgesicherten Informationen aus Analoga-Studien mit hoher Qualität (z.B. aus akkuraten, in sich konsistenten Datensätzen) die relevant sind für typische Endlagerkonzepte oder Fernfeldbetrachtungen. Diese Datensätze sollen Stakeholdern, aus dem Bereich der Sicherheitsanalyse, Antragstellern, Forschungsorganisationen sowie der Öffentlichkeit zur Verfügung stehen.
- Empfehlung für zukünftige Analoga-Studien:
 - Identifikation von Themen, für die keine weiteren Analoga-Studien notwendig sind (entweder weil das Thema gut verstanden und nur eine geringe Unsicherheit besteht oder weil Analogastudien nicht möglich sind).
 - Themen, für die eine begrenzte Zahl zusätzlicher, gut fokussierter Analoga-Studien wichtig und erfolgversprechend wäre.

2.11.1 Ergebnisse des Projekts

Während der Projektlaufzeit wurden ca. 120 Studien identifiziert, für die entsprechende Reviews durchgeführt werden sollten. Um die Reviews möglichst einheitlich zu gestalten, wurde eine Struktur entwickelt, die eine Kurzbeschreibung des Analogons, eine Bewertung seiner Relevanz, Angaben zu Art und Qualität der Ergebnisse und Informationen über bisherige Anwendungen in Langzeitsicherheitsanalysen oder Kommunikation mit der Öffentlichkeit enthält. Die Arbeiten wurden untergliedert in NA-Studien für das *Nahfeld*, das *Fernfeld* und *oberflächennahe Prozesse*. Als Beispiel für einen Review ist derjenige zur NA-Studie Dunnarobba in Abschnitt 2.11.2 dargestellt.

Unter Analoga wurden natürliche, anthropogene oder industrielle Systeme mit einer definierbaren Ähnlichkeit mit einem Endlager für radioaktive Abfälle, dessen Umgebung, bzw. Prozessen, die dort stattfinden, verstanden. Demnach wurde der Analogabegriff sehr weit gefasst, es wurden auch archäologische und industrielle Analoga sowie solche, die sich mit oberflächennahen Prozessen beschäftigen, mit einbezogen.

Zur Unterstützung von PA- und Kommunikationsexperten bei der Verwendung von Analoga-Studien wurden außerdem Tabellen erstellt, die eine schnelle Identifikation von geeigneten Analogastudien ermöglichen. Beispielhaft ist eine solche Matrix für das Nahfeld eines generischen Endlagers in Ton oder Granit in Tabelle 2.11 dargestellt. Dabei wurde berücksichtigt, dass in den meisten Fällen Analoga für Prozesse herangezogen werden. Entsprechend sind auf der vertikalen Achse die Prozesse und auf der horizontalen Achse Materialien aus Teilbereichen des Nahfelds berücksichtigt. Analogastudien, in denen Informationen zu einem ausgewählten Prozess in einem Teilbereich enthalten sind, sind in den entsprechenden Matrixelementen eingetragen. Beispielsweise sind zum Thema Korrosion von Kupfer Informationen in der Studie Kronan Cannon zu finden. Als Anhang zum Abschlussbericht wird eine CD erscheinen, über die die Reviews zu den Analogastudien dann per Hyperlink aus der Tabelle einzusehen sind [61]. Entsprechende Tabellen wurden auch für das Fernfeld und für die oberflächennahen Prozesse angefertigt. Eine Empfehlung des NAnet-Projekts ist es, dass im Rahmen eines Sicherheitsnachweises entsprechende, an das jeweilige Konzept angepasste Tabellen erzeugt werden und in die Dokumentation des Safety Case einfließen.

Ein weiterer Schwerpunkt von NAnet war das Thema Kommunikation, da der Wert von Analogastudien zu diesem Thema als sehr groß eingeschätzt wird, diese bisher aber nur in geringem Maße für die Kommunikation eingesetzt worden sind. Wichtige Erkenntnisse wurden aus mehreren Veranstaltungen zur Endlagersicherheit gewonnen, die in der Vergangenheit von NIREX mit der Öffentlichkeit geführt worden sind. Die Erfahrung daraus zeigt, dass die Vorgehensweise bei der Kommunikation mit der Öffentlichkeit eher darauf abzielen sollte, zu informieren und nicht zu überzeugen. Dementsprechend sollten natürliche Analoga eher zur Beantwortung von Fragen verwendet werden. Zentrale Fragen aus der Bevölkerung betrafen z.B. Zeiträume, die Tiefe in der Endlager errichtet werden sollen, Prozesse, die eine Rolle spielen, und ob ein Endlager bereits erfolgreich errichtet wurde. Eine Liste mit FAQs wird im Anhang zum NAnet Abschlussbericht enthalten sein. Zur Illustration der Rolle von Analogastudien für Kommunikation und Dialog mit PA-Ex-

perten wurde von NIREX eine "Informationspyramide" entworfen (Abb. 2.21:), die aufzeigen soll, dass im Gegensatz zum Dialog mit der Öffentlichkeit, für die Langzeitsicherheitsanalyse eher Daten und Konzepte wichtig sind.

Tab. 2.11 Generische Matrix für das Nahfeld eines Endlagers

Near-field matrix		Abfallmatrix				Behälter		Buffer, Versatz	
		Glas	Spent Fuel	Zement	Bitumen	Kupfer	Stahl	Bentonit	Beton
Integrität von Barrieren	Mech. Versagen		Helium Druck (OKLO)	Römischer Zement		Archeologische Analoga	Archeologische Analoga	Orciatico	Hadrians Wall
	Korrosion, chemische Alterung	Island Basalte	Cigar Lake	Hadrians Wall	Totes Meer Bitumen	Kronan Cannon	Inchuthill nails	Cabo de Gata	Hadrians Wall
Nuklidfreisetzung	Auflösung	Island Basalte	Pena Blanca	Römische Quellen			Disko Island		Römische Quellen
	Auslaugung	Uran-Glas	Uranerz-lager	Maqarin					Römische Quellen
Nuklidmigration in Barrieren	Advektion			Römische Quellen				Gotland Bentonit	Römische Quellen
	Diffusion			Römische Quellen				Gotland Bentonit	
	Kolloidtransport								
	Zweiphasenfluss								
Nuklidrückhaltung in Barrieren	physikalisch			Römische Quellen	Oklo Bitumen			Dunarobba	Römische Quellen
	chemisch	Island Basalte		Römische Quellen			Sorption an Fe-oxiden	Cigar Lake	Römische Quellen

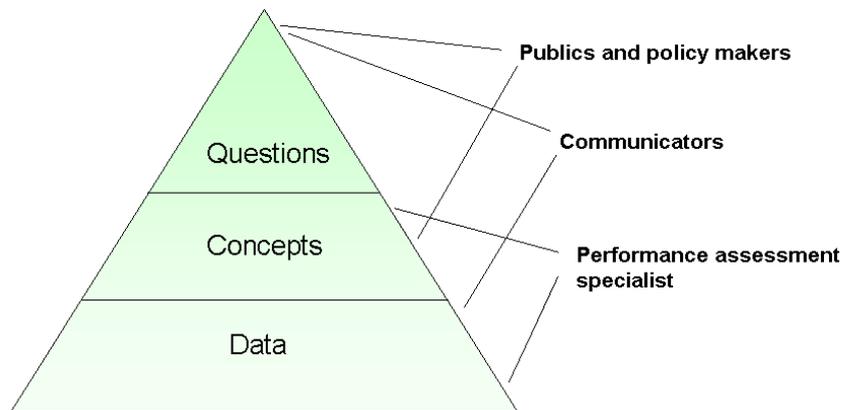


Abb. 2.21: Illustration zur Rolle von NA-Studien für den Dialog mit unterschiedlichen Stakeholdern

In den letzten Jahren wurde deutlicher herausgearbeitet, welche Rolle Analogstudien im Rahmen eines Safety Case spielen können (s. u.a. [44]). Diese Rolle ist natürlich stark davon abhängig, in welcher Phase der Endlagerplanung sich ein Land befindet. Generell können NA-Studien aber zu folgenden Aspekten beitragen:

- Vertrauen in das Endlagerkonzept allgemein: Das beste Beispiel hierfür ist der Standort Cigar Lake, wo ein Uranerzvorkommen (UO_2) vor mehr als einer Milliarde Jahren gebildet wurde und eingebettet in eine Tonformation, über der ein Aquifer verläuft, dort noch heute existiert. Diese geologische Struktur weist sehr große Ähnlichkeit zu Endlagerkonzepten in Ton oder Granit auf.
- Entwicklung konzeptueller Modelle: Als Beispiel hier ist das Maqarin-Analogon zu nennen, das zum Verständnis der Reaktionen alkalischer Lösungen mit dem Wirtsgestein geführt und die Langzeitstabilität auftretender Mineralphasen bestätigt hat.
- Überprüfung von Modellen: Hier sind z.B. Tracerprofile in Tonformationen zu nennen. Bei Kenntnis der Anfangs- und Randbedingungen können diese Profile zur Identifikation der dominierenden Transportprozesse (Diffusion) und zur Überprüfung der in PA verwendeten Diffusionsmodelle und Parameter herangezogen werden.
- Ermittlung von Daten und Unsicherheiten: Wichtige Studien sind hier beispielsweise Pena Blanca, wo ein Quellterm für UO_2 unter oxidierenden Bedingungen abgeleitet und als Variante in der TSPA Yucca Mountain verwendet wurde, bzw. Daten zu Kor-

rosionsraten von Stahl und Kupfer, die meist aus archäologischen Analoga gewonnen wurden. Häufig werden diese Raten als obere Grenzen für Parameter bzw. zur Bestätigung von Größenordnungen verwendet.

Zusammenzufassen ist, dass das NAnet-Projekt wesentliche Informationen aus NA-Studien aus der Literatur zusammengeführt hat. Über eine Matrixstruktur ist diese Information sehr viel leichter zugänglich sowohl für PA- als auch Kommunikationsexperten. Der von NAnet organisierte Workshop hat gezeigt, dass in vielen Ländern die Entwicklung eines Entsorgungsprogramms für radioaktive Abfälle voranschreitet und der Bedarf an den Ergebnissen des NAnet-Projekts groß ist. Es ist zu hoffen, dass ein Nachfolgeprojekt initiiert wird, um weitere, in NAnet nicht berücksichtigte, Studien aufzunehmen, die Arbeiten anderer Länder (z.B. Spanien, USA) zu integrieren und die Informationen in eine Datenbank zu überführen. Aufgrund der großen Bedeutung von NA-Studien für die Kommunikation sollten entsprechende Experten in ein zukünftiges Projekt involviert sein.

2.11.2 Beispiel eines Reviews *Title of Analogue Study: Dunarobba*

Description: Fossil forest trees, Dunarobba, Italy. The clay horizon which preserved the trees is the cream-coloured material in the middle ground (from Miller et al., 2000).



The Dunarobba forest, near Todi in central Italy, is an exceptional case of the natural preservation of wood by burial in clay. In the Dunarobba and Cava Topetti quarries, dead tree trunks can be found still in their original, upright position, indicating a stable burial environment with little mechanical disturbance of the trees. The soils and sediment they were growing in have been dated to the Upper Pliocene, making the trees ca. 2 million years old (Ambrosetti et al., 1992; Benvegnú et al., 1988).

Hydrogen, oxygen and carbon isotopic ratios measured on material sampled from the Dunarobba trees are very similar to those of modern plants, indicating that very little alteration to the organic material has taken place. This is supported by the fact that the wood can be sawn, polished and even burned.

In normal circumstances, if buried wood does not decompose completely, it is altered to lignite and is lithified. The trees at Dunarobba are enclosed in lacustrine clay lying beneath sand deposits with freely circulating, oxidising water. There is a large difference in hydraulic conductivity between the two materials, with the clay layer having a hydraulic conductivity in the range $2 \cdot 10^{-13}$ to $2 \cdot 10^{-10}$ m/s compared to an estimated hydraulic conductivity for the sand deposits of 10^{-4} m/s (Lombardi and Valentini, 1996). The wood has been protected from degradation or lithification by the impermeable clay envelope which had restricted ingress of oxygenated groundwater (Bozzano et al., 1996).

The clay at Dunarobba has clearly had a major role in retarding microbial degradation of the tree wood. Wood is analogous to the organic and cellulosic materials which may be placed in some L/ILW repositories. This analogue study suggests that if anaerobic conditions can be maintained, organic matter decomposition and thus gas generation would be minimised in a repository near-field.

The Dunarobba study examined the long-term breakdown of cellulosic materials in the fossil trees situated in their reducing environment. Organic leachates from samples of the Dunarobba wood were compared with leachates obtained from modern oak, oak from the Roman period and 150 million year old lignites (Chapman, 1990). The total organic carbon (TOC) content produced from the Dunarobba wood was comparable to the steady state values from cellulose breakdown in the modern oak sample. The TOC from the Dunarobba wood contained significant polymeric material. The isolation of the wood from oxidising conditions and advective water flow had significantly reduced the rate at which the wood degraded, thus minimising any gas generation and also the release of any organics that could be potential ligands for increased trace element migration.

The soluble breakdown products of cellulose (leachates) include organic molecules that can act as complexants for some of the poorly soluble radionuclides from the radioactive waste. Consequently, the products of cellulose degradation might increase radionuclide solubility in the repository. The effects of organic leachates from the Dunarobba wood on plutonium complexation and solubility were examined under controlled laboratory conditions. It was found that the Pu solubility increased from 10^{-11} M in NaOH to about 10^{-8} M in the leachate from the Dunarobba wood. If the cellulose degradation process was inhibited in a repository environment to the same extent observed at Dunarobba, then neither increased radionuclide solubility nor gas production would be significant problems.

Relevance: The study gives a clear demonstration of the long-term effectiveness of a natural clay barrier, and is an analogue of the potential long-term isolating capacity of a clay backfill in a repository. The Dunarobba trees are generally used as qualitative illustrations of the isolating capacity of clay in terms of compacted bentonite buffer in HLW repository designs. However, this may be unreasonable considering the relatively higher temperatures (ca. 100 C) that would be encountered in a buffer.

The Dunarobba trees also have relevance for L/ILW repository concepts, since the wood can be considered to be analogous to organic/cellulosic material, which can comprise a significant proportion of the waste.

Position(s) in the matrix tables: The Dunarobba study belongs to the Buffer/Backfill Bentonite Clay – Physical Integrity box and the Buffer/Backfill Bentonite Clay – Chemical Integrity box of the Near-field matrix table.

Limitations: Unfortunately, there is currently no detailed geochemical or mineralogical information to characterise the clay in detail.

The hydrolysis of bulk cellulose proceeds much more rapidly under alkaline conditions. However, Dunarobba does not mimic a cementitious L/ILW repository by having a hyperalkaline environment. Therefore the extremely slow rate of decomposition of the wood at Dunarobba may not be representative of the degradation behaviour of cellulose in cementitious repositories.

Quantitative information: The total organic carbon (TOC) content produced from leaching the Dunarobba wood was comparable to the steady state values from cellulose breakdown in a modern oak wood sample (Chapman, 1990), implying that there had been a negligible rate of cellulose degradation over a period of about 2 Ma.

Uncertainties: Full characterisation data on the sealant clay are not available.

Time-scale: The time-scale covered by the Dunarobba natural analogue is geological, involving about 2 Ma since the forest was buried.

PA/safety case applications: Previous uses of the analogue study in a PA or safety case include published reports by Nagra, SKB, ONDRAF and CEA.

The Yucca Mountain Project quotes Dunarobba in Table 4-1 (entitled 'Process Models and Natural Analogues') of its technical information report supporting the site recommendation (USDOE/OCRWM, 2002). It was used as an illustration of how well sorptive materials in a backfill can perform, by analogy with the preservation of ancient wood fibre seen at Dunarobba.

Communication applications: The study has provided graphic illustrations of the isolating capacity of clay. These illustrations are considered especially useful as non-technical demonstrations for a general public audience.

Current uses of the analogue study in communication and dialogue include:

Nagra e.g. see the website <http://www.nagra.ch/english/forsch/natur.htm>

In its 2nd Progress Report (AKEND, 2001), the Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte or AKEND, the Committee on repository site selection procedures for Germany, documents the current state of its discussions and activities. The AKEND Committee is part of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU). The second Progress Report presents interim, preliminary results as of August 2001 before the second public workshop held in September 2001, and included in it is a discussion and review of some selected natural analogue studies, including Dunarobba. This analogue was used to demonstrate the effectiveness of natural barriers. It would be interesting to know whether the public workshop revealed any feedback on the use of analogues in site selection procedures.

References:

AKEND (2001) 2nd Progress Report – State of Discussions. Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. August 2001

Ambrosetti P, Basilici G, Gentili S, Biondi E, Cerquaglia Z and Girotti O (1992) La Foresta Fossile di Dunarobba. Ediart, Todi, Italy.

Benvegnú, F, Brondi A and Polizzano C (1988) Natural analogues and evidence of long-term isolation capacity of clays occurring in Italy: contribution to the demonstration of geological disposal reliability of long-lived wastes in clay. CEC Nuclear Science and Technology Report, EUR 11896, CEC, Luxembourg.

Bozzano F, Lombardi S, Scarascia Mugnozza G, Valentini G (1996) Analysis of the geoenvironmental conditions as morphological evolution factors of the sand-clay series of the Tiber valley and Dunarobba forest preservation. Commission of the European Communities, Nuclear Science and Technology. Final Report. EUR 16929 EN.

Chapman NA (1990) Natural analogues. In: Côme B (editor) CEC project Mirage-Second phase on migration of radionuclides in the geosphere. Third (and final) summary progress report (work period 1989). CEC Nuclear Science and Technology Report, EUR 12858, CEC, Luxembourg.

Lombardi S and Valentini G (1996) The Dunarobba forest as natural analogue: analysis of the geoenvironmental factors controlling the wood preservation. In: von Maravic H and Smellie J (editors) Natural Analogue Working Group, Sixth Meeting, Santa Fe, September 1994. CEC Nuclear Science and Technology Report, EUR 16761, 127-133, CEC, Luxembourg.

Miller WM, Alexander WR, Chapman NA, McKinley IG and Smellie JAT (2000) Geological disposal of radioactive wastes and natural analogues. Lessons from Nature and Archaeology. Waste Management Series, Volume 2. 2000 Pergamon. Elsevier Science Ltd., Oxford.

USDOE/OCRWM (2002) Yucca Mountain Science and Engineering Report. Technical Information Supporting Site Recommendation Consideration. Revision 1. Report number DOE/RW-0539-1, February 2002.

Added value comments: The analogue is useful for communicating the idea that clay can be an effective isolation barrier. Having actual specimens of Dunarobba wood available at public meetings for hand examination would help engage some members of the audience.

Potential follow-up work: Any follow-up work that could be undertaken would focus on quantifying better the nature of the clay that had preserved the wood.

Keywords: wood, clay, bentonite, backfill, buffer

Reviewers and dates: Paul Hooker, Enviros Consulting (August, 2003)

2.12 Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit von Endlagern in Salz- und Granitformationen

Bisherige Sicherheitsanalysen in Deutschland wurden hauptsächlich für Endlager in Salzformationen durchgeführt. Im Projekt "Spent Fuel Performance Assessment" wurde erstmals ein Instrumentarium für Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager in Kristallgestein entwickelt und auf ein generisches deutsches Endlager angewendet [57]. Die konkreten Barrierenkonzepte und die relevanten Prozesse in Nah- und Fernfeld des Endlagers hängen wesentlich vom Wirtsgestein ab. In dieser Studie sollen anhand von ausgewählten Modellrechnungen für generische Endlager in Salzgestein und Granit Unterschiede in der Auswirkung einzelner Prozesse aufgezeigt werden.

Es wird ein Endlager mit abgebrannten Brennelementen betrachtet. Das zugrunde gelegte Inventar beruht auf Abschätzungen zu abgebranntem UO_2 - und MOX-Brennstoff, der insgesamt in der Bundesrepublik Deutschland anfallen wird. Es wird angenommen, dass Kokillen vom Typ BSK3 mit Brennstäben aus je drei Brennelementen in vertikale Bohrlöcher eingebracht werden. Im Granit wird eine Kokille pro Bohrloch, im Salz werden 55 Kokillen pro Bohrloch eingebracht. Eine ausführliche Darstellung dieser Studie mit detaillierter Beschreibung der Behälterkonzepte und Ergebnisse befindet sich in [40].

Bei einem Endlager im Granit kommt es bei einer normalen Entwicklung nach Wiederaufsättigung der Nahfeldbarrieren auf jeden Fall zu einem Wasserzutritt zu den Abfällen und langfristig zur Mobilisierung der Radionuklide aus den Abfällen. Dieses Szenario wird für den Referenzfall zugrunde gelegt und entspricht dem in [57] beschriebenen. Bei einer normalen Entwicklung eines Endlagers im Salz werden dagegen alle aufgefahrenen Hohlräume nach einer bestimmten Zeit durch die Konvergenz wieder verschlossen. Auf diese Weise wird ein Wasserzutritt zu den Abfällen und damit auch die Freisetzung der Radionuklide für lange Zeiten verhindert. Um Effekte bei einer Radionuklidfreisetzung vergleichen zu können, wird beim Endlager im Salz als Referenzfall ein Störfall-Szenario mit einem Wasserzutritt aus dem Deckgebirge nach 100 Jahren betrachtet (vgl. [13]).

2.12.1 Ergebnisse der Referenzfälle

In den Abbildungen 2.22 und 2.23 ist die Strahlenexposition in der Biosphäre mit den Beiträgen der dosisbestimmenden Radionuklide für die Referenzfälle im Granit und Salz dargestellt. Im Granit tragen bis zu einer Million Jahre nur die Spalt- und Aktivierungspro-

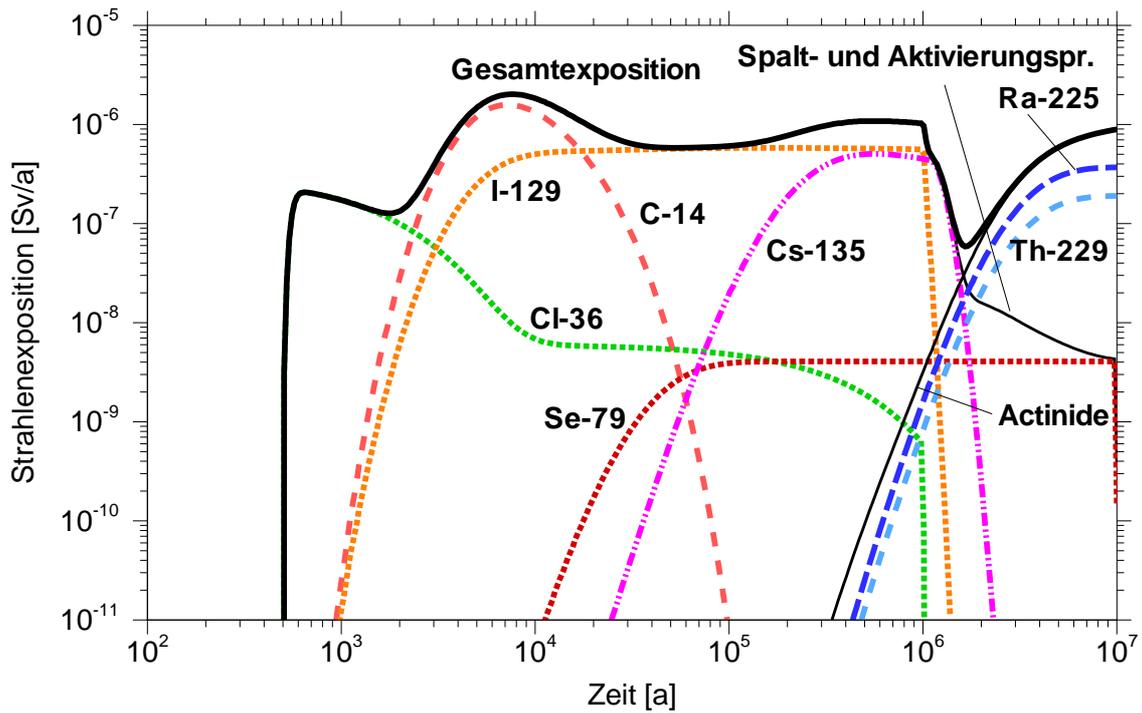


Abb. 2.22: Strahlenexposition und Beiträge wichtiger Nuklide für ein Endlager im Granit bei einer normalen Entwicklung

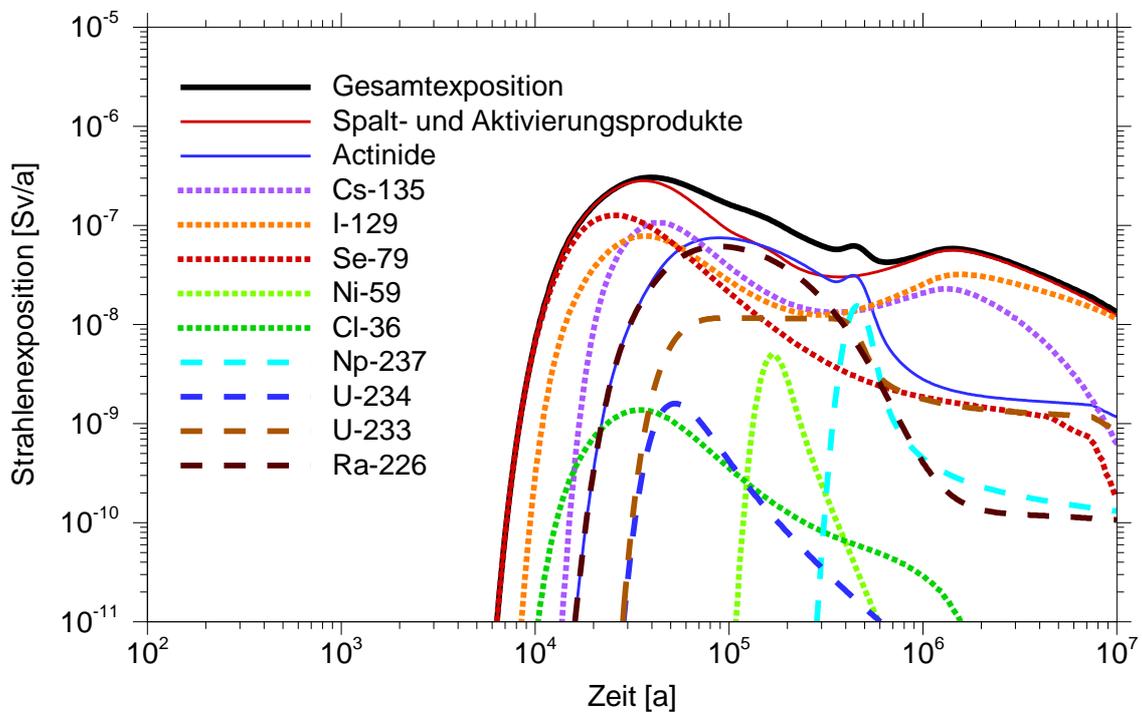


Abb. 2.23: Strahlenexposition und Beiträge wichtiger Nuklide für ein Endlager im Salz bei einem Störfall-Szenario

dukte mit Cl-36, C-14, I-129 und Cs-135 wesentlich zur Strahlenexposition bei, während erst nach einer Million Jahre Actiniden bestimmend werden. Dies liegt an einer starken Rückhaltung der Actiniden durch Sorption am Bentonit und insbesondere durch Matrixdiffusion und Sorption im Granit. Im Granit tritt die früheste Strahlenexposition nach etwa 500 Jahren auf. Sie wird von dem nicht sorbierenden Radionuklid Cl-36 verursacht, das zu einem erheblichen Anteil instantan mobilisiert wird, dessen Diffusion durch den Bentonit nahezu keine Verzögerung bewirkt und dessen Transport durch den Granit sehr schnell verläuft. Entsprechend tritt das Maximum für Cl-36 schon wenige Jahre nach dem Ausfallzeitpunkt der Behälter von 500 Jahren nach Ende der Betriebsphase auf.

Im Gegensatz dazu spielen im Salz die Actiniden Ra-226, U-233 und Np-237 schon ab 50 000 Jahren eine wichtige Rolle. In den ersten 40 000 Jahren wird die Strahlenexposition durch Se-79 bestimmt, wobei das Maximum nach ca. 25 000 Jahren erreicht wird. Gegenüber dem Granit wird das Auftreten der Strahlenexposition auch für sehr mobile Radionuklide, wie I-129, durch Transportprozesse im Grubengebäude und den Transport im Fernfeld stärker verzögert. Die wichtigere Rolle der Actiniden resultiert hauptsächlich daraus, dass die Sorptionswerte für die sandigen Aquifere im Deckgebirge des Salzstocks niedriger liegen als die für die verwitterte Granitmatrix und dort zusätzlich die Matrixdiffusion mit Sorption für stark sorbierende Radionuklide zu einer noch stärkeren Rückhaltung führt.

2.12.2 Parametervariationen

Um die Auswirkungen einzelner Effekte in den beiden Formationen genauer zu untersuchen, wurden Parametervariationen durchgeführt. Dabei wurde gegenüber dem Referenzfall jeweils ein Parameter variiert, alle anderen wurden beibehalten. Die für das Nahfeld durchgeführten Variationen beziehen sich auf die Mobilisierung der Nuklide aus den Abfallgebänden.

- *Matrixzerfallsrate*: Variation der Mobilisierungsrate aus der Brennstoffmatrix:
 - Erhöhung der Rate um den Faktor 10 (*mdrate+*)
 - Verminderung der Rate um den Faktor 100 (*mdrate-*)
- *Inventarverteilung*: Variation des Inventaranteils der Nuklide im Gasraum (*instant release fraction*, IRF):
 - Erhöhung des Inventars des IRF um den Faktor 2 (*IRF+*)

- Verminderung des Inventars des IRF um den Faktor 2 (*IRF-*)
- *Standzeit*: Variation der Behälterstandzeit:
 - Erhöhung der Standzeit um den Faktor 10 (*lftime+*)
 - Verminderung der Standzeit um den Faktor 10 (*lftime-*).

Bei den Variationen bezüglich des Fernfeldes wird der Einfluss der Geschwindigkeit im Aquifer untersucht.

- *Aquifer*: Fließgeschwindigkeit im Deckgebirge:
 - Erhöhung der Fließgeschwindigkeit um den Faktor 10 (*flow+*)
 - Verminderung der Fließgeschwindigkeit um den Faktor 10 (*flow-*)

Neben diesen Variationen wird der Ausfall des Barrierensystems im Nahfeld und der vollständige Ausfall der Barrierenwirkung der Geosphäre betrachtet.

- Nahfeld: sorptionsfreier und stark beschleunigter Transport; sehr hohe Durchlässigkeit von Verschlüssen (*no nearfield*)
- Fernfeld: Einstrom der Nuklide aus dem Nahfeld in die Biosphäre (*no farfield*)

Die sich aus den Variationen ergebenden Strahlenexpositionen sind in den Abbildungen 2.24 und 2.25 dargestellt. Eine detaillierte Auswertung der Parametervariationen ist in [40] enthalten. An dieser Stelle sollen nur die wichtigsten Effekte beschrieben werden.

Ein Ausfall der Barrierensysteme im Nahfeld führt bei beiden Formationen gegenüber dem Referenzfall zu einer Erhöhung der maximalen Strahlenexposition um ca. eine Größenordnung. Im Salz tritt die Strahlenexposition früher als im Referenzfall auf, da die Transportverzögerung im Nahbereich entfällt. Dies ist im Granit nicht der Fall, da das Nahfeld auch im Referenzfall den Transport nicht sorbierter Nuklide nicht verzögert. Während sich der Ausfall der Nahfeldbarriere im Salz über eine Million Jahre auswirkt, erreicht im Granit die Strahlenexposition nach ca. 20 000 Jahren das Niveau des Referenzfalls.

Der Ausfall der Barrierenwirkung der Geosphäre hat für beide Formationen die größten Auswirkungen. Über den gesamten Modellierungszeitraum ist die Strahlenexposition gegenüber dem Referenzfall erhöht. Im Granit tritt eine Erhöhung der maximalen Strahlenexposition um etwa 2,5 Größenordnungen auf. Dies wird durch Ra-226 als Tochternuklid in der Uranzerfallsreihe bewirkt. Grund dafür ist die fehlende Barrierenwirkung der Ma-

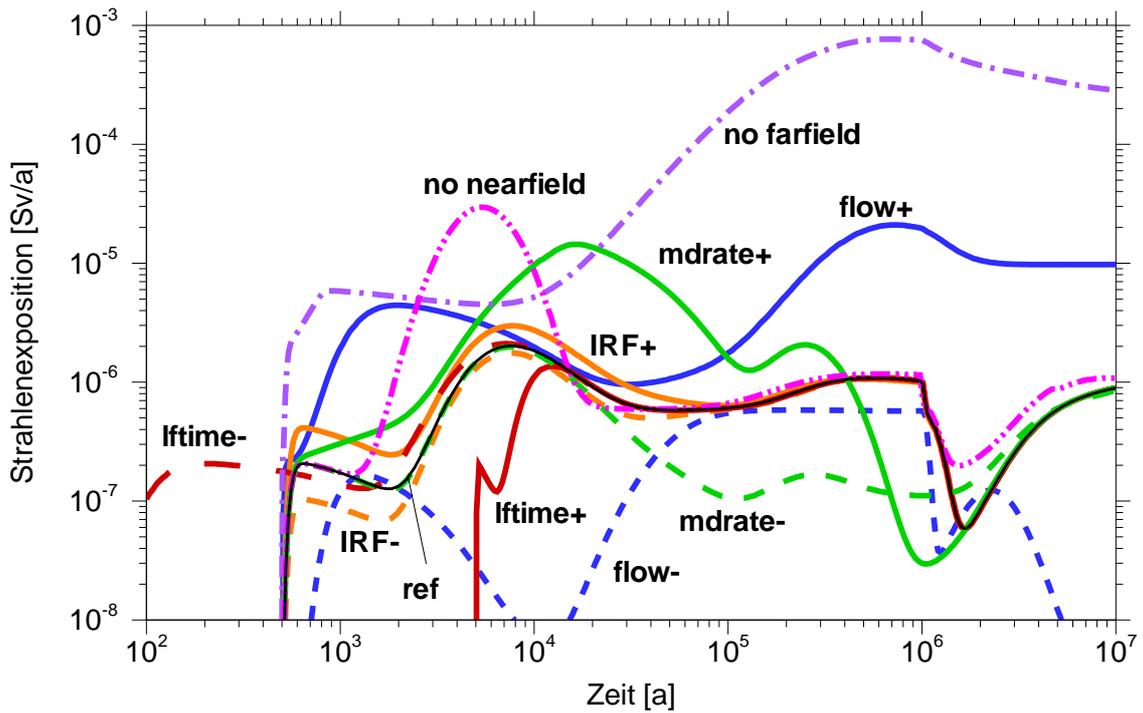


Abb. 2.24: Parametervariationen für ein Endlager im Granit für die normale Entwicklung

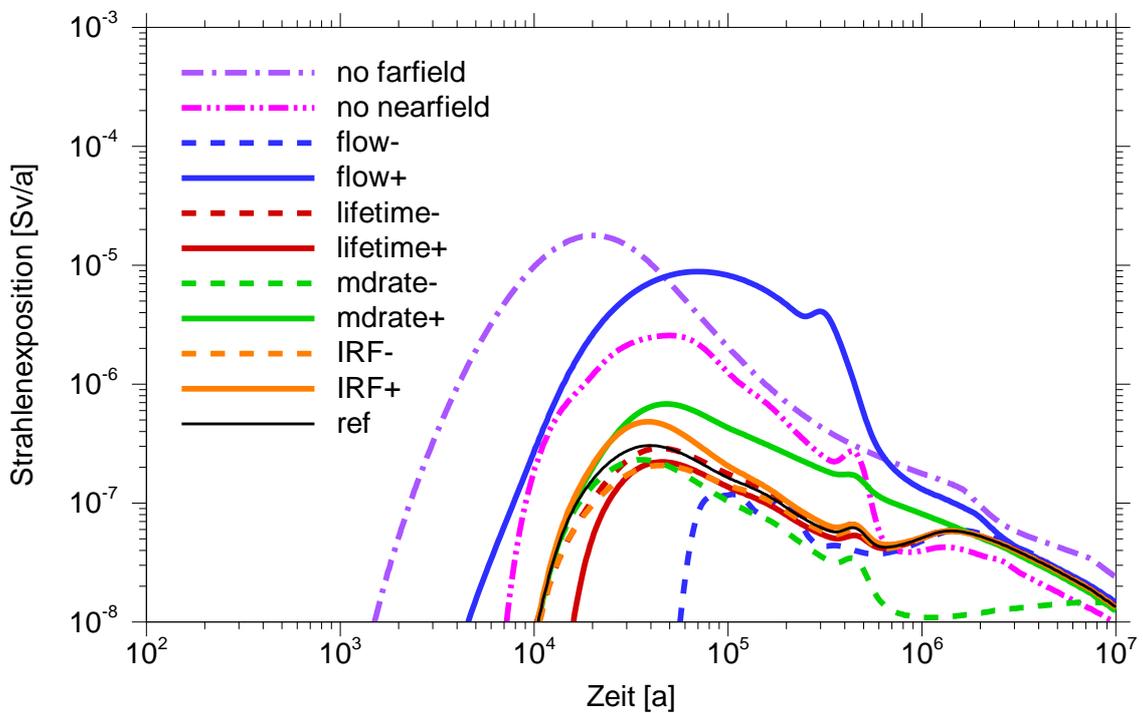


Abb. 2.25: Parametervariationen für das betrachtete Störfallszenario für ein Endlager im Salz

trixdiffusion mit Sorption für die Actiniden. Das frühere Auftreten von U-234 und Th-230 in der Biosphäre hat dann eine erhöhte Dosis durch das Tochternuklid Ra-226 zur Folge. Der Zeitpunkt des ersten Auftretens der Strahlenexposition wird kaum beeinflusst und zeigt, dass das Fernfeld des Granits nur eine sehr geringe Barrierenwirkung für die nicht bzw. schwach sorbierten Radionuklide hat. Dies ist im Fall des Salzes anders; hier weist die Geosphäre auch für schwach sorbierte Radionuklide eine gewisse Barrierenwirkung auf. Entsprechend tritt die maximale Strahlenexposition früher auf. Sie liegt um knapp 2 Größenordnungen höher als im Referenzfall.

Die Einflüsse durch die Variation des Quellterms sind bei dem Endlager im Granit stärker als im Salz. Beim Granit führt eine beschleunigte Mobilisierung durch Erhöhung des Inventaranteils in der IRF bzw. durch die schnellere Zersetzung der Brennstoffmatrix zur Erhöhung der Strahlenexposition. Ebenso verursacht eine kürzere Behälterstandzeit ein früheres Auftreten der Strahlenexposition. Da bei einem Endlager im Salz Transportprozesse im Grubengebäude die Radionuklidfreisetzung verzögern und im Referenzfall erst nach ca. 740 Jahren kontaminierte Lösung aus dem Nahfeld in die Geosphäre gelangt, wirken sich eine schnellere Freisetzung, bzw. verkürzte Behälterstandzeit dagegen nur geringfügig aus.

Einen großen Einfluss hat auch die Fließgeschwindigkeit im Fernfeld. Bei beiden Formationen führt eine um eine Größenordnung erhöhte Fließgeschwindigkeit zu einer Erhöhung der maximalen Strahlenexposition um etwa eine Größenordnung. Im Fall des Granits führt der schnellere Transport des C-14 zu einer Erhöhung der Strahlenexposition zu frühen Zeiten. Die maximale Strahlenexposition wird aber bei beiden Formationen durch Ra-226 bestimmt, da der Transport von Uran und Thorium entsprechend beschleunigt ist.

2.12.3 2D-Modellierung des Radionuklidtransports im Deckgebirge Salz

Für das Deckgebirge über einem Salzstock wurden zusätzlich Ausbreitungsrechnungen mit dem Transportprogramm r^3t durchgeführt. Dabei wurde der Transport durch ein zweidimensionales Modellgebiet betrachtet. In Abbildung 2.26 ist das Modellgebiet dargestellt. Es besteht aus Aquifer-, Aquiclude- und Aquitardgebieten. Im ersten Schritt wurde mit dem Rechenprogramm d^3f ein Strömungsfeld berechnet. Das stationäre Strömungs-

feld wurde dann in r^3t eingelesen und anschließend der Transport für ausgewählte Radionuklide berechnet. Eine ausführliche Beschreibung inklusive aller verwendeten Parameter ist in [40] enthalten.

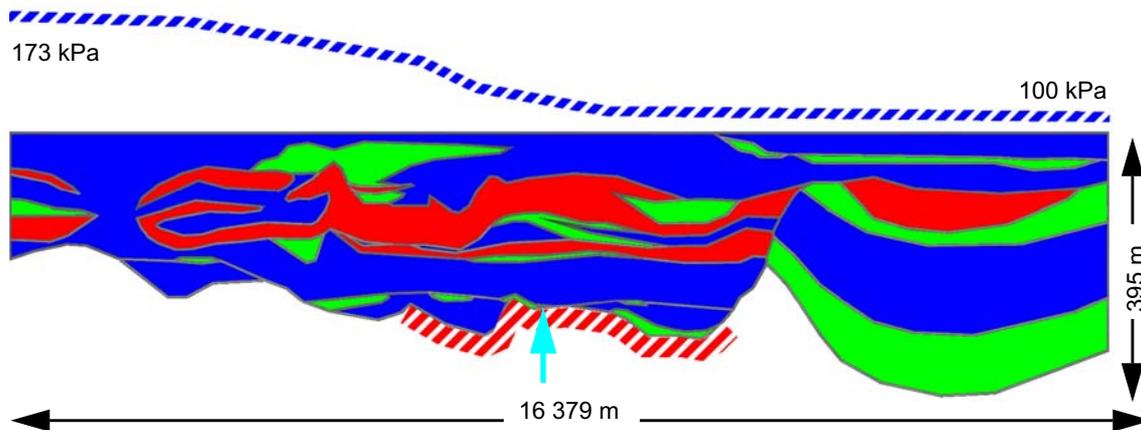


Abb. 2.26: 2d-Modell für das Deckgebirge über einem Salzstock. Aquifere sind blau, Aquicluden rot und Aquitarden grün dargestellt. Der Kontakt zum Salzstock ist rotweiß gestreift der Verlauf der Standrohrspiegelhöhe blauweiß gestreift angegeben. Der hellblaue Pfeil markiert die punktförmige Radionuklidquelle

Für den Radionuklidtransport wurde ein punktförmiger Einstrom aus dem Salzstock angenommen (s. Abb. 2.26). In der Transportrechnung wurden 28 Radionuklide berücksichtigt. Die Aquitard-, Aquiclude- und Aquifergebiete unterscheiden sich in der Porosität und in den Rückhaltedaten für die Radionuklide. Die Rückhaltung wurde über eine lineare Gleichgewichtssorption modelliert. Ein Einfluss der Salinität auf die Sorption wurde nicht berücksichtigt.

Beispielhaft sind in Abbildung 2.27 die Konzentrationsprofile für I-129 und Np-237 dargestellt. In der Abbildung ist das Modellgebiet jeweils nur bis zum linken Rand der Kontaktfläche zum Salzstock dargestellt. Die Sorptionswerte von I-129 sind mit $0,002 \text{ m}^3/\text{kg}$ sowohl für den Aquifer (Sand) als auch für Aquiclude und Aquitard (Schluff und Ton) gering. Np-237 weist im Aquifer mit $0,01 \text{ m}^3/\text{kg}$ einen mittleren und in Aquiclude/-tard mit $0,3 \text{ m}^3/\text{kg}$ einen hohen Sorptionswert auf.

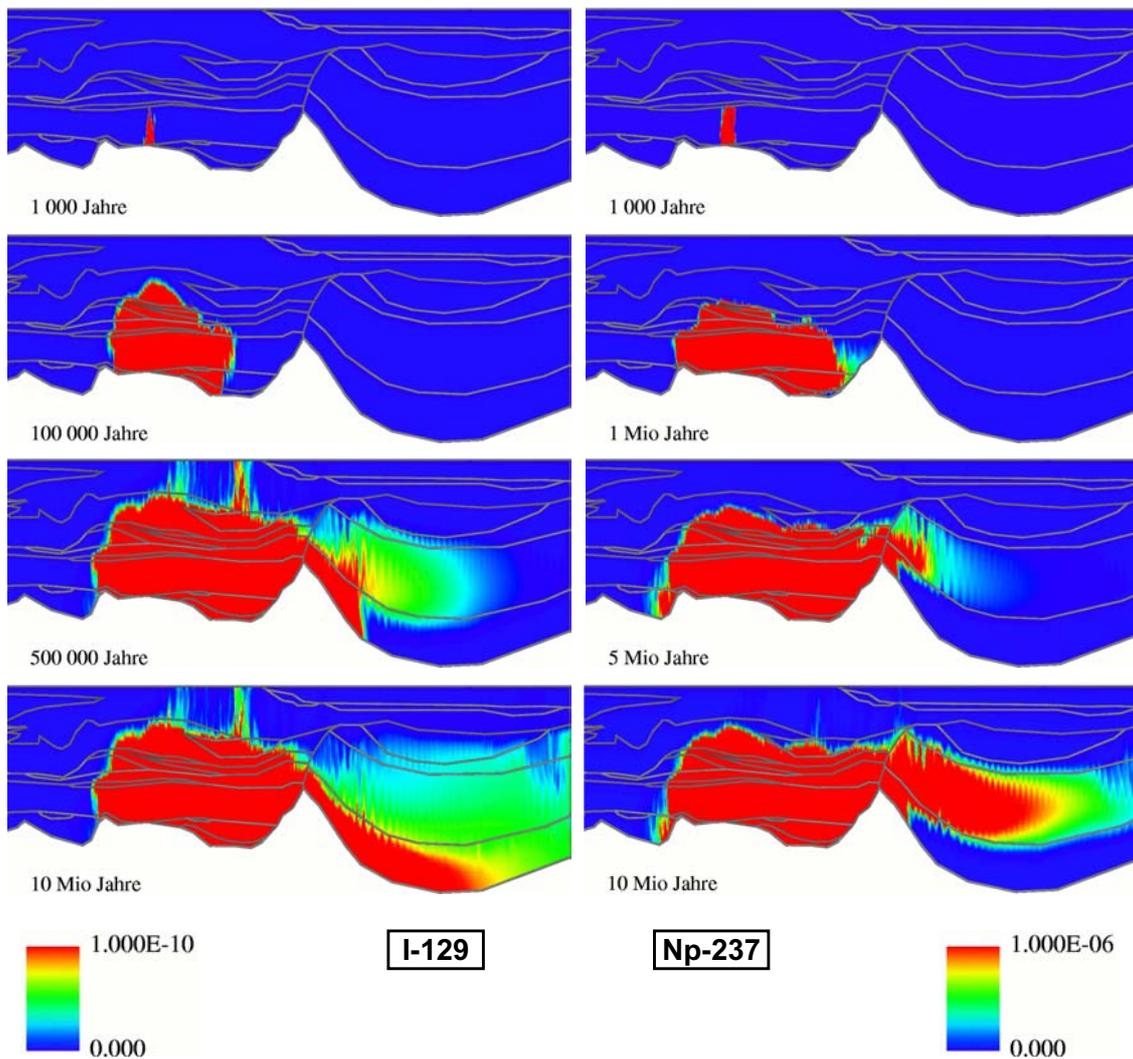


Abb. 2.27: Konzentrationsprofile [Bq/m³] von I-129 (links) und Np-237 (rechts) zu ausgewählten Zeitpunkten

Anhand der dargestellten Zeitpunkte ist zu erkennen, dass die Transportgeschwindigkeit und die Transportwege von den Sorptionseigenschaften abhängen. Der Transport von I-129 erfolgt aufgrund seines geringen Sorptionswerts schneller. Da sich die Sorptionswerte von Iod in den verschiedenen Gebieten nicht unterscheiden, erfolgt seine Ausbreitung zu einem gewissen Anteil auch vertikal durch die Aquiclud- und Aquitardbereiche. Dieser Transportweg ist bei Np-237 durch seinen hohen Sorptionswert in Aquiclud- und Aquitard nur von untergeordneter Bedeutung. Noch deutlicher zeigt sich der Effekt der unterschiedlichen Sorptionseigenschaften zu späteren Zeitpunkten bei der Ausbreitung im rechten Teil des Modellgebiets. Für I-129 erfolgt die Hauptausbreitung nach einigen 100 000 Jahren horizontal durch die unterste Schicht, einen Aquitard. Im Gegensatz

dazu ist der Transport von Np-237 in dieser Schicht aufgrund des hohen Sorptionswerts stark verzögert und die Ausbreitung erfolgt (nach einigen Mio Jahren) hauptsächlich im darüberliegenden Aquifer.

An diesem Beispiel sollte auch die Vorgehensweise bei einem zukünftigen Safety Case demonstriert werden. Für die Ausbreitung im Fernfeld ist es wichtig, zuerst eine zwei- bzw. dreidimensionale Ausbreitungsrechnung für alle Radionuklide mit aktualisierten Daten durchzuführen. Dabei ist zu überprüfen, ob für alle Radionuklide der gleiche Ausbreitungsweg relevant ist oder ob sich Ausbreitungswege einzelner Radionuklide in Abhängigkeit der Sorptionseigenschaften unterscheiden. Ebenso wichtig ist es, die Schnittstelle zwischen Fernfeld und Biosphäre festzulegen. Es ist durchaus möglich, dass die Radionuklidkonzentrationen einzelner Nuklide an unterschiedlichen Orten in oberflächennahen Aquiferen ihre größten Konzentrationen aufweisen. Erst nach Klärung dieser Fragestellungen ist die Abstraktion und Erstellung eines eindimensionalen Transportmodells möglich.

3 Verfolgung internationaler Aktivitäten

3.1 IGSC

Die Integration Group for the Safety Case (IGSC) hat als Nachfolgeorganisation von PAAG und SEDE im Jahr 2000 seine Arbeit aufgenommen. Die IGSC ist eine Arbeitsgruppe des RWMC der OECD-NEA, die die Weiterentwicklung, Bewertung und Diskussion von Safety Cases zum Inhalt hat. Im Mittelpunkt ihrer Arbeit stehen:

- die Planung und Entwicklung von Endlagern für langlebige radioaktive Abfälle
- Systemanalysen für Endlager und technologische Fortschritte
- Vertrauensbildung in Safety Cases für Endlager und Weiterentwicklung der wissenschaftlichen Grundlagen und Methoden eines Safety Case
- Erstellung / Diskussion von Arbeitsprogrammen für die Entwicklung von Endlagern

Die Arbeit der IGSC gliedert sich in sogenannte Kernaktivitäten, technische Aktivitäten und kooperative Projekte. Zu den Kernaktivitäten gehören derzeit Arbeiten die direkt mit dem Safety Case zu tun haben und eine Initiative zum "Handling of Timescales". Zum Safety Case wurde von der IGSC ein grundlegender NEA-Bericht publiziert, in dem die wesentlichen Elemente eines Safety Case dargestellt sind [67].

Zu den technischen Aktivitäten wurden zwei längerfristige Projekte initiiert, die Rolle von technischen Barrieren (EBS) im Safety Case und das AMIGO-Programm. Zum Thema EBS sollen insgesamt vier Workshops stattfinden, um alle Aspekte der technischen Barrierensysteme bei einem Sicherheitsnachweis speziell im Kontext des Safety Case zu beleuchten. Ein erster Workshop fand 2003 in Turku, Finnland, zum Thema Anforderungen und Beschränkungen beim Design technischer Barrierensysteme statt. Die Proceedings des Workshops enthalten Empfehlungen zur Vorgehensweise bei Entwicklung und Design von technischen Barrieren in Endlagern und Hinweise, wie auch Anforderungen verschiedener Stakeholder in den Entscheidungsprozess integriert werden können. Ein zweiter Workshop unter dem Titel "Process Issues" fand 2004 in Las Vegas statt, mit den Schwerpunktthemen, auf welche Weise EBS-Prozesse als wichtig identifiziert werden, wie sie bei Entwicklung und Design sowie in Langzeitsicherheitsanalysen berücksichtigt werden und in welcher Form sie systematisch, vertretbar und transparent dargestellt werden können.

Im Anschluss an die von der OECD/NEA durchgeführten GEOTRAP-Workshops hat die IGSC die Nachfolgeveranstaltung "Approaches and Methods for Integrating Geologic Information in the Safety Case" (AMIGO) ins Leben gerufen. AMIGO soll ebenso wie GEOTRAP in Form von Workshops durchgeführt werden, die etwa im Abstand von zwei Jahren stattfinden. Ein Ziel dieser Veranstaltung ist es, das Verständnis zum Verhalten der Geosphäre als wichtige Barriere im Endlagersystem zu erhöhen und die Kommunikation zwischen den beteiligten Ländern zu unterstützen. Dies soll durch einen Austausch von Informationen und Diskussionen darüber, wie Informationen zur Geosphäre (geophysikalische, hydrogeologische, geochemische, strukturelle) in Auswahl und Design von Endlagern, in Modelle für Langzeitsicherheitsanalysen und in den Safety Case einfließen, erfolgen. Das beinhaltet die Rolle von Methoden zur Ermittlung geologischer Daten, alternative und umfassende Interpretationsmethoden, Entwicklung konzeptueller Modelle für die Geosphäre, Vertrauensbildung in numerische Systemanalysen durch geeignete Argumente und die Präsentation der Behandlung der Geosphäre im Safety Case für eine breitere Öffentlichkeit.

Der erste Workshop dieser Serie fand im Jahr 2003 in Yverdon-Les-Bains statt. Schwerpunkt dieses Workshops war Vertrauensbildung durch "multiple lines of evidence", wobei die Studie Opalinuston der NAGRA im Mittelpunkt stand. Die Ergebnisse sind als Proceedings zum Workshop erschienen [NEA 03].

Zu der dritten Gruppe, den kooperativen Projekten gehören der Clay Club, die Thermodynamische Datenbasis (TDB) und das Sorptionsprojekt Phase II. Diese Projekte sind ausführlich in den Kapiteln 2.5.1, 3.6 und 3.7 beschrieben.

3.2 IPAG

Die "Working Group on Integrated Performance Assessments of Deep Repositories" (IPAG) wurde von der PAAG (Vorläufer der Arbeitsgruppe IGSC) im Jahr 1994 einberufen. Ihre Aufgabe lag in der Untersuchung des erreichten allgemeinen Stands und spezieller Fragestellungen zu Performance Assessments (PA). Sie hat ihre Arbeit in drei Phasen durchgeführt:

Phase 1 (1995 - 1996): Untersuchung von 10 aktuellen integrierten PAs. Teilnehmer von Antragstellerseite,

Phase 2 (1997 - 1999): Untersuchung von 10 aktuellen integrierten PAs. Teilnehmer von Genehmigungsbehörden,

Phase 3 (1999 - 2000): Thema: Vertrauensbildende Maßnahmen. Teilnehmer von Antragstellerseite und Genehmigungsbehörden.

Über die Arbeiten der 1. Phase ist in [76] berichtet worden, die Ergebnisse sind im NEA-Bericht [73] dargestellt. An der 2. Phase hat von deutscher Seite das Bundesamt für Strahlenschutz mit der Studie zum Endlager Konrad teilgenommen. Die Ergebnisse der 2. Phase sind umfassend im NEA-Bericht [71] zusammengefasst. Im Folgenden werden die Ergebnisse der 3. Phase dargestellt. Mit der dritten Phase ist die Arbeit von IPAG beendet.

Von deutscher Seite nahmen das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) und die GRS Köln mit Studien zum Endlager Konrad sowie die GRS Braunschweig mit einer Studie zum Endlager Morsleben (ERAM) teil. Wie in den vorangegangenen Phasen von IPAG wurde zu Beginn ein Fragenkatalog erarbeitet und an die teilnehmenden Organisationen verschickt. Diese Fragen wurden von insgesamt 20 Organisationen beantwortet. Auf einem Plenartreffen in Toronto im Mai 2000 wurden die Kernthemen der 3. Phase diskutiert und der Abschlussbericht [69] als Entwurf erarbeitet. Von einer kleineren Arbeitsgruppe wurde der Abschlussbericht überarbeitet und im Jahr 2001 fertiggestellt.

Thema der 3. Phase waren vertrauensbildende Maßnahmen bei der Durchführung und Präsentation von Sicherheitsanalysen. Es wurde gezeigt, dass vertrauensbildende Argumente im Vorfeld oder während der Durchführung von Sicherheitsanalysen erarbeitet und dass diese Argumente sorgfältig berichtet werden müssen. Durch frühzeitiges Einreichen eines Plans mit den vorgesehenen Arbeiten kann beispielsweise erreicht werden, dass Kritik bereits vorab eingebracht werden kann.

Der Begriff "Vertrauen" ist im Kontext einer Sicherheitsanalyse schwer zu fassen. Es wurde vorgeschlagen, eine eigene Definition des Begriffs zu verwenden, die sich von der Definition im NEA-Bericht [72] unterscheidet. Nach der neuen Definition geht es um Vertrauen (confidence) und nicht um Zusicherung (assurance). Das heißt, es ist wesentlich, dass man von den vertretenen Standpunkten selbst überzeugt ist.

Zur Entwicklung eines Endlagers in tiefen Formationen ist ein schrittweises Vorgehen erforderlich. Bei jedem Schritt müssen vertrauensbildende Maßnahmen ergriffen und kommuniziert werden. Dadurch ist es möglich, nach jedem Schritt eine fundierte Entscheidung zu treffen, wie das Verfahren weiter fortgesetzt wird und ob Korrekturen an der geplanten weiteren Vorgehensweise notwendig sind. Wesentlich ist dabei die Berücksichtigung sowohl technischer als auch sozialer Argumente.

Zentraler Bestandteil einer Sicherheitsanalyse ist die Entwicklung des "safety case", der dann Thema der integrierten Sicherheitsanalyse (IPA) ist. Es gibt zwei Arten von Vertrauen in eine Sicherheitsanalyse, einerseits das Vertrauen in die Analyse selbst und andererseits in die Wahl des Endlagerstandorts. Beide sind Bestandteil des "safety case". Es reicht nicht aus, nur die Sicherheit eines Standorts nachzuweisen; dieser Nachweis ist vielmehr ein notwendiger Bestandteil der Überzeugungsarbeit.

Der Abschlussbericht von IPAG-3 enthält Vorschläge für vertrauensbildende Maßnahmen und Vorschläge, welche Fehler vermieden werden sollten. Generell wird ein ganzheitlicher Ansatz empfohlen, um Vertrauen zu bilden und zu kommunizieren. Die NEA-Arbeitsgruppe IGSC wird die weiteren Entwicklungen auf diesem Gebiet verfolgen, wobei Reviews von aktuellen Performance Assessments ("safety cases") geplant sind.

3.3 GEOTRAP

Das von der IGSC der OECD/NEA getragene Projekt GEOTRAP hat Fragestellungen zum Radionuklidtransport in der Geosphäre zum Inhalt. Das Projekt wurde seit 1996 in Form von jährlichen Workshops zu übergeordneten Themen durchgeführt. Mit dem letzten Workshop „Radionuclide Retention in Geologic Media“ wurde das Projekt im Jahr 2001 abgeschlossen. Die Ergebnisse dieses Workshops werden im folgenden zusammengefasst.

Ziel des Workshops war es, den Stand des Wissens über Rückhalteprozesse von Radionukliden in natürlichen Systemen aufzuzeigen. Dabei sollten insbesondere die auf Prozessebene verwendeten Modelle zur Beschreibung der Rückhalteprozesse und die Umsetzung der Ergebnisse in Modellansätze für Langzeitsicherheitsanalysen betrachtet werden.

Es wurde zwischen den Prozessen Sorption, Matrixdiffusion, kolloidgetragener Radionuklidtransport und Immobilisierung unterschieden. Im ersten Teil des Workshops wurden diese Prozesse in technischen Sitzungen – Vorträgen und Posterpräsentationen – beleuchtet. Im Anschluss daran wurden die Themen noch einmal in vier Arbeitsgruppen diskutiert. Von Seiten der GRS wurde mit zwei Beiträgen zum kolloidgetragenen Radionuklidtransport Noseck, U.; Klotz, D.: Modelling of Colloid Facilitated Contaminant Transport with the Computer Code TRAPIC: Theoretical Basis and Application, 5th GEOTRAP Workshop, Äspö, 07.-09. May 2001. OECD/NEA, Paris 2002.] und zur Untersuchung von Rückhalteeffekten in natürlichen Systemen Laciok A.; Hercik, M.; Noseck, U.; Brasser, T.: Immobilization and Retention Processes of Uranium in Tertiary Argillaceous Sediments (Czech Republic). 5th GEOTRAP Workshop, Äspö, 07.-09. May 2001. OECD/NEA, Paris.] an dem Workshop teilgenommen.

3.3.1 Sorption

Zur Adsorption von Radionukliden an Sedimentoberflächen liegen zahlreiche Ergebnisse aus Labor-, Feldversuchen und Studien zu natürlichen Analoga vor. In den letzten Jahren wurden besonders bei der Ermittlung von Oberflächenspezies und Stöchiometrien von Oberflächenreaktionen durch Anwendung hochauflösender Oberflächenspektrometrie (z.B. EXAFS) erhebliche Fortschritte erzielt. Zur Beschreibung der Sorption existieren bisher

- phänomenologische Ansätze wie Kd-Konzept und nichtlineare Sorptionsisotherme,
- semi-empirische Ansätze zur Beschreibung der Abhängigkeit des Kd-Werts von der Lösungsschemie und
- mechanistische Modelle, die die Bildung von Oberflächenspezies auf Mineraloberflächen im Detail auf Basis thermodynamischer Beziehungen beschreiben.

Die Sorption einiger Radionuklide an reinen Mineralsystemen lässt sich mit mechanistischen Modellen schon gut beschreiben. Bei den komplexen natürlichen Systemen existieren dagegen noch große Unsicherheiten in den Modellen hinsichtlich der Beschaffenheit der Mineraloberflächen, die beispielsweise mit dünnen Schichten organischer Verbindungen überzogen sein können, sowie der Eigenschaften der elektrischen Doppelschichten (s. auch Kap.3.7). Modellansätze zur Kinetik sind bisher wenig entwickelt. Hier existieren hauptsächlich empirische Beziehungen.

Generell ist aber ein gutes Verständnis über die Sorption von Radionukliden über einen weiten Bereich von geochemischen Bedingungen vorhanden. In Langzeitsicherheitsanalysen werden auch in den nächsten Jahren weiterhin Kd-Werte verwendet. Die Weiterentwicklung mechanistischer Modelle für natürliche Systeme ist wünschenswert, wird aber noch einen längeren Zeitraum beanspruchen. Semiempirische Modelle können schon jetzt dazu dienen, Kd-Werte abzusichern. Für kleinräumige Ausbreitungsrechnungen werden sie bereits in gekoppelten Codes verwendet. Als vordringlich zu untersuchende PA-relevante Sorptionssysteme wurden identifiziert:

- Sorption von Iod,
- Sorption von organischen Actinid- und Actinid-Carbonat-Komplexen,
- Untersuchung spezifischer Systembedingungen wie Bedingungen in Endlagern mit großem Anteil zementhaltiger bzw. organischer Abfälle.

3.3.2 Matrixdiffusion

Als Matrixdiffusion bezeichnet man den Transport von Schadstoffen aus Fluiden in advektiv dominierten Bereichen in die Bereiche immobilier Porenwässer. Der Transport erfolgt diffusiv. Aus den immobilen Porenwässern erfolgt eine Sorption des Schadstoffs an der Matrix. Viele Feldexperimente und detaillierte Probenuntersuchungen in geklüfteten Medien deuten auf die Existenz der Matrix-Diffusion hin. Die Relevanz der Matrixdiffusion für den Radionuklidtransport kann je nach Standort stark variieren.

Bei der Beschreibung der Matrixdiffusion auf Prozess-Ebene spielt die Heterogenität der Matrix eine entscheidende Rolle. Viele Modelle beschreiben die Heterogenität über eine probabilistische Verteilungsfunktionen für die Verweilzeiten von Radionukliden in der Matrix. In anderen Modellen werden explizit verschiedene Teilbereiche der Matrix betrachtet, denen unterschiedliche Eigenschaften zugeordnet werden. Wichtige Fragestellungen sind:

- Wie hoch ist die Eindringtiefe in die Matrix? Hier werden mit verschiedenen Meßmethoden z. T. unterschiedliche Werte bestimmt.
- Wie verändern sich Matrixporosität und Diffusionskoeffizient mit zunehmendem Abstand von der Kluft?
- Wie groß ist der Wert für die „Flow Wetted surface“?

Dies ist einer der wichtigsten Parameter für die Modellierung, der schwierig zu bestimmen ist und häufig unterschiedlich definiert wird. Deshalb wurde vorgeschlagen, zukünftig eine einheitliche Definition zu verwenden.

3.3.3 Kolloide

Kolloide können in Langzeitsicherheitsanalysen (LZSA) eine wichtige Rolle spielen und müssen in die Betrachtungen einbezogen werden. Viele Aquifersysteme werden von einer Kolloidsorte dominiert. Aus diesem Grund kann keine allgemeingültige Aussage über die Bedeutung von Kolloiden in Langzeitsicherheitsanalysen gemacht werden. Eine Untersuchung muss immer standort- und systemspezifisch erfolgen. Liegt ein chemisches Gleichgewicht vor, so kann für eine erste Abschätzung zur Relevanz von Kolloiden das Produkt aus Kolloid-Konzentration und einem Verteilungskoeffizient des Schadstoffes zwischen Sediment- und Kolloidphasen verwendet werden. Der Kolloideinfluss wird allerdings dann größer, wenn die Schadstoff-Kolloid-Wechselwirkung irreversibel ist. Weitere wichtige Einflussgrößen für die LZSA sind die Kolloidstabilität sowie die potentielle Migrationsdistanz. Für Huminstoffe in sandigen Aquiferen konnten Transportdistanzen über etliche Kilometer nachgewiesen werden. Für derart lange Migrationsdistanzen gibt es für anorganische Kolloide unter realistischen Bedingungen bisher keinen Nachweis. Ebenso fehlen bisher auch Modelle zur quantitativen Beschreibung der Kolloidstabilität. Dagegen existieren PA (Performance Assessment)-Modelle, die die wesentlichen Prozesse berücksichtigen. Nach Ansicht der Arbeitsgruppe sollten in zukünftigen Arbeiten der Wissenstand zur Sorptions-/Desorptionskinetik, Kolloidfreisetzung- und -deposition verbessert, sowie gezielt Feldexperimente durchgeführt werden, um örtlich und zeitlich über größere Bereiche extrapolieren zu können

Um den Einfluss von Kolloiden zu überprüfen, wurden in Langzeitsicherheitsanalysen bisher meist nur sehr einfache Modelle verwendet, die allerdings mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Oder aber es wurde über geeignete Argumentation aufgezeigt, dass der Prozess unter gegebenen Bedingungen nicht von Bedeutung ist.

3.3.4 Immobilisierung

Unter Immobilisierung werden solche Prozesse verstanden, bei denen in Lösung befindliche Schadstoffe so gebunden werden, dass ihre Freisetzung extrem langsam erfolgt. Typische Immobilisierungsprozesse können Ausfällung und Mineralbildung oder Mitfällung und Einbau in Mineralphasen sein. Solche Prozesse werden in der Natur häufig beobachtet, allerdings unter anderen Randbedingungen als den im Fernfeld von Endlagern erwarteten. Aus vielen Natürlichen Analoga-Studien ist die Mitfällung vieler wichtiger Elemente, wie z.B. Uran Nickel oder Selen in Carbonaten und Fe-/Mn-Oxiden bekannt.

In bisherigen Langzeitsicherheitsanalysen wird für Rückhalteprozesse von Radionukliden während des Transports im Fernfeld von Endlagern das Kd-Konzept verwendet. Aus- bzw. Mitfällungsprozesse werden nicht berücksichtigt, da bisher noch keine geeigneten Modelle für die Modellierung derartiger Prozesse existieren. Außerdem gibt es kaum standortspezifische Daten sowie große Unsicherheiten bezüglich der Geschwindigkeiten und Komplexität der Prozesse. Es ist daher nicht zu erwarten, dass man in naher Zukunft in Langzeitsicherheitsanalysen von Immobilisierungsprozessen im Fernfeld Kredit nehmen kann. Es wurde vorgeschlagen, eine Datenbasis zu errichten, in der die Ergebnisse aus Labor- und Felduntersuchungen über natürliche Immobilisierungs-Prozesse von relevanten Elementen enthalten sind. Außerdem ist eine Entwicklung entsprechender Modelle für diese Prozesse notwendig.

3.3.5 Ausblick

Da GEOTRAP mit diesem Workshop abgeschlossen ist, wurde über ein entsprechendes Nachfolgeprojekt der OECD/NEA diskutiert. Als Ziele eines neuen Projekts wurden vorgeschlagen:

- Förderung der Kommunikation zwischen verschiedenen Fachrichtungen auf internationaler Ebene,
- weitere Integration der Feld-Informationen in Performance Assessment,
- Durchführung weiterer Arbeiten zur Vertrauensbildung.

Die Arbeitsgruppe schlägt vor, die Veranstaltung wie bisher im Rahmen eines Workshops von ca. 70 Experten in Abständen von 1-2 Jahren durchzuführen. Als mögliche Themen wurden identifiziert:

- Untersuchung der RN-Migration vom Bereich der Abfälle, bzw. der technischen Barrieren bis in die Geosphäre
- PA-relevante zukünftige Veränderungen der Geosphäre wie z. B. ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften
- Interface zur Biosphäre

3.4 TRUE

Das SKB-Konzept zur Endlagerung abgebrannter Brennelemente basiert auf dem Mehrbarrierensystem zur Isolation der Radionuklide von der Biosphäre [113]. Die Barrieren sind die geringlösliche Abfallform, die Einkapselung der Brennelemente in Kupferkanister, der die Kanister umgebende Bentonit-Puffer und das Wirtsgestein. Dieses soll für die technischen und geotechnischen Barrieren eine stabile mechanische und chemische Umgebung darstellen. Durch das Wirtsgestein soll der Transport der freigesetzten Radionuklide reduziert und verzögert werden. Bei der Planung der Experimente, die während des Betriebs des HRL Äspö durchgeführt werden sollten, wurde der Bedarf nach einem besseren Verständnis der Transport- und Rückhalteprozesse von Radionukliden erkannt. Dieses bessere Verständnis würde auch zu einer Vertrauenssteigerung in die Modelle, die für Langzeitsicherheitsanalysen benutzt werden, führen. Weiterhin könnte gezeigt werden, dass relevante Daten und Parameter auch bei der Standorterkundung bestimmt und Labordaten zu In-situ-Daten in Relation gesetzt werden können. Um diese Fragestellungen zu klären, initiierte das SKB ein Tracer-Testprogramm namens "Tracer Retention Understanding Experiments" (TRUE). In den Experimenten werden unterschiedliche Skalen berücksichtigt.

- | | | |
|---------------|---|--------------|
| - Laborskala | Laborexperimente | < 0,5 m |
| - Detailskala | TRUE-1-Experimente,
Langzeitdiffusionsexperiment | ~ 5 m - 10 m |
| - Blockskala | TRUE-Blockexperiment | ~ 50 m |

Die grundsätzlichen Zielsetzungen der TRUE-Experimente sind ein besseres Verständnis der Migration und Rückhaltung von Radionukliden in geklüftetem Fels, die Untersuchung, bis zu welchem Grade Modellkonzepte auf realistischen Beschreibungen von geklüftetem Gestein beruhen, und ob entsprechende Daten bei der Standortcharakterisierung erhoben werden können. Weiterhin sollten die Nützlichkeit und Durchführbarkeit unterschiedlicher Modellkonzepte für Migration und Rückhaltung untersucht werden. Gleichzeitig sollten In-situ-Daten zur Modellierung bestimmt werden. Um dieses zu erreichen, müssen

- haltbare experimentelle Ausrüstungen zur Verfügung gestellt,
- Rückhaltedaten gemessen und daraus Rückhalteparameter abgeleitet,
- prinzipielle Rückhalteprozesse und die zugehörigen geologischen Steuermechanismen erkannt,
- die auf verschiedenen Skalen gemessenen Daten in Einklang (Upscaling) gebracht, und
- die Belange der Langzeitsicherheit berücksichtigt werden.

Die zu TRUE-1 gehörigen In-situ-Experimente wurden in der Zeit von November 1994 bis Dezember 1998 in HRL Äspö durchgeführt. Die erste TRUE-Phase unterteilte sich in folgende Schritte:

- | | |
|--|-------------|
| - Standortauswahl im HRL Äspö | 1994 - 1995 |
| - Standortcharakterisierung | 1995 |
| • Bohrungen | |
| • Kernuntersuchungen | |
| • Bohrlochexperimente | |
| • hydraulische Tests | |
| - Laboruntersuchungen | 1993 - 1999 |
| - Entwicklung der Epoxidkunstharztechnik | 1995 - 1999 |
| - Modellierung (Abschätzungen, Vorhersagen) | 1995 - 1998 |
| - Tests mit konservativen Tracern | 1996 - 1997 |
| - Tests mit radioaktiven, sorbierenden Tracern | 1997 - 1998 |
| - Auswertung, Modellierung | 1998 - 2000 |
| - Berichte | 1999 - 2000 |

Zum Abschluss der Berichtsarbeiten wurde Vom 11. bis 13. September 2000 ein Workshop "First True Stage" zu den untersuchten TRUE-1 Experimenten in Äspö unter internationaler Beteiligung (ca. 40 Teilnehmer) ausgerichtet. Es wurden die durchgeführten Arbeiten und ihre Auswertungen vorgestellt. Gleichzeitig gab es Beiträge über ähnliche Arbeiten an anderen Institutionen. Zum Schluss wurden das Erreichte und mögliche zukünftige Arbeiten diskutiert. Für die Tracertests wurden die in Abb. 3.1 dargestellten Geometrien in einer Einzelkluft, genannt „Feature A“, benutzt. Die Entfernungen der sieben Testintervalle zwischen den Injektions- und Entnahmepunkten betragen zwischen 2,6 m und 9,6 m. Am Entnahmepunkt wurde mit Raten zwischen 0,04 l/min und 0,9 l/min gepumpt. An den Injektionspunkten wurde ohne Druckerhöhung gearbeitet. Durch diese Maßnahmen wird erreicht, dass die natürliche Strömung möglichst wenig gestört wird. Insgesamt wurden als konservative Tracer Uranin, Amino G Säure, Rhodamin WT, Eosin Y, Gd-DTPA, Eu-DTPA, Ho-DTPA, Tb-DTPA, HTO (Tritium), Br-82 und I-131 und als sorbierende Tracer Na-22, Na-24, K-32, Rb-86, Cs-134, Cs-137, Ca-47, Co-58, Sr-85, Ba-131, Ba-133 und Tc-99m eingesetzt.

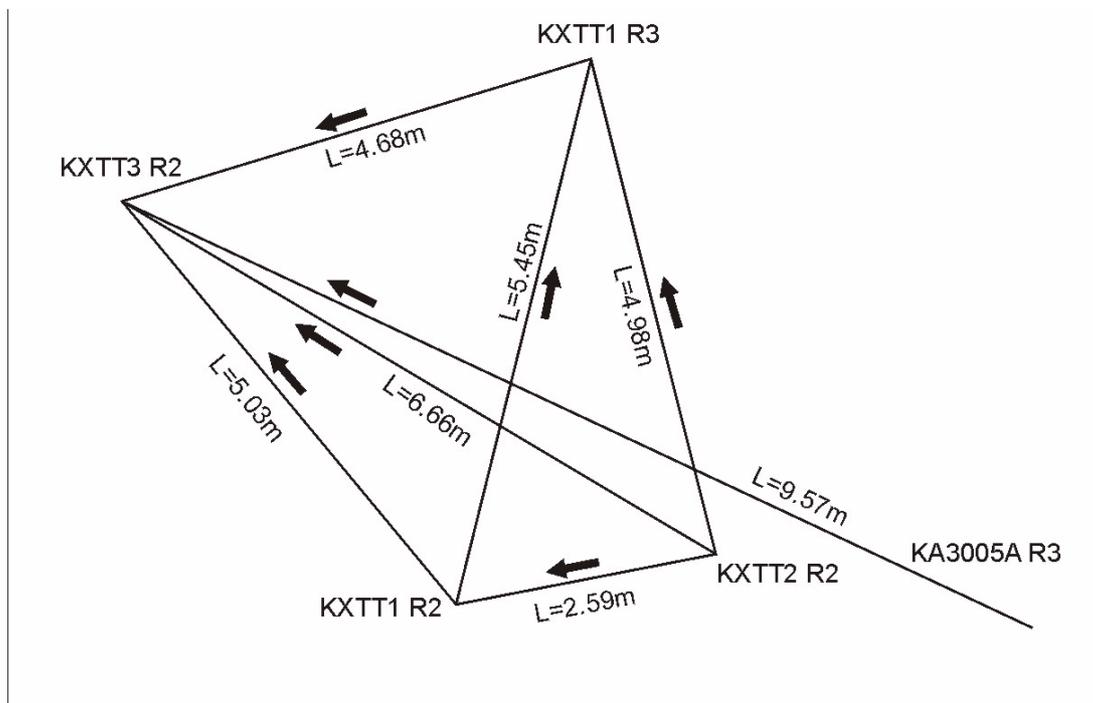


Abb. 3.1: Geometrien der Tracereperimente in Feature A (aus [113])

Bei der Auswertung der Messungen wurden folgende gekoppelte Prozesse berücksichtigt:

- Advektion längs Fließpfaden (stochastisch)
- Oberflächensorption (lineare Gleichgewichtssorption)
- Diffusion und Sorption in bzw. an der Matrix (lineare Gleichgewichtssorption)
- Diffusion in Bereiche mit stagnierendem Wasser
- Sorption an dem Kluffüllungsmaterial (kinetisch gesteuerte lineare Sorption)

Hierzu wurde das Modell LaSAR (**L**agrangian **S**tochastic **A**dvection **R**eaction) entwickelt [15], das die oben angegebenen Prozesse berücksichtigt. Dabei stellte sich heraus, dass innerhalb der durch die Experimente vorgegebenen Zeitskala die Diffusion und Sorption in bzw. an der Gesteinsmatrix der dominante Rückhalteprozess ist. Dieses gilt insbesondere für stark sorbierende Tracer, wie z.B. Cs. Die Rückhalteeffekte auf Grund der Gleichgewichtssorption an der Oberfläche bzw. auf Grund der kinetisch gesteuerten Sorption am Füllmaterial der Kluft sind beobachtbar, aber nur von untergeordneter Bedeutung. Ähnlich ist es mit der Sorption in Zonen mit stagnierendem Wasser. Insgesamt kann zusammenfassend folgendes über die erste Phase von TRUE gesagt werden:

- Bestehende Tracer-Testmethoden sind erfolgreich angepasst und eingesetzt worden.
- Das entwickelte Modell LaSAR eignet sich zur Beschreibung der dominanten Effekte beim reaktiven Transport in einer Kluft.
- Die Parameterwerte für die Modellierung sind entweder von Labor- oder In-situ-Messungen abgeleitet.
- Repräsentative Labordatensätze (MIDS) stellen eine robuste Basis für die Vorhersage der Durchbrüche von reaktiven Tracern dar. Die erste Ankunft wird relativ gut bestimmt, während die Höhe um knapp eine Größenordnung überschätzt wird.
- Die alterierte Saumzone entlang der untersuchten Feature A weist im Vergleich zur unalterierten Gesteinsmatrix eine erhöhte, wenn auch variable Porosität (2 % - 3 %) und Diffusivität auf. Für die Zeitskala beim Experiment TRUE ist diese wichtig für die Rückhaltung.
- Bezüglich der PA gelten auf Grund der experimentellen Ergebnisse:
 - Die Prozesse und ihre relative Wichtigkeit werden auch für PA-Zeitskalen als richtig angesehen.

- Labordaten von unalteredem Gestein, das unabhängig ist von der Saumzone, sind anwendbar auch bei PA-Zeiträumen.
- Mit der Epoxidkunstharztechnik steht eine In-situ-Technik zur Untersuchung von Porenräumen und Kluftöffnungsweiten zur Verfügung.

In der nächsten Phase von TRUE sollen innerhalb des Blockexperimentes die bisherigen Erkenntnisse auf ein Kluftnetzwerk erweitert werden. In dem Langzeitdiffusionsexperiment wird die Diffusion aus einer Kluft in die Gesteinsmatrix unter ungestörten Bedingung bestimmt. Weiterhin werden einige Radionuklide bezüglich ihrer Sorptionseigenschaften auf Kluftoberflächen detailliert untersucht. Es sollen Labor- mit In-situ-Daten für Diffusion und Sorption bezüglich ihres zeitlichen Skalenverhaltens untersucht werden.

3.5 Szenarienanalyse

Zum Thema Szenarienanalyse wurden während der Projektlaufzeit an den Arbeiten des Arbeitskreises "Szenariientwicklung" teilgenommen. An diesem Arbeitskreis sind mehrere Organisationen aus Deutschland beteiligt, die auf dem Gebiet der Endlagersicherheit arbeiten. Dies sind GRS, DBE, GSF, BGR, FZK-INE und BfS. Der Arbeitskreis trifft sich ein- bis zweimal pro Jahr. Der Stand der Arbeiten zum Zeitpunkt 1998 ist in [3] dokumentiert. Ein neuer Statusbericht befindet sich derzeit in Vorbereitung. Der aktuelle Stand der Arbeiten wird im Folgenden kurz zusammengefasst.

Ein **Szenario** wird definiert als eine potenzielle realistische Entwicklung eines Endlagersystems, die durch eine Kombination so genannter FEPs (von engl.: Features, Events, Processes) spezifiziert ist, welche das System charakterisieren oder beeinflussen. FEPs können Systemeigenschaften oder -merkmale (features) sein, kurzzeitige Ereignisse (events) oder langzeitige physikalische Vorgänge (processes), die einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Freisetzung von Schadstoffen haben.

Ein Szenario wird üblicherweise durch mehrere FEPs bestimmt. Das unwahrscheinlichste dieser FEPS bestimmt die Eintrittswahrscheinlichkeit des Szenarios. Szenarien werden anhand ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit in drei Klassen eingeteilt. Die Wahrscheinlichkeit von FEPs ist durch Expertenbewertung als „wahrscheinlich“, „weniger wahrscheinlich“ oder „praktisch ausgeschlossen“ einzustufen (vgl. auch [4]).

Bei der Auswahl von FEPs sowie bei der Einordnung und Abgrenzung von Szenarien ist eine Anzahl von subjektiven Entscheidungen unvermeidbar. Zur Sicherstellung der Nachvollziehbarkeit einer Sicherheitsanalyse ist daher eine sorgfältige Dokumentation der Entscheidungsprozesse erforderlich.

Szenarien, die sich mit den Folgen zukünftiger menschlicher Aktivitäten (Future Human Actions, FHA) befassen, sollten sich auf solche FEPs beschränken, die ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Endlager (inadvertent Human Intrusion, HI) zum Inhalt haben. Solche FEPs werden für den Zeitraum bis zu einigen hundert Jahren nach Ende der Betriebsphase ausgeschlossen, weil anzunehmen ist, dass die Kenntnis von der Existenz des Endlagers mindestens so lange erhalten bleibt. Da über den technischen Entwicklungsstand zukünftiger Generationen keine Aussage gemacht werden kann, ist für die Szenarienentwicklung der heutige Standard zugrunde zu legen.

Seit 1998 wurden von dem Arbeitskreis mehrere Studien aus anderen Ländern bezüglich der Vorgehensweise bei der Identifikation von Szenarien ausgewertet. Dabei handelt es sich um die WIPP-Studie (USA) [110], den Nirex Approach to Scenario Analysis (UK) [89], sowie die Studien TILA-99 (Finnland) [112] und H12 (Japan) [36]. Die Vorgehensweisen bei den einzelnen Studien sind im Folgenden knapp zusammengefasst.

WIPP: zunächst wird eine umfassende Liste von FEPs zusammengestellt, wobei auf existierende Listen der NEA sowie von SKI zurückgegriffen wird. Für jeden FEP werden anschließend die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Konsequenzen bewertet. Diejenigen FEPs, die als relevant für die Freisetzung von Schadstoffen angesehen werden, werden in so genannte „summary scenarios“ gruppiert. Daraus werden schließlich berechenbare Szenarien abgeleitet.

Nirex Approach: Ausgehend von vorhandenen FEP-Listen wird eine FEP-Datenbank erstellt. Diese wird in einer Baumstruktur mit komplexeren „Eltern-FEPs“ und einfacheren „Tochter--FEPs“ gegliedert. Dies geschieht in einem so genannten MDD (Master Directive Diagramme). Die FEPs werden in „System FEPs“ und „Probabilistic FEPs“ kategorisiert, wobei die ersteren die erwartete Entwicklung abdecken und die letzteren allenfalls in Varianten zu betrachten sind. Ausgehend von einem Basis-Szenarium werden Varianten-Szenarien über definierende FEPs festgelegt. Szenarien mit geringeren Konsequenzen

zen werden solchen mit höheren Konsequenzen zugeschlagen (subsuming). Die Szenarienanalyse wurde von Nirex mithilfe eigens dafür konzipierter Softwareprodukte durchgeführt.

TILA-99: Eine systematische Szenarienanalyse wird hier nicht durchgeführt. Es wird auf die FEP-Datenbanken der NEA sowie von SKI verwiesen. Angestrebt wird die Entwicklung realistischer Szenarien unter Berücksichtigung anzunehmender Änderungen der geologischen und klimatologischen Situation. Es wird angenommen, dass die Kupferbehälter ihre Integrität im Normalfall behalten. Das Referenzszenarium behandelt die Auswirkungen eines Defekts eines einzelnen Behälters. Weiterhin werden verschiedene Sensitivitäts- und „What-if“-Analysen durchgeführt.

H12: Zunächst wird eine umfassende Liste relevanter FEPs zusammengestellt. Als Quellen dienen dabei die existierenden FEP-Listen der NEA und von anderen Studien, sowie eigens zusammengestellte Expertenbewertungen. Die FEPs werden anschließend in Phänomenkategorien eingeteilt und in einer Matrix dargestellt. Anhand dieser Matrix werden FEPs für die weitere Betrachtung ausgewählt. Ausgeschlossen werden dabei FEPs mit sehr geringer Eintrittswahrscheinlichkeit oder vernachlässigbaren Konsequenzen sowie solche, die durch Standortauswahl oder Endlagerdesign vermeidbar sind. Da es sich bei H12 um eine generische Studie handelt, können auch die aufgestellten Szenarien nur generischen Charakter haben.

Aus der Auswertung der ausländischen Studien sowie aus Szenarienanalysen, die bereits zuvor für die deutschen Standorte Gorleben und Morsleben durchgeführt wurden, lassen sich einige Schlussfolgerungen ziehen, die bei der zukünftigen Behandlung der Thematik berücksichtigt werden sollten:

- Einflussmatrizen stellen die übersichtlichste Grundlage zur Bewertung der Wechselwirkungen von FEPs dar.
- Elektronische Hilfsmittel können bei der Szenarienanalyse sehr hilfreich sein. Die Entwicklung eines entsprechenden Instrumentariums für den deutschen Bedarf wäre eine wichtige Aufgabe für die Zukunft.
- Die Begründung sinnvoller Zeitrahmen und die Zuordnung der FEPs zu diesen ist noch weiter zu diskutieren.

3.6 NEA: Thermodynamische Datenbank

1984 begann die NEA mit der Einrichtung von Fachgruppen (review groups) zur Sammlung und kritischen Evaluation von Literaturdaten zur chemischen Thermodynamik wichtiger Radionuklide in wässrigen Systemen. Ziel war die Schaffung einer international anerkannten, qualitätsgesicherten einheitlichen thermodynamischen Datenbasis für Sicherheitsanalysen für Endlager mit radioaktiven Abfällen. Ziel der ersten Phase dieses NEA-TDB-Projekts waren kritische Reviews zu den Elementen U, Am, Tc, Np und Pu.

Die bisher erschienenen Bände zur chemischen Thermodynamik von Uran, Plutonium, Neptunium, Americium und Technetium decken die bis zum jeweiligen Redaktionsschluss erschienenen Arbeiten zu diesen Elementen praktisch vollständig ab. Die entwickelten Datensätze sind umfangreich, weisen bezüglich einiger Teilfragen aber noch Lücken auf. So fehlen insbesondere Erkenntnisse zu den vier- bis sechswertigen Oxidationsstufen des Plutoniums. Die Datenlage für einige andere vierwertige Actiniden ist ebenfalls noch nicht ausreichend.

In den letzten Jahren ist allerdings das Wissen von der Chemie der vierwertigen Actiniden erheblich verbessert worden. Hier sind die Arbeiten zum EU-Projekt ACTAF hervorzuheben. Darin sind viele Studien zum Verhalten von vierwertigen Actiniden (An(IV)) in wässrigen carbonathaltigen Systemen durchgeführt worden. Wichtige Aussagen sind, dass die Löslichkeiten bei pH-Werten oberhalb von 2 durch amorphe AnO_2 -Phasen bestimmt werden. Es wird davon ausgegangen, dass auch bei kristallinen AnO_2 -Mineralen immer geringe Mengen amorphen Materials auf der Oberfläche vorliegen, die dann deren Löslichkeit bestimmen. In carbonathaltigen Systemen sind oberhalb von pH 5 Hydroxo-Carbonat-Komplexe wie $Th(OH)(CO_3)_4^{5-}$ und $Th(OH)_2(CO_3)_2^{2-}$ vorherrschende Spezies in der Lösung und führen zu einer Erhöhung der Löslichkeit. Außerdem können Th-Kolloide die Löslichkeit um zwei Größenordnungen erhöhen. Die quantitative Beschreibung dieser Kolloidbildung stellt derzeit noch eine wichtige offene Frage dar. Eine Plattform für die zukünftigen Arbeiten zu diesem Thema auf EU-Ebene bildet das Projekt ACTINET.

Mittlerweile liegt auch das Buch mit den überarbeiteten Daten für Uran vor. Noch im Jahr 2004 sollen die Bücher mit den Löslichkeiten und anorganischen Komplexen von Selen, Nickel und Zirkonium erscheinen. Außerdem soll in 2004 das Buch über die Komplexbildung mit den organischen Liganden EDTA, Citrat, Oxalat und Isosaccharinsäure veröffentlicht werden. Diese Arbeiten sind Bestandteil der Phase II des NEA-TDB-Projekts.

Das Projekt NEA-TDB III hat im Februar 2003 begonnen. Inhalt ist die Zusammenstellung und der Review der thermodynamischen Daten für Th, Fe, Mo und Sn. Das Projekt soll nach einer Pilotphase in 2003 bis zum Jahr 2006 laufen.

Für Belange der Endlagerung in Deutschland ergibt sich das Problem, dass an eine Datenbasis weitergehende Anforderungen gestellt werden, als sie durch die Datenbank der NEA erfüllt werden können. Dies ist einerseits eine Konsequenz aus der offenen Entscheidung bezüglich eines Endlagerstandorts für radioaktive Abfälle. Andererseits besteht die Notwendigkeit, Sicherheitsanalysen für bestehende Anlagen in Salzformationen durchzuführen. Aus der Bandbreite an Wirtsgesteinen ergibt sich ein entsprechender Variationsbereich der Lösungszusammensetzungen und der zugehörigen Ionenstärke.

Die in der thermodynamischen Datenbank der NEA und auch in den meisten anderen nationalen Datenbankprojekten ausgewählten thermodynamischen Daten beruhen auf der „Specific Ion Interaction Theorie“ (SIT) zur Beschreibung von Aktivitätskoeffizienten. Deren Gültigkeitsbereich erstreckt sich nicht auf alle zu betrachtenden Endlagerformationen. Bei geochemischen Rechnungen für hochsalinare Lösungen, wie sie in einem Endlager im Salz auftreten werden, ist nur das Modell von Pitzer anwendbar. Für dieses Modell benötigte Parameter wurden bisher nur für einige Radionuklide, Schwermetalle und andere relevante Elemente bestimmt.

Die Unvollständigkeit der thermodynamischen Daten, insbesondere der Ionen-Wechselwirkungsparameter (Pitzer-Daten), schränkt die Einsetzbarkeit anderer thermodynamischer Datenbasen wie der NEA-TDB für die geochemische Modellierung ein. Dies führt in der Praxis zur Beschaffung benötigter Daten aus anderen Quellen, z.B. aus nicht hinreichend abgesicherten experimentellen Daten oder Abschätzungen. Folglich wird mit heterogenen Daten gerechnet, die zudem häufig weder allgemein zugänglich noch nachvollziehbar sind. Diese Vorgehensweise ist nicht ausreichend. Um belastbare und für die Öffentlichkeit vertrauenswürdige geochemische Rechnungen im Hinblick auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers durchführen zu können, ist die Schaffung einer thermodynamischen Datenbank notwendig, die deutschen Endlagerfragen gerecht wird sowie bei jeder Ergänzung oder Erweiterung eine Konsistenzprüfung erlaubt.

Die Grundlage hierfür wurde durch die Gründung eines "Arbeitskreises Thermodynamische Standarddatenbank", kurz ATS, gelegt. Dem Arbeitskreis gehören GRS, INE, ITU, FZR, BAF und Colenco an. Zwischenzeitlich wurde eine Datenbankstruktur erstellt und mit ersten Daten gefüttert. Der derzeitige Internet-Zugang zur Datenbank ist noch password-geschützt, soll für die interessierte Öffentlichkeit jedoch bald geöffnet werden.

3.7 NEA-Sorptionsprojekt Phase 2

Wichtigstes Ziel von Phase II des NEA-Sorptionsprojekts war es, verschiedene Oberflächenkomplexmodelle zu testen und für die Beschreibung der Sorption über einen weiten Bereich geochemischer Bedingungen anzuwenden. Diese Arbeiten bilden die Basis dafür, Unsicherheiten bei K_d -Werten zu reduzieren und das Vertrauen in die Modellierung der Sorptionsprozesse in Langzeitsicherheitsanalysen zu erhöhen. Um die Leistungsfähigkeit und Grenzen der Oberflächenkomplexmodelle bewerten zu können, wurden sieben Testfälle formuliert, die von verschiedenen Modellierungsteams bearbeitet wurden. Insgesamt nahmen 20 verschiedene Teams von Modellierern teil. Von deutscher Seite wurden die Testfälle 2, 5 (FZK), 3 (FZR, GRS) und 1 (FZR) bearbeitet.

- 1. Neptunium(V) an Hämatit
- 2. Selen an Goethit
- 3. Uran(VI) an Quarz
- 4. Nickel an Tonen
- 5. Neptunium an Montmorillonit
- 6. Uran(VI) an verwitterten Koongarra-Sedimenten
- 7. Kobalt an Bodensedimenten

Bei den untersuchten Systemen handelte es sich um Systeme mit reinen Mineralphasen (1-3), um etwas komplexere Systeme mit Tonmineralen, die z.T. Spuren anderer Minerale enthalten (4,5) sowie um komplexere natürliche Systeme - die Feinfraktion eines verwitterten Chlorit-Schiefers (6) und Bodenmaterial (7) -, die sich aus vielen verschiedenen Mineralphasen zusammensetzen.

Im Oktober 2002 wurden die Ergebnisse der Modellrechnungen auf einem dreitägigen Workshop vorgestellt und mit allen Modellieren diskutiert. Ein umfassender Bericht über das NEA-Sorptionsprojekt soll Ende 2005 erscheinen [64]. Alle Ergebnisse der Modellrechnungen werden als Teil 3 dieses Abschlussberichts auf einer CD zur Verfügung stehen.

3.7.1 Aspekte der Langzeitsicherheitsanalyse

Die Verteilung von radioaktiven Elementen zwischen Lösung und Festkörperoberflächen wird in Langzeitsicherheitsanalysen bisher und auch in absehbarer Zukunft mit dem Kd-Konzept beschrieben (vgl. auch Kapitel GeoTrap). Kd-Werte hängen sehr stark von den geochemischen Bedingungen, also den Eigenschaften der Lösung und der Festkörperoberflächen, ab. Die Bandbreiten für Kd-Werte ergeben sich daher aus

- der Variabilität der Wasserzusammensetzung und vorhandener Mineralphasen in natürlichen Systemen und
- Änderungen der geochemischen Bedingungen, durch veränderte zukünftige Entwicklungen des natürlichen Systems.

Dies ist insbesondere relevant wenn lange Zeiträume betrachtet werden, wo sich beispielsweise durch veränderte klimatische Bedingungen die Grundwassereigenschaften verändern.

Die in Langzeitsicherheitsanalysen verwendeten Kd-Werte basieren üblicherweise auf einer begrenzten Anzahl an Messreihen in natürlichen Grundwasser-Sedimentsystemen und einer größeren Anzahl von Messreihen an vereinfachten Modellsystemen.

Aus diesen Daten werden Kd-Werte für die geochemischen Bedingungen des in der Langzeitsicherheitsanalyse betrachteten Teilsystems ermittelt, sowohl für den Referenzfall als auch für alternative Szenarien. Die Unsicherheiten der verwendeten Kd-Werte ergeben sich dabei aus den experimentellen Fehlern und den Unsicherheiten, die aus dem Transfer der Kd-Werte von den experimentellen auf die erwarteten geochemischen Bedingungen ergeben.

3.7.2 Derzeitiger Stand der Oberflächenkomplexmodellierung

Das NEA-Sorptionsprojekt bot die Möglichkeit, die Anwendbarkeit und Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Oberflächenkomplexmodelle zur Beschreibung der Sorption ausgewählter Radionuklide in einem definierten Grundwasser-Sedimentsystem unter Variation der geochemischen Bedingungen zu überprüfen. Aus der kritischen Analyse der zahlreichen Rechenergebnisse zu den oben genannten sieben untersuchten Sorptionsfällen können folgende Schlussfolgerungen zum Stand der Oberflächenkomplexmodellierung gezogen werden.

Generell zeigte sich, dass eine zufrieden stellende Beschreibung des Sorptionsverhaltens mit verschiedenen Modellansätzen möglich war. Ein großer Wert der thermodynamischen Sorptionsmodelle (TSM) besteht in der Quantifizierung der geochemischen Einflussfaktoren, die die Sorption bestimmen. Die Oberflächenkomplexmodelle sind in der Lage, die Veränderung der K_d -Werte über einen großen Bereich von geochemischen Bedingungen (pH, CO_2 -Konzentration, Ionenstärke, Sorbenskonzentration,...) qualitativ und in den meisten Testfällen auch quantitativ zu beschreiben, sowohl für einfache wie auch für komplexe Mineralsubstrate. Diese Fähigkeit der TSM stellt ihren großen Vorteil gegenüber phänomenologischen Ansätzen wie dem K_d -Konzept und nichtlinearen Isothermen dar.

Eine wichtige Erkenntnis ist, dass der Modellierer selbst und seine Entscheidungen bei der Modellentwicklung entscheidenden Einfluss auf die Güte der Modellierung haben. Deshalb wird für Transparenz und Vertrauenswürdigkeit der Oberflächenkomplexmodelle auch eine detaillierte Dokumentation der Vorgehensweise und Entscheidungen, die zur Modellentwicklung beigetragen haben, empfohlen.

Weiterhin muss die Verwendung von Daten aus der Literatur kritisch erfolgen. Beispielsweise sind die Werte für die Stabilitätskonstanten von Oberflächenkomplexen abhängig von der im Modell angenommenen Sorptionsplatzdichte. Wenn sich die Sorptionsplatzdichten zwischen eigenem und in der Literatur verwendeten Modell unterscheiden sind die in der Literatur zitierten Stabilitätskonstanten auch für die gleiche Mineralphase nicht auf das eigene Modell übertragbar.

3.7.3 Allgemeine Empfehlungen

Aus der Auswertung der Ergebnisse der Modellierung ergeben sich noch weitere allgemeine Empfehlungen für die Anwendung der TSM.

Die Sorptionsplatzdichte ist eine zentrale Größe bei der Modellierung. Die verwendeten Methoden zur Bestimmung der Sorptionsplatzdichte, wie auch die Werte selbst variieren für einzelne Mineralphasen z.T. sehr stark. Sie stellt damit eine wichtige Quelle für Unsicherheiten dar. Deshalb sollten zur Bestimmung der Sorptionsplatzdichte zukünftig abgestimmte und möglichst einheitliche Methoden angewandt werden.

Die Modellierung der Sorption an komplexen Materialien ist zum jetzigen Zeitpunkt noch problematisch. Ob das „General Composite“ (GC) Modell oder das „Component Additivity“ (CA) Modell geeigneter zur Beschreibung der Sorption in einem gewählten System ist, hängt hauptsächlich von zwei Faktoren ab:

- der Komplexität des Systems und
- der experimentellen Zugänglichkeit.

Das CA-Modell stellt das chemisch plausible Modell dar. Oftmals ist die Verwendung dieses Modells für die Langzeitsicherheitsanalyse problematisch. Die Modelle sind komplex, was die Parameterermittlung aufwändig und schwierig macht. Allerdings stellen sie für experimentell nicht zugängliche Systeme, die einzige Möglichkeit zur Beschreibung der Sorption in Abhängigkeit geochemischer Parameter dar. Die CA-Modelle sind weiterhin noch in der Entwicklungsphase. Das GC-Modell, das in der einfachsten Form die elektrische Doppelschicht vernachlässigt, ermöglicht einen guten mathematischen Fit an die Messdaten.

Für sehr komplexe Substrate stellen diese Modelle derzeit die einzige Möglichkeit zur Beschreibung der Sorption in Abhängigkeit der geochemischen Bedingungen dar. Der Hauptnachteil dieser Modelle ist, dass Sie keine Extrapolation gestatten (keine „predictive capability“). Die Graphik in Abbildung 3.2 gibt eine Übersicht zur Anwendbarkeit der GC- bzw. CA-Modelle.

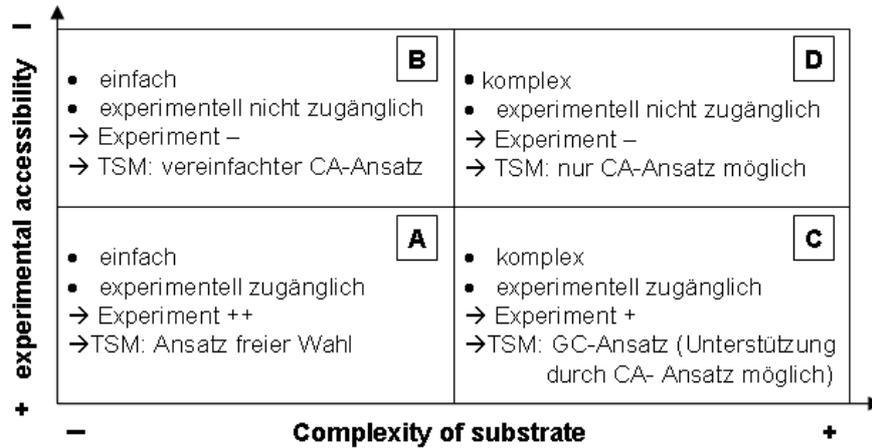


Abb. 3.2: Empfehlungen für die Anwendung thermodynamischer Sorptionsmodelle (CA- bzw. GC-Ansatz) für unterschiedlich komplexe und zugängliche Systeme

Übereinstimmung bestand darin, dass in den nächsten Jahren reaktive Transportmodelle, die Oberflächenkomplexierungsreaktionen enthalten, nicht direkt in Langzeitsicherheitsanalysen eingesetzt werden. Vielmehr werden die Oberflächenkomplexmodelle vorerst weiterhin dazu dienen, Kd-Werte und deren Bandbreiten für verschiedene Formationen abzusichern sowie den Einfluss veränderter geochemischer Bedingungen abzuschätzen.

3.7.4 Ausblick

Bei der Auswahl der Testfälle zeigte sich, dass nur wenige geeignete Messreihen adäquater Qualität publiziert sind. Daher sollte zukünftig auch ein begrenztes experimentelles Programm miteinbezogen werden. Ein möglicher Aspekt eines kommenden NEA-Sorptionsprojekts könnte es sein, einen völlig neuen Sorptionsdatensatz zu erstellen und ein sogenanntes „Blind Predictive Modelling“ durchzuführen. Die Ergebnisse eines solchen Modellvergleichs können verwendet werden, um Mängel in den experimentellen Daten zu identifizieren und verbesserte experimentelle Programme zu entwickeln. Diese Übung sollte als eine Art Demonstration für ein reales System, das hohe Relevanz für die Langzeitsicherheitsanalyse hat, durchgeführt werden.

Außerdem zeigte Phase II des NEA-Sorptionsprojekts, dass die in der Literatur vorhandenen Modellparameter nicht in vollem Umfang und auch nicht immer konsistent verwendet wurden. Dafür sind hauptsächlich zwei Gründe zu nennen:

- Nicht alle Modellierer waren mit den Anforderungen vertraut, die erfüllt sein müssen, um in sich konsistente Modellparameter zu erhalten.
- Für die Speziation in Lösung und Löslichkeitsprodukte existieren standardisierte Datenbanken der NEA, die abgesicherte, in sich konsistente Datensätze enthalten. Im Gegensatz dazu existieren nur wenige Standarddaten zur Verwendung für Thermodynamische Sorptionsmodelle.

In einem zukünftigen Projekt sollten die Anforderungen an eine solche Datenbasis formuliert und eine internationale Zusammenarbeit zur Erstellung einer entsprechenden Datenbasis angestossen werden. Ein Prototyp einer solchen Datenbasis wurde bereits von FZR entwickelt. Ein wichtiger Punkt dabei ist auch die Entwicklung von geeigneten Standardzuständen für solche Referenzdaten. Hier existieren bereits erste Ansätze [52], [106].

Schließlich sollte verstärkt die Rolle von Organika, wie z.B. Huminstoffen betrachtet werden, die bei der Oberflächenkomplexmodellierung bisher eine untergeordnete Rolle gespielt hat. So existieren in der thermodynamischen Datenbasis der NEA bisher nur Daten für kurzkettige organische Moleküle wie Citrat oder Isosaccharinsäure (vgl. auch Abschnitt 3.6).

3.8 CROP

In den vergangenen Jahren wurden verschiedene FuE-Projekte zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen von der Europäischen Union gefördert. Mit dem Ziel einer zusammenschauenden Bewertung der Projektergebnisse und der Ableitung von Empfehlungen für weiterführende FuE-Arbeiten zur Auslegung von Endlagern für hochradioaktive Abfälle, insbesondere von Barriersystemen für den langzeitsicheren Verschluss von Endlagern wurde das Concerted Action Project CROP (Cluster Repository Project) im Januar 2001 von neun internationalen Endlager- und Forschungsinstitutionen im Auftrag der EU mit einer Laufzeit von drei Jahren begonnen. Das Projekt wurde als Studie mit den folgenden vier Arbeitspaketen durchgeführt:

- Design and construction of engineered barriers
- Instruments and experimental procedures
- Assessment of the function of EBS and the understanding of and capability to model the important processes
- Application of conceptual & mathematical models for predicting THMBC performance.

Projektpartner waren:

für Granit:

- SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB – Projektkoordinator), Schweden, mit Unterauftragnehmer Geodevelopment AB
- Agence National pour la gestion des Dechets Radioactifs (Andra), Frankreich
- Empresa Nacional de Residuos Radioactivos SA (Enresa), Spanien
- Ontario Power Generation Inc (OPG), Kanada, mit Unterauftragnehmer G.R. Simmons & Associates Consulting Services LTD.
- Posiva Oy, (Posiva), Finnland.

für Ton:

- Agence National pour la gestion des Dechets Radioactifs (Andra), Frankreich
- Empresa Nacional de Residuos Radioactivos SA (Enresa), Spanien
- Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioactiver Abfälle (Nagra), Schweiz
- Studiecentrum voor Kernenergie-Centre d Etude de l'energie Nucleaire (SCK-CEN), Belgien.

für Salz:

- Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit GmbH (GRS), Deutschland mit Beobachter DBE-TEC
- United States (U.S.) Department of Energy Carlsbad Field Office (CBFO), USA, mit Unterauftragnehmer GRAM, Inc. und Sandia National Laboratories (SNL).

Zu jedem der vier Arbeitspakete waren von jedem Projektpartner Beiträge in Form so genannter Country Annexes auszuarbeiten. Diese Länderbeiträge wurden vom Projektkoordinator in Syntheseberichten mit den wesentlichen Ergebnissen zusammengefasst.

3.8.1 Projektverlauf, -ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Projektsitzungen entwickelten sich im Verlauf des Projektes wie geplant zu einem Diskussionsforum mit intensiver Analyse des Standes der Entwicklung der verschiedenen Endlagerkonzepte. Die Sitzungen wurden nacheinander an den Standorten der Untertagelabors veranstaltet, wodurch die Berücksichtigung aktuellster Ergebnisse sowie die vorausschauenden Planungen aller Endlagerprojekte sichergestellt war.

Die wissenschaftlich-technischen Diskussionen ermöglichten allen Partnern einen guten Einblick in den Entwicklungsstand der Programme in den anderen Wirtsgesteinsformationen.

Der Vergleich der Konzepte untereinander war ein neuer Aspekt dieses Projektes und zwei längere Diskussionen zogen sich durch das gesamte Projekt:

- Können die drei Wirtsgesteinsformationen Granit, Ton, Salz generell untereinander verglichen werden?
- Ist die Erstellung eines gemeinsamen Abschlussberichtes für alle drei Medien unter Berücksichtigung der sehr unterschiedlichen technischen Lösungen möglich oder kann die Bewertung der Ergebnisse nur separat für jedes Wirtsgestein durchgeführt werden?

Die Schlussfolgerung war schließlich, dass es nicht nur schwierig ist, die Programme untereinander zu vergleichen, sondern dass diese Vorgehensweise sogar irreführend sein kann. Für jedes der betrachteten Konzepte ist es prinzipiell möglich, unter Berücksichtigung der jeweils geltenden (nationalen) Sicherheitsanforderungen den Langzeitsicherheitsnachweis zu erbringen. Jedes Wirtsgestein hat Vor- und Nachteile, die entsprechend in den ingenieurtechnischen Auslegungen der Barrierensysteme zu berücksichtigen sind. Hierbei spielen die Wechselwirkungen zwischen den natürlichen und technischen Barrieren eine bedeutende Rolle. Die Diskussionen ergaben aber auch, dass viele Forschungs- und Demonstrationsaufgaben gleicher Natur sind und diese Gemeinsamkeiten bei der inhaltlichen Diskussion neuerer Forschungsprogramme berücksichtigt werden müssen (z. B. im Net Excel-Projekt, EU-Vertrag FIR-CT-2002-20212).

Als Folge der vorgenannten Diskussionen wurde ein Abschlussbericht (z. Zt. noch nicht verfügbar) erstellt, in welchem die Projektergebnisse wirtsgesteinsspezifisch dargestellt wurden. Das Hauptgewicht wurde auf die Darlegung der gewonnenen Erfahrungen und die daraus abgeleiteten Vorschläge für weiterführende FuE gelegt. Der Bericht enthält detaillierte Darstellungen der betrachteten Barrierensysteme mit Begründung des jeweiligen Designs und der Möglichkeit potentieller Weiterentwicklungen. Die Ergebnisse numerischer Simulationen wurden vergleichend zu aktuellen Messergebnissen von In-situ-Versuchen diskutiert.

3.8.2 Zusammenfassung der deutschen Ergebnisse

Im Salzkapitel des CROP Abschlussberichtes werden die in den letzten 20 Jahren im Forschungsbergwerk Asse erzielten Ergebnisse zusammengefasst und bewertet. Die in der Asse durchgeführten Arbeiten lieferten wertvolle Erfahrungen hinsichtlich der Auslegung, der Entwicklung und des Betriebs eines

- Endlagers für schwach- und mittelradioaktive Abfälle in den Jahren 1967 bis 1978
- Untertagelabors in einer Tiefe von 750 bis 800 m unter Tage.

Der Großteil der in Asse durchgeführten Experimente betraf die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Dabei wurden die nachfolgenden zwei verschiedenen Endlagerkonzepte betrachtet:

- Endlagerung verglaster hochradioaktiver Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in dünnwandigen Stahlbehältern (Typ Cogéma) in tiefen Bohrlöchern
- Direkte Endlagerung bestrahlter Brennelemente in selbstabschirmenden Behältern (Typ Pollux) in Endlagerstrecken.

Die radioaktiven Abfälle werden in der Salzformation nach der Betriebszeit des Endlagerbergwerks durch ein Mehrbarrierensystem langzeitsicher gegenüber der Biosphäre abgeschlossen. In beiden Endlagerkonzepten wird die geologische Formation als Hauptbarriere gegen eine Radionuklidfreisetzung in die Biosphäre betrachtet. Zur geochemischen Stabilisierung des Endlagerbergwerks und zur Verringerung des Hohlraumvolumens werden sowohl Endlagerbohrlöcher als auch Endlagerstrecken mit Salzgrus versetzt. Die Auswirkungen möglicherweise zutretender Salzlösungen werden da-

durch verringert. Der Salzgrus wird infolge der Hohlraumkonvergenz kompaktiert und schließt die eingelagerten Abfälle langfristig hermetisch ein. Zusätzlich werden für den langzeitsicheren Verschluss des Endlagerbergwerkes einzelne Einlagerungsfelder durch Streckenverschlüsse (Dämme) und der Schacht durch ein Verschlusssystem gegenüber grundwasserleitenden Schichten des Deckgebirges abgeschlossen.

Die wesentlichen Beobachtungen und Schlussfolgerungen aus den Forschungsarbeiten in der Asse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- In der Anfangsphase fokussierten die Forschungsarbeiten auf der Bestimmung der mechanischen und thermischen Eigenschaften des Wirtsgesteins. Später traten Untersuchungen der Dichteigenschaften des Salzgesteins in der Wechselwirkung mit dem eingebrachten Versatz und der Wärmefreisetzung der Abfälle in den Vordergrund. Im letzten Jahrzehnt nahm die Entwicklung gekoppelter thermo-hydro-mechanischer Modelle (THM-Modelle) breiten Raum ein. In jüngerer Zeit wurden signifikante Fortschritte bei der Simulation auffahrungsbedingter Effekte, wie z. B. Entwicklung von Auflockerungszonen und Versatzkompaktion bei höherer Temperatur erzielt. Die Modellierung der Verheilung von Auflockerungszonen, die für die Langzeitsicherheitsanalyse von großer Bedeutung ist, muss hingegen deutlich weiter entwickelt werden.
- Das THM-Verhalten von Salzgrusversatz ist weitgehend verstanden. Die Zugabe geochemischer Additive zur Verbesserung der Sorption spezieller Radionuklide im Nahfeld ist in der Diskussion und wurde noch nicht hinreichend erprobt.
- Die in den neunziger Jahren von GSF vorgeschlagene Auslegung eines Streckenverschlusses [104] wurde bisher nicht in einem repräsentativen In-situ-Versuch getestet, womit eine abschließende Bestätigung dieses Konzeptes aussteht.
- Die Integrität des Salzgebirges im Fall hoher Gasdrücke in Endlagerhöhlräumen wurde bisher nicht ausreichend in den deutschen Forschungsprogrammen berücksichtigt. Entsprechende FuE-Arbeiten in Verbindung mit der notwendigen Verbesserung vorhandener gekoppelter HM-Modelle werden daher empfohlen.

- Zwischen 1984 und 1993 wurde ein In-situ-Versuch zur zeitlich begrenzten Einlagerung echter hochradioaktiver Strahlenquellen im Forschungsbergwerk Asse vorbereitet [91]. Im Zuge dieser Arbeiten wurde ein komplettes Transport- und Einlagerungssystem für hochradioaktive Abfälle entwickelt und erfolgreich erprobt und von der zuständigen Bergbehörde betriebsplanmäßig zugelassen. Wegen der Verschiebung von Schwerpunkten im deutschen Forschungsprogramm wurde das Projekt 1993 vorzeitig eingestellt, so dass ein Einlagerungssystem für Cogéma-Kokillen (und alternativ von Brennstabkokillen) bis heute nicht repräsentativ erprobt ist.

In Zusammenfassung der Ergebnisse des Arbeitskreises AkEnd [1] muss die geologische Formation eines Endlagers in einer Salzformation die folgenden Kriterien erfüllen:

- Die Mächtigkeit des Wirtsgesteins muss mindestens 100 m betragen.
- Die Einlagerungssohle soll nicht weniger als 300 m und nicht mehr 1500 m unter der Tagesoberfläche liegen.
- Die Fläche des Endlagers muss mindestens 3 km² betragen.
- Die hydraulische Leitfähigkeit des Wirtsgesteins muss kleiner als $1 \cdot 10^{-10}$ m/s sein.
- Es dürfen keine Erkenntnisse vorliegen, die die Einhaltung der vorgenannten Eigenschaften über einen Zeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahre zweifelhaft erscheinen lassen.

Im Licht dieser Kriterien ist es notwendig, die bisher gezogenen Schlussfolgerungen zu überdenken. Die Bedeutung langsamer Migrationsprozesse, wie z. B. die Diffusion von Trägerflüssigkeiten und –gasen im gesamten Endlagersystem einschließlich von Barrieren und Auflockerungszonen im frühen als auch langfristig verheilten Zustand, im ungestörten Wirtsgestein und im Deckgebirge bekommt hiernach eine deutlich höhere Bedeutung.

3.9 Bilaterale Zusammenarbeit

3.9.1 US-DOE

Vom 25. bis 27. April 2001 fand ein gemeinsamer deutsch-amerikanischer Workshop über "Geologische Endlagerung von radioaktiven Abfällen in Steinsalz" in Carlsbad, New Mexico, USA statt. Daran nahmen 18 Vertreter von deutschen Organisationen, die sich mit der Endlagerung beschäftigen, und 20 Vertreter des Carlsbad Field Office (CBFO) des US- Department of Energy teil.

3.9.1.1 Hintergrund

Die sichere Verwahrung von langlebigem radioaktivem Material ist eine weltweite Herausforderung. Zu ihrer Lösung wird in den meisten Ländern die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen bevorzugt. In den letzten 50 Jahren sind verschiedene geologische Medien, die als Wirtformationen in Frage kommen, untersucht. Die drei am meisten favorisierten und deshalb am besten untersuchten Formationen sind:

- kristalline Gesteine,
- Salzgesteine,
- Tongesteine.

Außerdem stand damals das US-amerikanische Programm, das sich mit Tuffgestein beschäftigt, kurz vor der Genehmigung.

Die zwei in der Untersuchung von Steinsalz als Wirtsgestein für radioaktive Abfälle führenden Nationen sind Deutschland und die Vereinigten Staaten. Beide Nationen untersuchen Steinsalz zur sicheren Endlagerung von radioaktiven Abfällen seit mehr als 30 Jahren. Beide betreiben Endlager im Salz für radioaktive und chemische Abfälle. Der Umfang der Arbeiten zur Erforschung der Endlagerung in Salzgesteinen und die zur Verfügung stehenden Mittel verringern sich in beiden Ländern seit einigen Jahren.

So wurden im Jahre 2000 dem deutschen Programm zur Endlagerung in Salz Beschränkungen auferlegt. Zum einen wurde das Untertagelabor Asse in Salz geschlossen und zum anderen wurde ein drei- bis zehnjähriges Moratorium für die Standorterkundung von

Gorleben beschlossen. Seitdem ist es ein deutsches Anliegen, das Wissen über den Bau von Endlagern im Salz zu erhalten. Internationale Zusammenarbeiten wären eine Kosten effektive, wissenschaftlich attraktive Alternative zu dieser Beschränkung. In den USA wurden die jährlichen finanziellen Aufwendungen für das CBFO seit der Zertifizierung der WIPP im Mai 1998 kontinuierlich reduziert. Die augenblicklichen FuE-Arbeiten des CBFOs konzentrieren sich auf den sicheren Betrieb der WIPP und auf die periodisch alle fünf Jahre durchzuführenden Re-Zertifizierungen der WIPP. Eine weitere Aufgabe des CBFO ist der Erhalt des Wissens und des Bestandes an Wissenschaftlern trotz der reduzierten Mittel.

Insgesamt könnte eine engere Zusammenarbeit der beiden führenden Nationen auf dem Gebiet der Erforschung von Endlagern in Salzformationen eine attraktive und Kosten effektive Versicherung gegen den vorzeitigen Verlust an nicht zu ersetzenden wissenschaftlichen Expertisen und Wissen sein.

3.9.1.2 Zielsetzung des Workshops

Aus diesen Gründen bestanden die Hauptabsichten des Workshops darin

- die weiten Erfahrungen in Deutschland und den Vereinigten Staaten aus den letzten 30 Jahren in der Entwicklung und im Anlegen von Endlagern auszutauschen,
- die langjährige Zusammenarbeit zwischen den deutschen Organisationen und dem CBFO durch Identifizierung und gemeinsame Bearbeitung von FuE-Aktivitäten zu verstärken und
- die Erfahrungen aus Deutschland und den USA bei der Standortauswahl und der Entwicklung von Endlagern in Steinsalz einzusetzen, um das globale Verständnis, die Einschätzung und das Interesse an Steinsalz als Wirtsgestein für geologische Endlager zu vergrößern.

Im Vorfeld des Workshops waren folgende Themen für eine potenzielle Zusammenarbeit identifiziert worden. Sowohl von amerikanischer als auch von deutscher Seite wurde jeweils ein Ansprechpartner benannt. In Tab. 3.1 sind die Themen mit den entsprechenden Kontaktpersonen zusammengestellt.

Tab. 3.1 Themen mit amerikanischen und deutschen Kontaktpersonen

Thema	Kontaktpersonen	
	USA	Deutschland
Strömung und Transport	Randy Roberts, SNL	Eckhard Fein, GRS
Nahfeld-Geochemie	Yifeng Wang, SNL	Jae Il-Kim, INE Bernhardt Kienzler, INE
Gebirgsmechanik	Frank Hansen, SNL	Otto Schulze, BGR
Nahfeld-Prozesse	Jonathan Rath, SNL	Tilmann Rothfuchs, GRS
Verschlüsse und Monitoring	Frank Hansen, SNL	Peter Sitz, TUBA-Freiberg

3.9.1.3 Ergebnisse des Workshops

Das auf dem Workshop präsentierte Material beschrieb den gesamten Bereich der Erfahrungen in Standortauswahl und Entwicklung von Endlagern, die in beiden Ländern im Laufe der letzten 30 Jahre gemacht wurden. Der Workshop war hilfreich beim Fokussieren auf die interessantesten Gebiete beider Delegationen. Es stellte sich auch heraus, dass es auf manchen Gebieten bereits eine intensive Zusammenarbeit gibt. So gibt es bereits die Kollaboration "Entwicklung und experimenteller Test von Modellen" auf dem Gebiet der Gebirgsmechanik und auf dem Gebiet der Nahfeld-Prozesse die gemeinsame Teilnahme an der Projekten BAMBUS II und ALOHA.

Präsentationen und Kontakte, die während des Workshops gemacht wurden, stärkten und vertieften das lang andauernde, kooperative Verhältnis zwischen den deutschen Endlager-Organisationen und dem amerikanischen CBFO und dessen Auftragnehmern. Alle Themen und besonders die sich ergebende Diskussion boten den Teilnehmern des Workshops die Gelegenheit zukünftige gemeinsame Aktivitäten zu identifizieren.

Beide Parteien stimmten darin überein, Gebiete für den Know-How-Austausch zu suchen. Zum Beispiel bieten sich Standortbefahrungen von Sondershausen und Salzdetfurth und Benchmark-Rechnungen auf den Gebieten T-H-M, EQ3/6, Grundwassertransport, Geomechanik und Sicherheitsanalyse an. Zusätzlich schlug CBFO die Entwicklung eines großskaligen, langandauernden In-situ-Tests am Standort WIPP vor. Die einhellige Meinung war, dass ein solcher Test zukünftig durchgeführt werden sollte, dass aber der Beginn innerhalb der nächsten zwei Jahre sehr unwahrscheinlich sei. Nichtsdestotrotz

werden die weitergehenden Kollaborationen das Interesse daran fortschreiben und die Möglichkeit offen halten, einen solchen lang andauernden Feldversuch durchzuführen. Deshalb sollte aus Sicht des CBFO als weitläufiges Ziel der Zusammenarbeit in beiderseitigem Interesse die Entwicklung eines großskaligen, langandauernden In-situ-Tests am Standort WIPP identifiziert werden.

Ein weiteres Ziel, die Initiierung des Erfahrungsaustauschs über Standortauswahl und Entwicklung von Endlagern im Steinsalz und die Erweiterung des Verständnisses und der Beurteilung für Endlager von langlebigem radioaktivem Material im Salz, wird in Zukunft durch Kollaborationen, gemeinsame Präsentationen auf internationalen Konferenzen und der aktiven Unterstützung und einer zukünftigen Beteiligung am vorgeschlagenen OECD/NEA Salt Club realisiert werden.

3.9.2 Ukraine

Die Aufgabe des „Science and Technology Centre“ der Ukraine (STCU) ist es, FuE-Projekte ukrainischer Wissenschaftler und Ingenieure zu unterstützen und so ehemaligen Experten auf dem Gebiets von Massenvernichtungswaffen die Möglichkeit für neue Aufgaben zu schaffen. Das Programm war ursprünglich von Kanada, Schweden, den USA und der Ukraine initiiert worden. Unter anderem wurde auch das Problem der Beseitigung radioaktiver Abfälle aufgegriffen und bearbeitet. Anfang 2001 wurde das Forschungsprojekt „Scientific and Technical Grounds for Chernobyl NPP Radioactive Wastes Disposal in Deep Boreholes Completed in Korostensky Crystalline Massif“ (STCU-Projekt 1396) von der EU im Rahmen des TACIS Programms bewilligt. Gemäß den EU-Regulierungen wurde das Projekt von der GRS (Prof. Dr. Brewitz) als „Collaborator“ begleitet. Hauptaufgaben waren dabei, Planung und Ausführung der Projektarbeiten zu optimieren, Doppelarbeit soweit als möglich zu vermeiden und Verknüpfungen zu Forschungsarbeiten in anderen Ländern aufzuzeigen. Des Weiteren waren Hinweise auf die Verbreitung der Forschungsergebnisse im internationalen Bereich zu geben und die Grundlage für eine längerfristige Kooperation zu schaffen. Auf Seiten des „Collaborators“ bestand die Möglichkeit eines frühzeitigen Zugriffs auf die Forschungsergebnisse und einer Beteiligung bei der kommerziellen Umsetzung. Das Forschungsprojekt wurde in 2003 beendet. Auf der Grundlage der erzielten Ergebnisse wurde vom Radioökologischen Zentrum der Nationalen Akademie der Wissenschaften der Ukraine ein weiterführendes Projekt beantragt, für das eine grundsätzliche Finanzierungszusage mittlerweile vorliegt.

3.9.2.1 Hintergrund

Das Problem der Isolierung und Beseitigung radioaktiver Abfälle ist nach dem Reaktorunfall in Chernobyl in der Ukraine besonders dringlich geworden. Grobe Schätzungen haben ergeben, dass ca. 62.000 m als hochradioaktiv und langlebig einzustufen sind. Bei der Umwandlung des Chernobyl - „shelter“ in ein umweltverträgliches System werden ca. 44.000 m derartiger Abfälle anfallen. Dazu kommen noch ca. 12.500 m von entsprechend kontaminiertem Material aus der Chernobyl Exclusion Zone (CEZ). Das Aufkommen hochradioaktiver Abfälle aus dem Betrieb der ukrainischen Kernkraftwerke wird bis zum Jahr 2025 mit insgesamt 3.300 m angenommen.

In der Ukraine sollen kurzlebige radioaktive Abfälle aus dem Chernobyl-Unfall oberflächennah beseitigt werden. Für die langlebigen und Pu-haltigen Abfälle ist entsprechend eines Regierungsbeschlusses von 1999 eine Endlagerung in tiefen geologischen Formationen vorgesehen. Ökologische und ökonomische Gesichtspunkte spielen bei der Konzeptfindung für das Endlager und die Standortfindung eine herausragende Rolle. Die Geologie ist grundsätzlich bekannt. Im Nordteil der Ukraine sind die Gesteinskennwerte des tieferen Untergrundes noch zu ermitteln, weil hier Tiefenaufschlüsse fehlen. Für die Endlagerung in einem neu anzulegenden Bergwerk gibt es eine erste Konzeptstudie. Als technische Alternative bietet sich ein System von 1 bis 4 km tiefen Bohrlöchern mit einem Durchmesser von ca. 1 m an, die in kristallines Gestein abgeteuft und die nach Einlagerung der Abfälle im Bereich der Deckgebirgsschichten versiegelt werden. Die meisten radioaktiven Abfälle stammen direkt aus der „Chernobyl Exclusion Zone“ (CEZ) oder aus den angrenzenden Gebieten. Diese Zone stellt in Europa ein einmaliges Gebiet dar, das weitestgehend unbesiedelt ist. Von daher kommt es für den Bau eines zentralen Endlagers in besonderem Maße in Frage, zumal die tiefer liegenden kristallinen Gesteinen unter günstigen geologische Bedingungen eine solche Möglichkeit bieten.

Bisher ist das Bergwerkskonzept bearbeitet worden, das aber als aufwendig und kostenintensiv erscheint. Daher soll ergänzend untersucht werden, ob ein Bohrlochkonzept geologisch und technisch möglich und wirtschaftlich zu realisieren ist. Für beide gilt, dass die Endlagerstätte in der derzeit „verbotenen Zone“ liegen soll, um einerseits um den Abfall nicht in ein bisher unbelastetes Gebiet bringen zu müssen (Akzeptanz) und andererseits um aufwendige Transporte zu vermeiden. Zu vielen mit der Aufgabenstellung im Zusammenhang stehenden Fragen gibt es durch die unterschiedlichen Arbeiten in der Region Chernobyl bereits Teilantworten und gut fundierte Erkenntnisse. Im Rahmen des

Projektes galt es diese in verschiedenen Wissensgebieten gesammelten Daten aufgabenbezogen auszuwerten und darüber hinaus die verbleibenden offenen Punkte zu klären. Vor einer zukünftigen Entscheidungsfindung wird ein Vergleich beider Konzepte stehen müssen, wobei neben den Kostengesichtspunkten auch die Sicherheitsaspekte zu klären sind.

Das Arbeitsprogramm zielte vorrangig auf folgende Aufgaben

- Konkretisierung der technischen und finanziellen Konzepte für die Erstellung von großdimensionierten tiefen Einlagerungsbohrlöchern,
- Vorplanung eines Einlagerungskonzeptes mit den notwendigen technischen und geotechnischen Barrieren und einer Monitoring-Einrichtung,
- Spezielle Untersuchung des Wasserhaushalts im granitischen Gestein in größerer Tiefe und möglicher Wechselwirkungen mit den Abfällen sowie
- Geologische, geophysikalische und hydrogeologische Arbeiten zur Standortvorauswahl.

3.9.2.2 Geologische Aufgabenstellungen

Die für die Bohrlochlagerung in Frage kommenden Gesteine sind archaische / proterozoische Migmatite des ukrainischen kristallinen Schilds. Im Gebiet der "verbotenen Zone" sind diese bedeckt von quartären und tertiären Sedimenten und von mesozoischen Gesteinen mit einer Gesamtmächtigkeit von ca. 450 m. Nach Westen ist diese Überlagerung geringmächtiger ausgebildet, während nach Osten hin die Mächtigkeiten sehr schnell zunehmen. Aus diesem Grund kommt der Auswertung von Luftbildern und der geophysikalischen Messdaten größte Bedeutung zu. Mit ihrer Hilfe sollen zwei geeignete Gebiete von je 300 km² für derartig tiefe Einlagerungsbohrlöcher vorausgewählt werden, die möglichst gering tektonisch überprägt und von größeren Lineamenten deutlich entfernt sind. Als Ergebnis der Auswertungen soll eine detaillierte tektonische Karte für das "abgedeckte" Kristallin entwickelt werden.

Zusätzlich gilt es, mögliche aktive Störzonen zu identifizieren, die die mechanische Integrität des Endlagers beeinträchtigen können. Auf der Basis historischer Daten sowie aktuellen Beobachtungen und Messwerten wird ein computergestütztes geodynamisches Modell erarbeitet, mit dem die tektonischen Deformationen des geologischen Unterbaus simuliert, Zuordnungen zu den großtektonischen Phasen getroffen und die zukünftige Entwicklungen prognostiziert werden sollen. Das Ergebnis soll eine detaillierte Darstellung des geotektonischen Beanspruchungsplanes für das geologische Basement in der Chernobyl-Region in Form von Raum- und Zeitbildern sowie die Ausweisung tektonisch stabiler bzw. aktiver Bereiche liefern. Sofern möglich sollen Bohrlochmessungen zur Validierung der Ergebnisse verwendet werden.

3.9.2.3 Geochemische und hydrogeologische Arbeiten

Die Eigenschaften der granitischen Gesteine lassen sich wegen fehlender Aufschlüsse nur indirekt untersuchen. Seismische Laufzeitmessungen lassen vermuten, dass unterhalb 5 km geringere Werte mit stärker gestörten Bereichen korrelieren. Erfahrungen aus dem Bergbauggebiet von Krivoy Rog lassen sich wegen der großen Entfernung nur sehr begrenzt übertragen. Von dort weiß man z. B., dass die Oxidationszone ca. 1.400 m tief in das kristalline Basement hinabreicht, ausgewiesen durch verschiedenartige Mineralumwandlungen. In größerer Tiefe unterhalb 1.000 m wird der Geochemismus lokal von hochsalinaren Lösungen bestimmt. Insgesamt hat die Bearbeitung der geochemisch-mineralogischen Aspekte beim Bohrllochkonzept eine größere Bedeutung als beim Schachtkonzept. Dazu kommt, dass im Nordteil des ukrainischen Schilds die salinaren Tiefenwässer aufsteigen und in das oberflächennahe Grundwasser eintreten. Von daher sind die existierenden hydrogeologischen Modelle zu erweitern und auf eine Schadstofftransport-Modellierung anzuwenden. Diese geologischen Verhältnisse und die auch zukünftigen Unsicherheiten bezüglich der geologischen Datenbasis bedingen für die Bohrlochlagerung die Entwicklung eines geeigneten geotechnischen Barrierekonzeptes.

3.9.2.4 Bearbeitung von Waste-Management- und technischen Problemen

Auf der Grundlage der geowissenschaftlichen Studien sollen die Ansätze für eine Sicherheitsbewertung des Bohrllochkonzeptes mit möglichen Konsequenzen für die Umwelt erarbeitet werden. Gleichzeitig sollen die wesentlichen Anforderungen an die Standortaus-

wahl, das bohrtechnische Verfahren, die Einlagerungstechnik und das Verschlusskonzept festgelegt werden. Aus beidem ergeben sich Hinweise auf ggf. notwendige Überwachungsverfahren und die regulatorische Behandlung und Ausgestaltung des Bohrlochkonzeptes.

Für eine Entscheidungsfindung ist darüber hinaus auch ein Kostenvergleich mit dem Schachtkonzept erforderlich. Im Projekt sollen alle für diesen Vergleich relevanten Kostenarten ermittelt und auf die verschiedenen Betriebsphasen umgelegt werden.

3.9.2.5 Zusammenfassung der Arbeitsergebnisse

Vor Beginn gezielt inhaltlicher Arbeiten wurden wichtige Parameter des kristallinen Grundgebirges der Ukraine und besonders aus dem Gebiet der westlichen CEZ und der angrenzenden Bereiche des Korosten Plutons aus bekannten Datenquellen zusammengetragen und vorausgewertet. Dazu gehören die lithologische und strukturelle Ausbildung der Gesteinsmassive, die seismischen und geodynamischen Verhältnissen sowie überschlägige Angaben zur Hydrogeologie. Da vor dem Hintergrund der Aufgabenstellung bisher keine oder nur wenige Felduntersuchungen durchgeführt worden sind, wurden eine Reihe von Erkenntnissen durch die Auswertung großräumiger geophysikalischer Aufnahmen gewonnen. Diese basieren vorwiegend auf einer Reihe von gravimetrischen, seismischen, geomagnetischen und elektromagnetischen Messungen.

Unter Verwendung von Satellitenaufnahmen wurden u.a, die geomorphologischen Verhältnisse analysiert, wozu auch Informationen über die klimatischen Entwicklungen und die regionalspezifische Bodenerosion heran gezogen wurden. Im Zusammenhang mit bekannten Strukturen der früheren Entwicklungsphasen in der oberen Erdkruste wurde auf die Identifizierung von neotektonischen Strukturen besonderer Wert gelegt. Die Auswertung des Geländeprofiles und der Oberfläche zusammen mit der lithologischen Zusammensetzung des Quartärs und die Vegetation lieferten weitere Hinweise auf mögliche rezente Bewegungen. Die Zusammenschau der z.T. sehr verschiedenartigen Datensätze und die Einbeziehung regionalhydrogeologischer Kenntnisse erlaubte eine erste Vorauswahl geeigneter Gebiete.

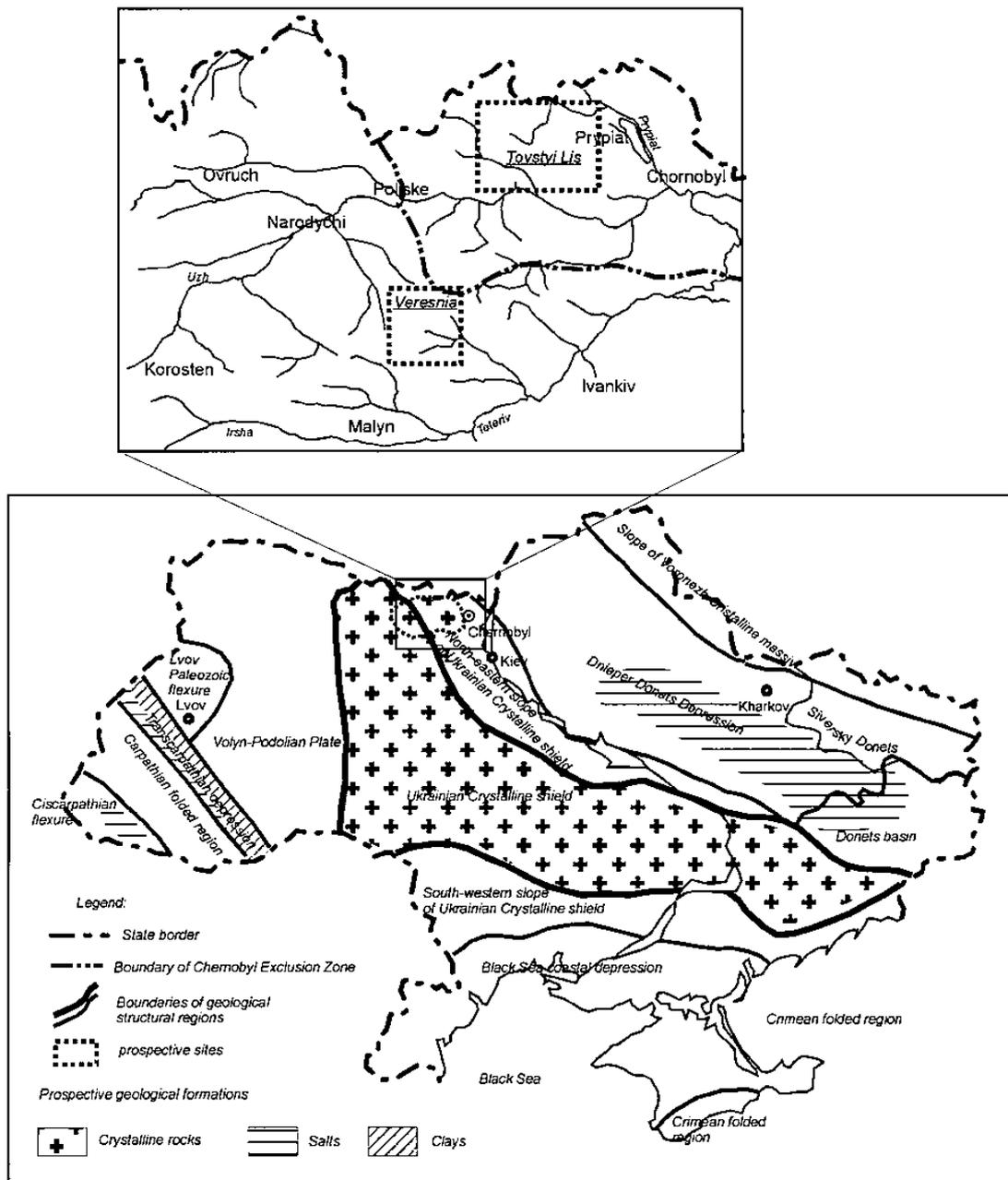


Abb. 3.3: Mögliche Standortgebiete für die tiefe Endlagerung radioaktiver Abfälle auf der Grundlage der struktureologischen Karte (unten) und der CEZ (oben) [101]

Auf der Grundlage der Datenanalysen und Auswertungen für das großräumige Untersuchungsgebiet im Maßstab 1:50.000 konnten zwei mögliche Gebiete für weitere Arbeiten identifiziert werden, die "Veresnya-" und die "Tovsty Lis-" Region (Abb. 3.3). Von beiden erscheint "Veresnya" unter geologischen Gesichtspunkten besonders geeignet. Aufgrund der Tatsache, dass sie außerhalb der CEZ liegt, hat sie unter dem Gesichtspunkt

der nicht-geologischen Kriterien nur eine zweite Priorität. Folglich wurden die Informationen über die "Tovsty-Lis"-Region detaillierter analysiert. Die Geologie ist hier wesentlich komplexer. Verschiedene große Störungszonen von unterschiedlicher lateraler Erstreckung und die z.T. unvollkommenen Angaben zu den petrologischen Verhältnissen machen eine Bewertung schwieriger. Der Nordwesten der Region wird z.T. vom "Pergian"-Komplex eingenommen, der aus Graniten, Porphyriten und Dioriten des oberen Proterozoikums gebildet wird und der durch mehrere Störungen blockartig zerlegt ist. Der "Gitomir"-Komplex im Südosten besteht dagegen aus Graniten und Migmatiten des unteren Proterozoikums. In einer Entfernung von 6 bis 26 km von Chernobyl kommen diese Gesteine großflächig vor.

Für die Auswahl geeigneter Untersuchungsgebiete müssen auch die Erfahrungen aus dem benachbarten "Korosten"-Pluton berücksichtigt werden. Von hier ist bekannt, dass die Gesteine, bedingt durch endogen angelegte Störzonen z.T. deutlich aufgelockert sind und so den Grundwassertransport begünstigen. Zumeist reicht diese Zone heute bis in eine Tiefe von ca. 100 m. Die Übergangszone bis in ca. 300 m ist deutlich geringer aufgelockert. In Bereichen von 500 bis 700 m und tiefer treten derartige Elemente nicht mehr auf. Hier sind es die tektonisch bedingten Risse, die durch Spannungsumlagerungen und neo-tektonische Ereignisse entstanden sind, die die Gebirgspermeabilität ausmachen. Ergebnisse aus sehr tiefen Bohrungen z.B. aus der Umgebung von Krivoy Rog zeigen, dass die Porosität der granitoiden Gesteine nicht mehr als 1,5 bis 2,1 % beträgt. Ungefähr 70 % des Porenvolumens ist an Störungen und Mikrorisse gebunden, die mit Sekundärmineralien gefüllt sind. Wenn man die so genannte Totporosität berücksichtigt, sind es nur 20 bis 30 % des Porenvolumens, das für den Grundwassertransport zur Verfügung steht. Das bedeutet, dass das offene Porenvolumen im Durchschnitt bei 0,3 bis 0,5 % liegt. Dieser Wert ist nur in ausgeprägten Störungszonen signifikant größer. Die Erfahrung hat auch gezeigt, dass in Tiefen größer als 3,5 bis 4,5 km die Porosität und der Wassergehalt der Gesteine wieder ansteigen. Dies hat allerdings nicht unbedingt eine Erhöhung der Gesteinspermeabilität zur Folge. Als Beispiel konnten in der KTB-Tiefbohrung bei Windisch-Eschenbach in Tiefen von einigen 100 m bis etwa 1500 m Permeabilitäten von einigen Millidarcy gemessen werden. In 3,5 bis 7 km Tiefe lagen die Permeabilitätswerte bei ca. 10^{-1} bis 10^{-2} Millidarcy.

Ein weiterer wichtiger Indikator ist der Wasseraustausch bzw. Wassertransport in der Hydrosphäre, der sich überschlägig als intensiv, bedeutend, gering und sehr gering bewerten lässt. Im "Korosten"-Pluton reicht die Zone mit einem intensivem Wasseraustausch

bis in 100 bis 200 m Tiefe, wobei eine Abhängigkeit von den hydrogeologischen Verhältnissen im allgemeinen und der quartären Überdeckung sowie den exogen bedingten Veränderungen der granitoiden Gesteine im besonderen gegeben ist. Ein deutlicher Wasseraustausch konnte stellenweise bis in Tiefen von 1000 m (östlicher Bereich) und von 1500 m (westlicher Bereich) festgestellt werden. Die Zone mit geringem und sehr geringem Wasseraustausch folgt in ca. 2 bis 3 km Tiefe. Diese Erfahrung korreliert mit der beobachteten tiefenabhängigen Zunahme der Wassersalinität, wie das Beispiel aus der Krivoy Rog - Region zeigt (s. Tabelle 3.2).

Tab. 3.2 Salinität und pH-Werte der Wasserproben aus der Bohrung SG-8 im Krivoy Rog Gebiet [101]

Tiefe [m]	Gesteinstyp	Salinität [g/l]	pH	Anmerkung
0 - 500	granitoide und metamorphe Gesteine	5,3	7,5	meteorisches Wasser
500 - 1000	granitoide und metamorphe Gesteine	20,5	7,7	“
1000 - 1500	metamorphe Gesteine, Granite	63,4	7,8	“
1500 - 2500	metamorphe Gesteine, Granite	121	8,2	Zone mit zirkulierenden Tiefenwässern
2500 - 3000	granitoide Gesteine	133	8,2	“
3000 - 4500	granitoide Gesteine	138	8,2	“
4500 - 5500	granitoide Gesteine	142	8,4	“

Die Fließrichtung des Grundwassers bzw. der tiefen Grundwässer wird von einer Reihe von unterschiedlichen Parametern bestimmt wie z.B. der Morphologie und des daran gekoppelten Druckgefälles. Das betrifft besonders die Tiefenzonen, in denen ein intensiver bzw. deutlicher Wasseraustausch stattfindet. Mit wachsender Tiefe reduziert sich der Einfluss dieser Faktoren auf die Grundwasserdynamik mit Ausnahme der großen Flussgebiete Dnieper und Pryriat erheblich. Zunehmend spielen beim Wasseraustausch geologische Parameter eine Rolle wie z.B. Gebirgsspannungen und Spannungsumlagerungen, die Hydratation und Dehydratation von Mineralen, die Füllung von Gesteinsporen und Klüften mit Sekundärmineralen sowie die Wasserverdrängung z.B. durch neotektonische Bewegungen. Dies ergibt als ganzes ein komplexes und interagierendes System aus hydrodynamischen und geologischen Parametern und Prozessen. Dabei

werden die Stoffaustauschvorgänge zwischen der tieferen Lithosphäre und den oberflächennahen Gesteinsformationen durch die Fluidmigration immer bedeutsamer. Im nördlichen Teil des ukrainischen Schields treten in der Region von Khmelnik (280 km südwestlich von Chernobyl) treten aus den tieferen Zonen gasführende Wässer in die Zone des intensiven Wasseraustausches ein. Solche Gebiete sind bei der Suche nach Standorten für tiefe Bohrlöcher besonders zu beachten und ggf. auszuschließen. Die Auswertung der überregionalen hydrogeologischen Befunde hat gezeigt, dass die geringe Permeabilität der meisten Störungzonen die Möglichkeiten für das Auftreten derartiger Aufstiegswässer stark einschränkt.

Dieser Aspekt ist bei den zukünftigen Arbeiten verstärkt zu beachten. Neben der Charakterisierung der oberflächennahen Grundwasserleiter und des hydrogeologischen Regimes sind potentielle Gebiete für das Aufsteigen tiefer Grundwässer bzw. juveniler Wässer genauer zu untersuchen. Die für das Abteufen tiefer Bohrlöcher geeigneten Standorte sollten sich durch eine geringe Wasserführung, durch geringe Druckunterschiede und geringe Fließraten auszeichnen.

Ein weiterer wichtiger Parameter ist das Sorptionspotential der Gesteine für die Rückhaltung von Radionukliden. In den tiefen Gesteinen tragen dazu im Wesentlichen die Sekundärmineralien auf Störungsflächen und in Klüften bei. Auch wenn die Sorptionskapazität nicht besonders hoch ist, so kann sie bei der sehr großen Tiefe der Einlagerungsbohrlöcher und den damit verbundenen langen Transportstrecken sowie der geringen Geschwindigkeit der Tiefenwässer/Lösungen nennenswert zur Langzeitisolierung der Abfälle beitragen.

3.9.2.6 Zukünftige Arbeiten

Vor diesem fachlichen Hintergrund weisen die beiden vorausgewählten Gebiete so weit günstige Eigenschaften für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in sehr tiefen Großbohrlöchern auf. In einem Anschlussvorhaben werden seit Anfang 2005 die begonnenen Arbeiten vertiefend fortgesetzt. Dazu gehören eine Feinkartierung im Maßstab 1:10.000 mit genauer Darstellung der hydrogeologischen Situation und die Auswahl möglicher Bohransatzpunkte. Gleichzeitig werden die Bohrlochtechnik und die Bohrlochauslegung für eine mögliche Einlagerung in großer Tiefe spezifiziert.

3.10 NET-EXCEL ein europäisches thematisches Netzwerk zur Empfehlung und Schwerpunktsetzung künftiger gemeinsamer FuE-Projekte

Ausgangspunkt für das EU-finanzierte Projekt war die allgemeine Einschätzung, dass der effiziente Einsatz europäischer Ressourcen bei der Erforschung und Entwicklung sicherer Methoden zur Endlagerung radioaktiver Abfälle Impulse setzen kann, von denen die Zusammenarbeit der europäischen Endlagerorganisationen profitieren kann, sowohl was die Planung nationaler Programme als auch die Entwicklung internationaler Projekte anbetrifft.

Aufgrund der guten Erfahrungen bei der bisherigen multinationalen Zusammenarbeit entstand die Idee zur Einrichtung des NET.EXCEL-Projektes. Mit einer umfassenden und unvoreingenommenen Machbarkeitsstudie sollten die Möglichkeiten einer nachhaltigen Zusammenarbeit in Europa durch die Bildung eines Netzwerkes von Endanwendern und die Analyse des gegenwärtigen Standes untersucht sowie Notwendigkeiten für gemeinsame zukünftige Projekte in Forschung, technologischer Entwicklung und Demonstration (FuE) in den drei Endlagerformationen Steinsalz, Ton / Tongesteine und kristalline Gesteine identifiziert werden. Teilnehmende Partner waren Svensk Kaernbraenslehantering AB (Schweden), Posiva Oy (Finnland), Empresa Nacional de Residuos Radiactivos SA (Spanien), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (Deutschland), Agence Nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Frankreich), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Schweiz), Organisme National des Déchets Radioactifs et des Matières Fissiles Enrichies (Belgien) und United Kingdom Nirex Limited (Großbritannien).

Das Projekt wurde in einzelnen Projektphasen abgewickelt. Das erste Ziel war, Informationen über Stand und Planungen von FUE-Arbeiten in jedem der teilnehmenden Länder einschließlich der Methodik und der Kriterien zur Festlegung der Prioritäten zusammenzustellen. Diese nationalen Informationen wurden zunächst für jede Endlagerformation separat zusammengefasst. In einer folgenden Synthese wurden alle drei Endlagerformationen sowie die gemeinsamen Ziele der Projektpartner erfasst.

Aufgrund von Zeit- und Ressourcenbeschränkungen konzentrierte sich das NET.EXCEL-Projekt auf die Untersuchung langlebiger radioaktiver Abfälle und die geologische Endlagerung in tiefen Formationen. Weiterhin beschränkte sich das Projekt ausschließlich auf die Betrachtung der Arbeiten der beteiligten Organisationen. Dies war keinesfalls zu-

friedenstellend und führte zu der frühen Empfehlung, den künftigen Untersuchungsumfang auf andere Abfallarten und Endlagerkonzepte sowie auf die Arbeiten anderer mit dem Management und der Überwachung von Endlagern befasster Organisationen und Behörden auszudehnen.

In der letzten Phase des Projektes wurden auf der Grundlage der durch das Netzwerk erstellten Methodik und Kriterien die Projekte identifiziert und klassifiziert, an denen ein gemeinsames europäisches Interesse besteht. Als Ergebnis entstand eine gemeinsame Liste von potentiellen EU-Projekten mit hoher Priorität.

3.10.1 Endlagerkonzepte und gegenwärtiger Stand der nationalen Entwicklungen

Von allen beteiligten Organisationen wird die Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle in einer geologischen Formation als bevorzugte Entsorgungsoption angesehen. Auch hinsichtlich der Auslegung und Auswahl des Endlagermediums besteht grundsätzliche Übereinstimmung:

- Die geologische Situation des Endlagers sollte zumindest für den Zeitraum charakterisiert werden können, in dem der Abfall von der Biosphäre isoliert werden muss.
- Die Komponenten des Mehrbarrierensystems tragen alle zur Langzeitsicherheit des Endlagers bei.
- Das Endlagerverhalten soll möglichst robust sein.

Die verschiedenen nationalen Konzepte sind auf der Grundlage dieser Prinzipien für unterschiedliche Endlagerformationen entwickelt worden. Die einzelnen Formationen, die in diesem Projekt dargestellt werden, weisen dabei z.T. ganz besondere Charakteristika im Hinblick auf die Langzeitsicherheit auf:

- In kristallinen (Fest-)Gesteinen können durch Risse im Gestein Wegsamkeiten entstehen, die eine Migration von Radionukliden ermöglichen.
- Im Ton wird die Migration von Radionukliden bei Wassersättigung hauptsächlich durch Diffusion gesteuert.
- In einem Endlager im Steinsalz, das ausschließlich zum Zweck der Endlagerung von Abfällen errichtet wird, sind grundsätzlich keine zirkulierenden Wässer vorhanden.

Aufgrund dieser Unterschiede in den Eigenschaften der Endlagermedien ergeben sich unterschiedliche technische Ansätze. Bei Endlagern in kristallinen Gesteinen kommt der technischen Barriere eine größere Bedeutung zu als der geologischen Barriere (häufig zur Vereinfachung der Standortauswahl). Endlagerkonzepte im Steinsalz basieren dagegen auf dem nicht vorhandenen Grundwasser in der Wirtsgesteinsschicht. Bei den Endlagerkonzepten für Tone kommt den geologischen und geotechnischen Barrieren in etwa die gleiche Bedeutung zu.

Die in den nationalen Programmen geplanten und durchgeführten geologischen FuE-Arbeiten werden stark durch die im jeweiligen Land ausgewählten geologischen Endlagerformationen sowie die für das Endlager vorgesehenen Versatzmaterialien beeinflusst.

Diesbezügliche Sachverhalte spielen bei der Standortauswahl, dem Genehmigungsverfahren bei Errichtung und Betrieb sowie beim Verschluss des Endlagers eine entscheidende Rolle. Der Fortschritt, der in den verschiedenen Programmen erreicht wurde, und ihre Unterschiede sind in Tabelle 3.3 dargestellt.

Tab. 3.3 Stand der Endlagerarbeiten in den einzelnen Ländern [19]

	Programmplanung für die Endlagerentwicklung	allgemeine Untersuchungen zu Optionen und Alternativen	strategische Auswahl von Endlagerkonzepten, -medien etc.	Festlegung der Standortanforderungen	Standortuntersuchung	Standortentscheid, Genehmigungsverfahren, Errichtung	Betriebsphase, Verschluss
SKB	A	A	A	W	S		
Posiva	A	A	A	A	W	S	
Enresa	A	A	S				
GRS	A	W	S	Moratorium	Moratorium	Moratorium	
Andra	A	W	S				
Nagra	A	A	W	S	W		
Ondraf / Niras	A	A	S				
Nirex	A	W	S				

3.10.2 Festlegung von Schwerpunktthemen

Die in den nationalen Programmen angewandten Methoden zur Festlegung, Schwerpunktsetzung und Initiierung von FuE-Aktivitäten zeigen weitgehende Übereinstimmung. Auch wenn derzeit keine Seite den Anspruch erhebt, über ein vollständig quantifizierendes und formalisiertes Verfahren zur Prioritätensetzung zu verfügen, wird dennoch von allen auf vergleichbare Ausgangsfaktoren zurückgegriffen.

Grundlagen zur Ermittlung des FuE-Bedarfs

- Ergebnisse von FuE-Arbeiten einschließlich ihrer üblichen wissenschaftlichen Bewertung sowie des auf ihnen aufbauenden wissenschaftlichen/technischen Fortschritts im allgemeinen
- Identifikation von Sicherheitsmängeln oder fehlende Sicherheitsmaßnahmen aufgrund von
 - Problemen bei der Entwicklung eines leistungsfähigen Instrumentariums und der Quantifizierung von Prozessen, die das Verhalten der Systeme und Teilsysteme bestimmen
 - Problemen, die im Rahmen von Sicherheitsbewertungen aufgedeckt werden
 - Problemen, die bei der Auslegung oder Errichtung/Herstellung von Barrieren im Endlager angetroffen werden
- Bewertung von Unsicherheiten und deren Klassifizierung hinsichtlich ihrer Sicherheitsrelevanz
- Bewertungen und Stellungnahmen der Behörden in den Genehmigungs-/Zulassungsverfahren
- Bedenken und Anforderungen anderer beteiligter Gruppen (Öffentlichkeit, Gemeinden etc.)

Faktoren, die bei der Festlegung der Prioritäten für FuE-Aktivitäten zu berücksichtigen sind

- Faktoren, die durch die politischen, geologischen und technologischen Rahmenbedingungen des Landes vorgegeben werden:
 - die zeitliche Planung anhand von länderspezifischen Zeitplänen mit schrittweisem Vorgehen
 - die Relevanz der länderspezifischen Auswahl von Endlagerkonzept und Wirtsgestein

- die Bedeutung der wahrgenommenen Sicherheit und/oder Akzeptanz bei den „stakeholders“ und in der Öffentlichkeit
- Faktoren aus Sicherheitsanalysen oder allgemeinen technischen Normen zur Optimierung und Auswahl von Werkstoffen und Verfahren. Diese Faktoren, die häufig für eine quantitative Klassifizierung möglicher FuE-Aktivitäten z. B. durch Sensitivitätsanalysen oder ähnliche Verfahren geeignet sind, befassen sich mit
 - der Bedeutung der jeweiligen Aktivität für die technische Realisierbarkeit eines Endlagersystems, für die Erreichung eines akzeptablen Sicherheitsniveaus oder für deren Nachweis,
 - dem Erfordernis zur Reduzierung von Unsicherheiten, zur Quantifizierung oder zur Begrenzung konservativer Vereinfachungen.
 - dem Erfordernis eines robusten, unempfindlichen Systems, das flexibel genug ist, an neue technische Entwicklungen und Erkenntnisse angepasst zu werden.
 - den Auswirkungen auf Ressourcen, Kosten und/oder Optimierungen und
 - der Verfügbarkeit von Ressourcen.
- Weitere weniger quantifizierbare Faktoren, die vorwiegend auf subjektiven Einschätzungen ihres Erfolgspotentials, ihrer Verfügbarkeit oder ihres Kompetenzerfordernisses etc. beruhen, haben oft einen entscheidenden Einfluss auf die Festlegung der Prioritäten. Dies sind u.a.:
 - der Nutzen aus dem erfolgreichen Abschluss einer FuE-Aktivität
 - die Bereitstellung von Ressourcen, um die FuE-Maßnahme erfolgreich durchführen zu können
 - die Chancen und Risiken für Erfolg oder Misserfolg
 - die Verfügbarkeit der erforderlichen Instrumentarien und Verfahren sowie der Kompetenzen, und
 - die Notwendigkeit der Entwicklung und Aufrechterhaltung einer ausreichenden Kompetenzbasis, für die in Zukunft absehbaren Aufgaben.

Auf diese Weise wurden in den beteiligten Ländern die FuE-Programme öffentlich dargelegt und z.T. von Fachleuten diskutiert.

3.10.3 Nutzen für zukünftige gemeinsame FuE-Aktivitäten

Der hauptsächliche Nutzen einer internationalen Kooperation bei der Durchführung der Endlagerforschung (wie z. B. Möglichkeiten der Kostenreduzierung oder die Verfügbarkeit einer breiteren/besseren Kompetenzbasis) sind seit langem klar erkannt und deshalb der Grund für die bestehende Zusammenarbeit. Für eine Ausweitung der Zusammenarbeit bieten sich weitere Möglichkeiten wie die Entwicklung und Aufrechterhaltung gemeinsamer Kompetenzzentren oder die gemeinsame Nutzung außergewöhnlicher Expertisen an.

Der Schwerpunkt des NET.EXCEL-Projektes, die Möglichkeiten einer systematischeren Zusammenarbeit zu erkunden, spricht ebenfalls die Fragen und Probleme einer erweiter-ten Zusammenarbeit an, die sich unter folgenden Aspekten ergeben können:

- unterschiedlichen Zeitplänen für die Endlagerentwicklung in den verschiedenen Ländern: Die vielen gemeinsamen Bemühungen lassen die Bereitschaft vermuten, sich auch an Aktivitäten zu beteiligen, die ihren vollen Nutzen für manche Partner erst in einigen Jahren entfalten. Auf FuE-Gebieten mit weit fortgeschrittenem Wissensstand, der für die derzeitigen Belange ausreicht, kann der Wille zu einer umfassenderen Beteiligung jedoch beschränkt sein.
- unterschiedlichen Endlagermedien: Stark standort- oder auslegungsbezogene FuE-Bereiche sind für eine breitere Gruppe möglicherweise von geringerem Interesse, für die internationale Zusammenarbeit einer kleineren Gruppe dagegen u. U. gut geeignet.
- unterschiedlichen Anforderungen an die Qualitätssicherung in verschiedenen Phasen der Endlagerentwicklung: Die Einhaltung der ISO 9001 und der ISO 14001 erleichtert die Festlegung einheitlicher Regelungen für QS-Verfahren und eines einheitlichen Qualitätsniveaus.
- einer schlechteren Verfügbarkeit unabhängiger Institutionen für Zweitgutachten und Reviews: Die Bildung von Kompetenzzentren und der gemeinsame Zugriff auf außergewöhnliches und verstreutes Fachwissen sind oft vorteilhaft für das Kompetenzniveau der gebildeten Gruppe. Die Verfügbarkeit von Kompetenzen für Zweitgutachten und Reviews kann sich hierdurch jedoch verschlechtern. Man sollte sich dieses Effektes besonders bei der Erörterung der Zuarbeit und Beratung der Aufsichts- oder Regulierungsbehörden bewusst sein.

3.10.4 Nationale FuE-Themen von hoher Priorität

Um die Identifizierung gemeinsamer FuE-Themen zu erleichtern, wurde eine nicht direkt von den Endlagermedien abhängige fachliche Einteilung für notwendig erachtet. Hierbei wurden die folgenden Themenbereiche ausgewählt, die zwar nicht sämtliche Bereiche der Endlagersicherheitsforschung abdecken, aber einen wesentlichen Teil der Arbeiten der einzelnen Länder repräsentieren.

- Radioaktiver Abfall
- Abfallverpackung (Behälter und Verpackung)
- Puffer
- Versatz
- Verschlüsse und Abdichtungen
- Geosphäre
- Errichtung und Betrieb von Endlagern
- Überwachung
- Performance und Sicherheitsbewertung

Unter Berücksichtigung dieser Themen wurden von allen Beteiligten die wichtigsten Punkte der einzelnen nationalen Programme aufgelistet. Diese Punkte wurden in einer sog. „100-er Liste“ zusammenfasst, womit eine Grundlage für die Erstellung einer Prioritätenliste vorliegt.

Die Auswahl gemeinsamer FuE-Themen diene neben dem Vergleich der verschiedenen Ansätze und Zielrichtungen auch dazu, den unterschiedlichen Nutzen gemeinsamer Anstrengungen zu erfassen. Vorrangige Aspekte für gemeinsame FuE sind:

- Vergleich verschiedener Optionen, Entwicklung gemeinsamer Strategien oder Entwicklung vergleichbarer Ansätze und Vorgehensweisen,
- Kompetenzentwicklung oder –erhaltung sowie
- Informationsaustausch und Wissenserhalt.

Die verschiedenen Zielsetzungen gemeinsamer Aktivitäten und deren Nutzen sind in Tabelle 3.4 aufgeführt. Diese Unterschiede wurden bei der Erstellung der Rangliste möglicher gemeinsamer FuE-Aktivitäten berücksichtigt.

Tab. 3.4 Möglicher Nutzen gemeinsamer FuE-Aktivitäten

Zielsetzung eines FuE-Projekts	wichtigste Werte einer internationalen Zusammenarbeit
Entwicklung eines grundlegenden Verständnisses	umfassende wissenschaftliche Kompetenz und Beteiligung, umfassende Bewertungen, Kosteneinsparungen
Entwicklung gemeinsamer Strategien	genaue Untersuchung des Themas, gründliche Erfassung von Alternativen, umfassende Bewertungen, weite Streuung der Ergebnisse
Erzeugung oder Verbesserung spezifischer Daten	hohe Kompetenz, akzeptierte Methodik, hohes Qualitätsniveau, gemeinsamer Aufbau von Kompetenzen
Zusammenstellung oder Festlegung einer gemeinsamen Datenbasis	Kostenteilung bei Instandhaltung und Verfügbarkeit, gemeinsame und bewertete Dokumentation der Daten und ihrer Qualität
Durchführung spezifischer Experimente oder Demonstrationsversuche	Kostenteilung, größere Kompetenz, umfangreichere oder bessere Ausrüstung
Entwicklung/Erhaltung notwendiger Kompetenzen oder Einrichtung gemeinsamer Kompetenzzentren	Kostenteilung, bessere Qualität, „kritische Masse“ von Experten

Der Ansatz der NET.EXCEL-Gruppe, die Möglichkeiten und Probleme einer erweiterten Zusammenarbeit unter Berücksichtigung verschiedenster Aspekte zu betrachten, führte zu einer Reihe von Fragen, wie z.B. derartige koordinierte Tätigkeiten initiiert, organisiert und geleistet werden müssen, um die gesteckten Ziele zu erreichen. Ebenso wurde von den Beteiligten erkannt, dass eine mögliche künftige Fortsetzung der im NET.EXCEL-Projekt erprobten Aktivitäten und ihre Erweiterung auf andere Fachgebiete (z. B. Biosphäre, oberflächennahe Endlagerung, nicht radioaktive Abfälle) zu neuen Problemstellungen führen kann, deren Konsequenzen abgeschätzt werden müssen.

Zur Erstellung einer Rangliste von Aktivitäten, die für gemeinsame Projekte von hohem Interesse sind, wurden im Rahmen des NET.EXCEL-Projektes zwei verschiedene Ansätze erprobt:

- eine Klassifizierung der Themen/Aktivitäten der „100-er Liste“, die alle Themen enthält, die eine hohe Priorität für die Organisationen besitzen und eine Priorisierung in der Weise, dass jeder Teilnehmer sein Interesse an einer Beteiligung an jedem einzelnen der aufgeführten Themen kenntlich macht (0 = kein Interesse, 1 = geringes Interesse, 2 = mittleres Interesse, 3 = hohes Interesse). Durch Aufsummierung der Wertungen ergab sich jeweils eine Bewertungszahl.

- eine Auswahl der für eine Zusammenarbeit in Frage kommenden Themen und Fachgebiete durch das Plenum der NET.EXCEL-Projektgruppe. Die Auflistung basierte auf den nationalen Interessen der Teilnehmer, ihrer Einschätzung, welche Projekte für eine Kooperation geeignet sind sowie einem allgemeinen Verständnis des internationalen Standes der Endlagerforschung und –entwicklung.

3.10.5 Themen mit hoher Priorität für eine künftige Zusammenarbeit

Bei beiden Ansätzen ergaben sich ähnliche Ergebnisse, aus denen eine Auflistung künftiger FuE-Gebiete erstellt wurde, die von einer europäischen Zusammenarbeit profitieren könnten (Tab. 3.5). Die vorgeschlagenen FuE-Themen wurden bewusst mehr allgemein als in allen Einzelheiten formuliert, um eine Zusammenfassung ähnlicher Themengebiete zu erleichtern.

3.10.6 Ausblick

3.10.6.1 Künftiger FuE-Bedarf mit hoher Priorität

Die Ermittlung eines künftigen gemeinsamen FuE-Bedarfes, der von jeder Seite hohe Priorität eingeräumt wird, hängt stark vom Detaillierungsgrad der Beschreibung des nationalen FuE-Konzeptes ab. Im Zuge des NET.EXCEL-Projektes war schon früh erkennbar, dass die von den einzelnen Beteiligten zur Verfügung gestellten Grundlagen hinsichtlich ihrer Ausarbeitung und Detaillierung nicht sehr einheitlich waren.

In beiden verwendeten Ansätzen ergaben sich Schwierigkeiten bei der Klassifizierung nach Bewertungszahlen, da die wichtigsten Ziele und Abgrenzungen der vorgeschlagenen FuE-Themen nicht genau festgelegt werden konnten. Hierdurch wurde eine frühzeitige Zusammenstellung erschwert. Nachdem aber durch die Beteiligten Prioritäten gesetzt worden waren, war es nach dem vorliegenden Klassifizierungsschema möglich, Themen mit hoher Priorität zu übergreifenden Fachgebieten – den thematischen Bereichen – zusammenzufassen. Zur Identifizierung exakt umgrenzter und international konsistenter Projekte müssen diese Themen allerdings noch genauer gegliedert werden. Eine Methodik wurde hierfür noch nicht erprobt. Dieses Problem stellte sich bei dem in der Plenumsarbeit verwendeten Ansatz nicht, da die Auswahl der geeigneten FuE-Akti-

Tab. 3.5 FuE-Themen, die von europäischer Zusammenarbeit profitieren könnten

Fachgebiete hoher Priorität	Performance	Abfall	Endlagerbarrieren	Geosphäre
Methoden und Werkzeuge der Sicherheitsbewertung	x			
Auflösung abgebrannter Brennelemente und verglaster HAW <i>Auflösung und Migration von Radionukliden bei hohem pH-Wert</i>		x		
Aufsättigung und Entwicklung des Buffers			x	
Versatz <i>Versatzmaterial und Versatztechniken</i>			x	
Verschlüsse und Abdichtungen <i>Verschluss- u. Abdichtungsstrategie</i>			x	
Speziation und Migration von Radionukliden <i>Bestätigung von Diffusionsdaten</i>			x	x
Auflockerungszone			x	x
Störungen der Geosphäre durch das Endlager			x	x
Gasmigration in dichten Medien <i>Gasdurchlässigkeit des Gesteins</i>			x	x
Radionuklidmigration in der Geosphäre <i>Radionuklidrückhaltung</i>				x
Hochskalierung von Eigenschaften des Wirtsgesteins				x
Kritikalität		x		
Gasbildung durch Zersetzung organischer Verbindungen		x		
Langzeitstabilität HMC				x

vitäten von langjährigen und in der internationalen Zusammenarbeit erfahrenen Experten erfolgte. Daneben stand auch die Nachvollziehbarkeit der Entscheidung im Mittelpunkt der Arbeit, d. h. die Begründung, warum manche Aktivitäten ausgewählt wurden und andere nicht. Trotz der unterschiedlichen Erstellungsmethodik der Prioritätenliste lassen sich dennoch deutliche Übereinstimmungen erkennen.

Die Identifizierung von Fachgebieten mit hoher Priorität durch eine Stellungnahme von Experten (der bis heute am häufigsten eingesetzten Methode zur Einleitung einer internationalen Zusammenarbeit) erscheint insgesamt geeignet zur Auswahl von FuE-The-

men aus einer Prioritätenliste, insbesondere, wenn es sich nicht um „Topthemen“ der Liste handelt. Zum Nachweis der Vollständigkeit der Rangliste ist allerdings ein stärker formalisiertes und strukturiertes Klassifizierungsverfahren erforderlich. Dies gilt selbst bei einer weniger detaillierten und wegen des Ausgangsmaterials nicht unter jedem Aspekt einheitlichen Prioritätenliste wie beim NET.EXCEL-Projekt.

3.10.6.2 Verfahren zur Verbesserung eines systematischen Ansatzes für die zukünftige Zusammenarbeit

Ein systematisches Verfahren, das zu einer erheblichen Verbesserung der künftigen europäischen und internationalen Zusammenarbeit bei FuE-Aktivitäten führen kann, sollte möglichst folgende Anforderungen erfüllen:

Das Verfahren oder die Methodik sollte in der Lage sein,

- nachzuweisen, dass keine Themen, die von größerem Interesse sind, fehlen,
- Projekte so abzugrenzen, dass die zusammengeführten Forschungsaktivitäten
 - sich gegenseitig unterstützen,
 - ein Diskussionsforum für die beteiligten Personen bieten zur Methodik, zu Arbeitsergebnissen und zu deren Interpretation sowie
 - eine effektive Mitnutzung von Instrumentarien, Methoden und Modellen ermöglichen,
- Organisationsformen vorzuschlagen, die zum gegenseitigen und allgemeinen Nutzen sind und wie sie damit die Grundziele der internationalen Zusammenarbeit erfüllt.

Die Überlegungen und Ergebnisse sollten in nachvollziehbarer Weise dokumentiert sein und die Möglichkeit bieten, sich Fachgebieten erneut zuzuwenden, ohne die bereits erfolgten Arbeiten nochmals durchführen zu müssen.

Das Netzwerk oder die Gruppe sollte mit seinen Arbeiten folgende Interessenslagen berücksichtigen:

- der etablierten, für die Umsetzung verantwortlichen Organisationen als auch neu gebildeter Organisationen oder neuer Programme,
- der übernationalen Organisationen wie der Europäischen Kommission, die die Forschung unterstützen und
- der weltweit bestehenden Hochkompetenzzentren.

Im Hinblick auf die Erkundung von Möglichkeiten einer erweiterten FuE-Zusammenarbeit von Organisationen wurde im Rahmen des NET.EXCEL-Projektes folgender schrittweiser Ansatz entwickelt, um FuE-Aktivitäten zu identifizieren, zu klassifizieren und Projekte für eine Zusammenarbeit festzulegen.

- Als Ausgangspunkt eignet sich eine Aufstellung wie die „100-er Liste“, die aus nationalen Programmen oder Erfordernissen zusammengestellt werden kann. Diese kann bei Bedarf sukzessive aktualisiert und durch Ideen und Vorgaben der wissenschaftlichen Gemeinschaft oder von Aufsichts- oder Regulierungsbehörden erweitert sowie auf nahe gelegene Fachgebiete ausgedehnt werden. In diesem Stadium ist kein besonders hoher Detaillierungsgrad für die Eingaben erforderlich.
- Die Ideen/Aktivitäten werden nach unterschiedlichen Themengebieten klassifiziert. Verschiedene Zielsetzungen oder Wertschöpfungen werden ermittelt und durch die Teilnehmer hinsichtlich ihres Interesses an einer Beteiligung bewertet.
- Für Themenbereiche mit vielen vorgeschlagenen Aktivitäten, die auch von hohem gemeinsamem Interesse sind, werden Expertengruppen gebildet, die die Vorschläge erörtern, weiter abgrenzen und in geeignete Projekte zusammenführen. Dabei sind die erforderliche Kompetenz oder Ausrüstung und die Möglichkeiten für spin-off-Effekte zu berücksichtigen. Bei umfangreicheren Themenbereichen oder in komplizierten Fällen können hierfür entscheidungsunterstützende Methoden eingesetzt werden wie mehrparametrische Analysen oder das Einholen von Expertenmeinungen. Diese Expertengruppen sollten auch Empfehlungen für Kompetenzzentren geben, die in der Lage sind, das Projekt durchzuführen.
- Routinemäßige Verhandlungen und Abstimmungen gehen der Ernennung eines Leiters, der Festlegung des Untersuchungsumfanges und des Finanzierungsplanes sowie einem Vertragsabschluss voraus. Für die Arbeiten wird eine geeignete Organisationsstruktur gewählt.
- In bestimmten Themenbereichen, in denen über längere Zeit hinweg viele Forschungsarbeiten durchgeführt werden, können beratende Expertengruppen zu einer projektbegleitenden Einrichtung gemacht werden. Ziel wäre es, die Ergebnisse für den weiteren Arbeitsablauf zu bewerten, die Aufträge zu überprüfen oder neue Initiativen zu ergreifen. Derartige Koordinierungsgruppen bestehen bereits für die internationale Zusammenarbeit im Bereich sicherheits- und performancebezogener FuE-Aktivitäten und im Bereich der Biosphäre.

Die Erfahrungen des NET.EXCEL-Projektes zeigen, dass die anfänglichen Ziele einer Klassifizierung und Gliederung von FuE-Aktivitäten in geeignete Projekte sowie die weitere Detaillierung der Projekte zu optimistisch angesetzt waren. Die Option, die fehlende Abgrenzung möglicher Projekte durch die Erstellung einer sehr detaillierten Ausgangsliste zu beheben, wäre sehr aufwendig und würde ohnehin den Einsatz von Experten erfordern. Mit Hilfe des geschilderten Verfahrens war es möglich, sinnvolle Schwerpunkte zu setzen und eine fachgebietsbezogene Klassifizierung durchzuführen, ohne dabei zu weitgehende Anforderungen an die genaue Abgrenzung der nationalen Eingaben zu stellen. Es blieb den nationalen Experten überlassen, auf welche Aspekte näher eingegangen werden sollte.

Die Einführung eines systematischen Verfahrens sollte einer Verwendung weniger formaler Methoden nicht im Wege stehen, wenn eine Auswahl einfach und unkompliziert möglich ist. Bei diesem Verfahren sind weitere Aspekte zu berücksichtigen, die von bestimmten Faktoren stark beeinflusst werden, wie einer möglichen Vergrößerung einer bereits bestehenden Gruppe, einer möglichen Ausdehnung der behandelten Themengebiete, dem Dach, unter dem eine solche Gruppe tätig ist, sowie dem erforderlichen Formalitätsniveau, das erreicht werden soll.

4 Zusammenfassung

Das Projekt hat dazu beigetragen, den Stand des Wissens auf dem Gebiet der Langzeitsicherheitsanalysen zu erweitern und Modelle und Eingangsparameter abzusichern. Nationale und internationale Entwicklungen wurden verfolgt, FuE-Projekte mit Relevanz für die Langzeitsicherheitsanalyse wurden ausgewertet und, wo möglich, wurden neue Modellansätze für Sicherheitsanalysen abgeleitet. Die wichtigsten Erweiterungen und erzielten Fortschritte werden im folgenden dargestellt.

Ein Schwerpunkt der Arbeiten war die Erweiterung der Grundlagen bei der methodischen Vorgehensweise bei Langzeitsicherheitsanalysen. Hierzu wurde eine Liste von Sicherheits- und Performance-Indikatoren zusammengestellt, die neben der bisher betrachteten Dosisrate zur Darstellung von Ergebnissen der Sicherheitsanalyse verwendet werden könnten. Die verschiedenen Indikatoren wurden durch Nachrechnung bekannter Langzeitsicherheitsstudien für ein Endlager in Granit erprobt. Auf Basis der Ergebnisse wurden geeignete Indikatoren identifiziert und Empfehlungen für deren Anwendungsbereiche gegeben.

In früheren Sicherheitsanalysen für ein Endlager in Salzgestein wurde der für das Projekt PSE entwickelte vereinfachte Konvergenzansatz verwendet. Dieser Ansatz wurde für ein einsöhliges Endlager entwickelt und betrachtete nicht unterschiedliche Teufenlagen einzelner Grubenbaue des Endlagers. Es hat sich aber in realen Grubengebäuden gezeigt, dass in unterschiedlichen Teufen unterschiedliche Konvergenzraten beobachtet werden. Außerdem ist in einem mit Flüssigkeit gefüllten Endlager der Fluiddruck teufenabhängig und damit auch die Stützwirkung des Fluids auf den einzelnen Sohlen unterschiedlich. Desweiteren unterscheidet sich die Stützwirkung von feuchtem und trockenem Versatz. Auch in einem unversetztem Grubenbau ohne erhöhten Fluiddruck nimmt die anfängliche Konvergenzrate mit der Zeit ab und strebt einem stationären Wert zu. Deshalb wurde der Konvergenzansatz um die Modellierung der Teufenabhängigkeit, Anstieg des Fluiddrucks durch Flüssigkeitszutritt oder Gasbildung, Stützwirkung von trockenem oder feuchtem Versatz und eine so genannte explizite Zeitabhängigkeit ergänzt.

Zur Auswirkung von Gasen im Endlager wurden orientierende Modellrechnungen für unterschiedliche Abfallarten und unterschiedliche Wirtformationen durchgeführt. Es wurden typische Endlager mit LLW und HLW in Salz-, Granit- bzw. Tonformationen betrach-

tet. Bei den Granitformationen, die immer auch Klüfte aufweisen, ist mit einem Entweichen der Gase aus dem Endlager zu rechnen. Ebenso ist bei Endlagern in Tonformationen ein Entweichen der Gase über Zweiphasenfluss bzw. dilatanzgesteuerter Transport über Mikrorisse möglich. Im Fall von Salz liegen die Gaseindringdrücke so hoch, dass kein Transport über Zweiphasenfluss möglich ist. Hier kann durch Speicherung von Gasen in Hohlräumen mit nicht kompaktierbarem Versatz der Aufbau eines Gasdrucks, der höher als der Gebirgsdruck liegt und damit zur Bildung unerwünschter Wegsamkeiten führen kann, vermieden werden. Weiterführende Arbeiten sind aber insbesondere noch zu den Transportmechanismen in Salz und Tonformationen notwendig.

Für die Langzeitsicherheitsanalyse sind die Inventare und die chemische Form, in der die Radionuklide vorliegen, von großer Bedeutung. Nach Feststellung von Unterschieden in den Inventardaten für abgebrannten Brennstoff einzelner Länder wurden aktualisierte Abbrand- und Aktivierungsrechnungen für abgebrannte Brennelemente durchgeführt, die neuere Angaben zu Verunreinigungen und aller Materialien berücksichtigen. Die aktualisierten Rechnungen konnten die bisher in Deutschland verwendeten Inventardaten bestätigen, wobei allerdings die Stickstoffmenge im Brennstoff als wichtigste Quelle für C-14 signifikant vom Herstellungsverfahren abhängt. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die chemische Form des C-14. In bisherigen Sicherheitsanalysen wurde davon ausgegangen, dass C-14 in anorganischen Verbindungen vorliegt. Neuere Arbeiten haben gezeigt, dass ein großer Teil des C-14 in Form organischer Verbindungen aus Brennstoff und Metallteilen freigesetzt wird. In organischer Form kann C-14 wesentlich mobiler sein, was in zukünftigen Langzeitsicherheitsanalysen entsprechend berücksichtigt werden muss.

Zum Thema Endlager in Tonformationen wurde an internationalen Reviews zum FEP-Katalog der OECD-NEA "FEP-CAT" und zur Sicherheitsstudie "Opalinuston" der NAGRA mitgearbeitet. Diese Arbeiten bildeten einen wichtigen Input zur Erstellung konzeptueller Modelle für die Modellierung des Radionuklidtransport aus Endlagern in Tonformationen. Die in diesem Vorhaben erstellten konzeptuellen Modelle dienen als Grundlage für die Entwicklung von Instrumentarien für eine Langzeitsicherheitsanalyse für Endlager in Tonformationen, die derzeit im Rahmen eines anderen FuE-Vorhabens stattfindet.

Zu Auswirkungen klimatischer Veränderungen wurden Arbeiten zusammengestellt und gesichtet, die sich mit Klimaprognosen über lange Zeiträume befassen. Hier sind die Arbeiten zum EU-Projekt BIOCLIM hervorzuheben, in denen Klimamodellrechnungen über Zeiträume von 1 Million Jahre für unterschiedliche Szenarien durchgeführt wurden. Die

Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine globale Erwärmung als Folge einer intensiven Nutzung der fossilen Energieträger das Klima über mehr als 100 000 Jahre beeinflusst und eine neue Eiszeit erst nach mehr als 150 000 Jahren zu erwarten ist. Diese Modellrechnungen sind allerdings noch mit großen Unsicherheiten behaftet und einzelne Klimaforscher vertreten die Ansicht, dass eine Eiszeit schon in wenigen 10 000 Jahren auftreten kann. In einem zweiten Schritt wurden mögliche Auswirkungen solcher klimatischer Veränderungen auf Fernfeld und Biosphäre eines Endlagers zusammengestellt und diskutiert. Hier wurde zwischen den Auswirkungen von Warm- und Kaltzeiten unterschieden und bei Kaltzeiten besonders auf die Unterschiede von Glazial- und Periglazialgebieten eingegangen. Diese Arbeiten bilden die Basis zur Erstellung von Szenarien, für die im Rahmen einer Langzeitsicherheitsanalyse Konsequenzen ermittelt werden sollen.

Orientierende Modellrechnungen wurden zur Langzeitsicherheit von generischen Endlagern in Salz- und Granitformationen durchgeführt. Für beide Formationen wurden Rechnungen für einen Referenzfall - im Fall von Salz ein Störfallszenario - und eine begrenzte Zahl von Parametervariationen durchgeführt. Bei beiden Formationen stellen Nah- und Fernfeld eine wichtige Barriere dar. Generell sind die Einflüsse des Quellterms beim Granit größer als im Salz, da bei einem Endlager im Salz Transportprozesse im Grubengebäude die Radionuklidfreisetzung verzögern, während im Granit, der Transport von Radionukliden mit niedrigen Sorptionswerten durch das Nahfeld sehr schnell erfolgt. Für das Fernfeld eines Endlagers im Salz wurde zusätzlich eine zweidimensionale Ausbreitungsrechnung durchgeführt. Es zeigt sich, dass die Transportpfade der Radionuklide durch das betrachtete Modellgebiet deutlich durch die Sorptionseigenschaften in den verschiedenen Sedimenten bestimmt werden. Diese Rechnungen zeigen die große Bedeutung mehrdimensionaler Ausbreitungsrechnungen für das Verständnis des Radionuklidtransports in heterogenen Modellgebieten.

Um die methodischen Vorgehensweisen wie auch die verwendeten Modellansätze und Daten dem Stand von Wissenschaft und Technik fortlaufend anzupassen, ist die Weiterverfolgung der wissenschaftlichen Grundlagen auf nationaler und internationaler Ebene von großer Bedeutung. Ein wichtiges zukünftiges Thema stellt der Safety Case dar. Hierzu sollten die internationalen Aktivitäten verfolgt und Vorschläge für nationale Arbeiten erarbeitet werden. In diesen Bereich fallen auch die Sicherheits- und Performance-Indikatoren. Hier ist es wichtig, die Arbeiten auf die Endlagerformationen Salz und Ton zu erweitern.

Ebenso ist es wichtig, die Arbeiten zur Auswirkung klimatischer Veränderungen auf die Langzeitsicherheit von Endlagern weiterzuführen. In einem nächsten Schritt sollte versucht werden, Szenarien zur Auswirkung klimatischer Veränderungen zu formulieren, konzeptuelle Modelle zu erstellen und anhand orientierender Berechnungen die Größenordnung der Auswirkungen abzuschätzen.

Generell ist es sinnvoll, eine aktualisierte Langzeitsicherheitsanalyse, bzw. einen Safety Case für ein Endlager in Salzformation zu erstellen, da die letzte umfangreiche Sicherheitsanalyse weit mehr als 10 Jahre zurückliegt. Es liegen mittlerweile sehr viele aktualisierte Daten und Modellvorstellungen zu Einzeleffekten vor, die in die Programmmodule übernommen werden sollten. Hierzu gehören der aktualisierte Konvergenzansatz, die überarbeitete Porositäts-Permeabilitätsbeziehung, aktualisierte Quellterme mit neuen Daten für maximale Lösungskonzentrationen im Nahfeld, wie auch die Durchführung aktualisierter zwei-, bzw. dreidimensionaler Ausbreitungsrechnungen mit r^3t unter Berücksichtigung aller aktuellen Daten für das Fernfeld. Für einen Safety Case sollten außerdem die für ein Endlagersystem im Salz vorliegenden Studien über natürliche Analoga herangezogen werden. Hier könnten u. a. Ergebnisse des NAnet-Projekts verwendet und weiter ausgewertet werden.

5 Literatur

- [1] Auswahlverfahren für Endlagerstandorte-Empfehlungen des AkEnd-Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, W&S Druck GmbH, Köln, Dezember 2002.
- [2] 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.
- [3] Baltes, B.; Röhlig, K.-J.: Szenarienanalysen im Rahmen des Nachweises der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-2633, November 1998.
- [4] Baltes, B.; Kindt, A.; Röhlig, K.J.: Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk. Vorschlag der GRS. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3110, Juli 2003.
- [5] Baudoin, P.; Gay, D.; Certes, C.; Serres, C.; Alonso, J.; Lührmann, L.; Martens, K.H.; Dodd, D.; Marivout, J.; Vieno, T.: Spent fuel disposal Performance Assessment - SPA project. Final Report. EUR 19132 EN, Luxemburg 2000.
- [6] Becker, D.-A.; Buhmann, D.; Storck, R.; Alonso, J.; Cormenzana, J-L.; Hugi, M.; van Gemert, F.; O'Sullivan, P.; Laciok, A.; Marivoet, J.; Sillen, X.; Nordman, H.; Vieno, T.; Niemeyer, M.: Testing of Safety and Performance Indicators (SPIN), EUR-19965, 2003.
- [7] Becker, D.-A., Buhmann, D., Keesmann, S., Kröhn, K.-P., Rübél, A.: Untersuchung von Einzelthemen bezüglich der Modellierung von Endlagersystemen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-200, Braunschweig 2003.
- [8] BIOCLIM: Modelling Sequential Biosphere Systems under climate change for radioactive waste disposal. Environmental change analysis. Deliverable D1, 2001.

- [9] BIOCLIM: Modelling Sequential Biosphere Systems under climate change for radioactive waste disposal. Global climatic features over the next million years and recommendations for specific situations to be considered. Deliverable D3, 2001.

- [10] BIOCLIM, Modelling Sequential Biosphere Systems under Climate Change for Radioactive Waste Disposal. Continuous climate evolution scenarios over western Europe (1000 km scale). Deliverable D7, 2003.

- [11] BIOCLIM: Modelling Sequential Biosphere Systems under climate change for radioactive waste disposal. Environmental change analysis. Deliverable D1, 2001

- [12] Brüggemann, R.; Hossain, S.; Kaschanian, B.; Kühle, T.; Nies, A.; Ohme, G.; Pattloch, F.; Podtschaske, T.; Rimkus, D.; Stelte, N.; Storck, R.: Modellansätze und Ergebnisse zur Radionuklidfreisetzung aus einem Modellsalzstock. Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE), Fachband 16, Berlin 1985.

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

- [14] Cleall, P., Melhuish, T.A., Thomas, H.: Vapour transfer in clay based engineered barriers in high level nuclear waste disposal. Workshop über "Clay microstructure and its importance to soil behaviour", Lund, Sweden, Oktober, 2002.

- [15] Cvetkovic, V.; Hua Cheng; Selroos, J-O.: First TRUE Stage Evaluation of Tracer Retention Understanding Experiments (first stage) at Äspö. International Cooperation Report ICR-00-01, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, SKB, Schweden, August 2000.

- [16] Davies, C.; Bernier, F. (eds.): Impact of the excavation disturbed or damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories. EUR 21028 EN, European Commission 2005.

- [17] Deng, B.; Campbell, T.J.; Burriss, D.R.: Hydrocarbon Formation in Metallic Iron/Water Systems. Environ. Sci. Technol. 31, 1185-1190 (1997).

- [18] Englert, A.; Hashagen, U.; Jaekel, U.; Nitzsche, O.; Schwarze, H.; Vereecken, H.: Transport von gelösten Stoffen in Grundwasser - Untersuchungen am Testfeld Krauthausen. Grundwasser 3, 115-124 (2000).

- [19] European Commission: Highly ranked areas and issues for European co-operation on research and development. - Final report (in preparation).

- [20] Fahrenholz, C.: Strömungsmodellierung in einer hydrogeologisch komplexen Rinnenstruktur am Beispiel der Fassungsanlage Panzenberg (TWV Verden). Diplomarbeit, TU-Braunschweig, 2001.

- [21] Fein, E.; Software Package r³t. Model for Transport and Retention in Porous Media. Final Report. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-192, Braunschweig, April 2004.

- [22] Gas Generation, Accumulation and Migration in Underground Repository Systems for Radioactive Waste: Safety-relevant Issues, Reims, France, 26-28 June 2000; a workshop organised by the OECD Nuclear Energy Agency and the European Commission and hosted by the French National Radioactive Waste Management Agency (ANDRA) with the support of the University of Reims Champagne-Ardenne.

- [23] Gas Generation and Migration in Radioactive Waste Disposal. Safety-relevant Issues. Workshop Proceedings, Reims, France, 26-28 June 2000, ISBN: 92-64-18672-7. Paris 2001.

- [24] Geletneky, J. W.: Hydrogeologische/Hydrologische Untersuchung einer Prä-Flutungssituation am Beispiel des Gessentals im ehemaligen ostthüringischen Uranbergbaubereich. PhD Thesis, Universität Jena, 2002.

- [25] Gens, A., Alonso, E.E., Lloret, A. and Batlle, F.: Prediction of long term swelling of expansive soft rocks: A double-structure approach. Geotechnical Engineering of Hard Soils-Soft Rocks (Anagnostopoulos, A., Schlosser, F., Kalteziotis, N, and Frank, R. ed.), 1:495-500, A.A. Balkema, Rotterdam, 1993.

- [26] Gomit, J.M., Hirsekorn, R.-P., Martens, K.-H., Prij, J.: EVEREST Project, Volume 3b: Salt Formation, Sites in France and the Netherlands and Common Conclusions on Salt. Final Report EUR 17449/3b EN, European Communities, Luxembourg 1997.
- [27] Haubner, E.; Götz, A.: Klimawandel und Alpen - Ein Hintergrundbericht, 2002, www.ecology.at/files/energiewende/2001-3-04.pdf.
- [28] Heimann, D.: Auswirkungen globaler Klimaänderungen auf sommerliche Starkniederschläge im bayerischen Alpenvorland. Schlussbericht. 1999, www.bayfor klim.uni-muenchen.de/schlussberichtteil1.pdf.
- [29] Heusermann, S.; Göbel, I; Heemann, U.: ERA Morsleben-Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere in der Schachanlage Marie, BGR Hannover, Juli 2001.
- [30] Hölzemann, S., Class, H., Helmig, R.: A new Concept for Numerical Simulation and Parameter Identification of Multiphase Flow and Transport Processes in Cohesive Soils. Proceedings der ISSMGE International Conference "From experimental evidence towards numerical modelling of unsaturated soils", Weimar, 2003 (Veröffentlichung in Vorbereitung).
- [31] Hossain, S.; Podtschaske, T.; Rimkus, D.; Stelte, N.; Storck, R.; Weber, P.: Einzeluntersuchungen zur Radionuklidfreisetzung aus einem Modellsaltzstock. Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE). Fachband 15, Berlin, Januar 1985.
- [32] Hummelsheim K.; Hesse, U.: Abbrand- und Aktivierungsrechnungen von UO₂ und MOX-Brennelementen für DWR unter Berücksichtigung der Verunreinigungen in Brennstoff und Strukturmaterial. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-2924, München, März 2001.
- [33] International Atomic Energy Agency: Classification of Radioactive Waste: A Safety Guide. Safety Series No. 111-G-1.1, IAEA, Wien 1994.
- [34] IPCC: Climate Change 2001: Synthesis Report. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Watson, R.T. and the Core Writing Team (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, New York 2001.

- [35] Japan Nuclear Cycle Development Institute JNC: H12 Project to Establish Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Supporting Report 2, Repository Design and Engineering Technology. JNC-Bericht JNC TN1 400 99-012, Draft, May 1999.
- [36] Japan Nuclear Cycle Development Institute JNC: H12: Project to Establish Technical Basis for HLW Disposal in Japan. Supporting Report 3. Safety Assessment. April 2000.
- [37] Johnson, L.; Schwyn, B. (eds): Proceedings of a workshop on the release and transport of C-14 in repository environments. Johnson, L.H.; Schwyn, B. (eds.), NAGRA Interner Bericht 04-03, February 2004.
- [38] Jurgeit, F.; Stötter, J.: Auswirkungen des Global Change auf die Sturzprozesse im alpinen Raum, 2002,
<http://geo4.uibk.ac.at/users/jurgeit/seminar/textfass.pdf>.
- [39] Kahlke, D.: Die Eiszeit, Leipzig 1994.
- [40] Keesmann, S.; Noseck, U.; Buhmann, D.; Fein, E.; Schneider, A.: Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit von Endlagern für abgebrannte Brennstoffe in Salz- und Granitformationen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-206, Braunschweig 2004.
- [41] Keller, S.: Ermittlung und Analyse von Szenarien für Endlagerstandorte mit unterschiedlichen Wirtsgesteinen (Deutschland), BGR, Hannover Juli 2002
- [42] Keller, S.: Permafrost in der Weichsel-Kaltzeit und Langzeitprognose der hydrogeologischen Entwicklung in der Umgebung von Gorleben/NW-Deutschland, Juli 1998.
- [43] Kent, D. B.; Abrams, R. H.; Davis, J. A.; Coston, J. A.; LeBlanc, D. R.: Modeling the influence of variable ph on the transport of zinc in a contaminated aquifer using semiempirical surface complexation models. Water resources Research 36, 12, 3411-3425 (2000).

- [44] Kessler, J. (ed.): Applying information from Analogue Systems to the evaluation of Radioactive Waste Repositories. Proceedings of the EPRI Natural Analogues Workshop, Palo Alto, CA, October 2003.
- [45] Klostermann, J.: Das Klima im Eiszeitalter, Stuttgart 1999.
- [46] Kolditz, O., Wang, W., de Jonge, J., Xie, M., Bauer, S.: A process-oriented approach to compute THM problems in porous media. Proceedings der ISSMGE International Conference "From experimental evidence towards numerical modelling of unsaturated soils", Weimar, 2003 (Veröffentlichung in Vorbereitung).
- [47] Kröhn, K.-P.: New conceptual models for the resaturation of bentonite. Proceedings des Workshops über "Clay Microstructure and its Importance to Soil Behaviour" in Lund, Applied Clay Science, Vol. 23, 2003.
- [48] Kröhn, K.-P.: Modelling the re-saturation of bentonite in final repositories in crystalline rock. Abschlussbericht des BMWA-Vorhabens 02 E 9430, GRS-Bericht GRS-199, 2003.
- [49] Kröhn, K.-P.: Investigation of uncertainties in the re-saturation model of bentonite as near-field buffer in a spent fuel repository in granite. Eurosafe, Paris 2003.
- [50] Kröhn, K.-P.: Proposal of an alternative re-saturation model for bentonite buffers - the conceptual model, the numerical model and the data base. Proceedings zum "Meeting on buffer & backfill modelling" in Lund. SKB International Report (in Vorbereitung), 2004.
- [51] Küchler, W.; Enke, W.; Weyhry, W.: Klimaprognose für Sachsen. Abschlussbericht, Berlin 1999-2000,
www.gruenesachsen.de/specials/Abschlussbericht_Klima_sachsen.pdf.
- [52] Kulik, D.A.: Gibbs energy minimization approach to modeling sorption equilibria at the mineral-water interface: thermodynamic relations for multi-surface complexation. Am. J. Sci., 302, 227-279 (2002).

- [53] Laciok A.; Hercik, M.; Noseck, U.; Brassler, T.: Immobilization and Retention Processes of Uranium in Tertiary Argillaceous Sediments (Czech Republic). 5th GEOTRAP Workshop, Äspö, 07.-09. May 2001. OECD/NEA, Paris.
- [54] Lerch, Ch.: Numerische Untersuchungen zum Konvergenzverhalten eines Einzelhohlraums. Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Peine 2001.
- [55] Liedke, H.: Eiszeitforschung. Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, 1990.
- [56] Lohmann, G.; Lorenz, S.: On the hydrogeological cycle under paleoclimatic conditions as derived from AGCM simulations. J. Geophys. Res. 105, D13, 417 - 436 (2000).
- [57] Lührmann, L.; Noseck, U.; Storck, R.: Spent Fuel Performance Assessment-SPA for a hypothetical repository in crystalline formations in Germany. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-154, Braunschweig 2000.
- [58] Lührmann, L.; Noseck, U.; Tix, C.: 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.
- [59] Marimbeau, P.; Esbelin, E.: N and C-14 content of Spent Fuel. in *Proceedings of a workshop on the release and transport of C-14 in repository environments*. Johnson, L.H.; Schwyn, B. (eds.), NAGRA Interner Bericht 04-03, February 2004.
- [60] Marquardt, C.M. (ed.): Investigations on the Complexation Behaviour of Humic Acids and their Influence on the Migration of Radioactive and Non-radioactive Substances Under Conditions Close to Nature. FZKA 6999, Forschungszentrum Karlsruhe, September 2004..
- [61] Miller, B.; Ahonen, L.; Dalton, J.; Degnan, P.; Hernan, P.; Knight, L.; Laciok, A.; Noseck, U.; Raynal, M.; Smellie, J.; Trotignon, L. Vela, A.; Wouters, L.: Network

to review natural analogue studies and their applications to repository safety assessment and public communication. EUR , 2005 (in Vorbereitung).

- [62] Nagra: Kristallin I - Safety assessment report. Nagra Technical report 93-22. Wettingen, Juli 1994.

- [63] NAGRA: Project Opalinus Clay. Safety Report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). NAGRA Technical Report 02-05, December 2002.

- [64] NEA-OECD: NEA Sorption Project Phase II: Interpretation and Prediction of Radionuclide Sorption onto Substrates relevant for Radioactive Waste Disposal using Thermodynamic Sorption Models. Nuclear Energy Agency, (Veröffentlichung in Vorbereitung).

- [65] NEA-OECD: Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste. Application to Argillaceous Media. „Clay Club“ Workshop Proceedings Braunschweig, Germany 9.-11. December 2003. NEA-No. 5303, 2004.

- [66] NEA-OECD: Die Sicherheit der geologischen Tiefenlagerung von BE, HAA und LMA in der Schweiz - Eine internationale Expertenprüfung der radiologischen Langzeitsicherheitsanalyse der Tiefenlagerung im Opalinuston des Zürcher Weinlands. NEA-No. 5569, 2004.

- [67] NEA-OECD: Post-closure Safety Case for Geological Repositories. Nature and Purpose. Nuclear Energy Agency, 2004.

- [68] NEA-OECD: Features, Events and Processes Evaluation Catalogue for Argillaceous Media. Nuclear Energy Agency, Paris 2003.

- [69] NEA-OECD: Establishing and Communicating Confidence in the Safety of Deep Geologic Disposal. Approaches and Arguments. Nuclear Energy Agency, 2002.

- [70] NEA-OECD: Using thermodynamic sorption models for guiding radioelement distribution coefficient (Kd) investigations. A status report. Nuclear Energy Agency, Paris 2001.
- [71] NEA-OECD: Regulatory Reviews of Assessments of Deep Geologic Repositories. Lessons Learnt. Nuclear Energy Agency, 2000.
- [72] NEA-OECD: Confidence in the Long-Term Safety of Deep Geologic Repositories. Its development and Communication. Nuclear Energy Agency, 1999.
- [73] NEA-OECD: Lessons Learnt From Ten Performance Assessment Studies. Working group on Integrated Performance Assessments of Deep Repositories. Nuclear Energy Agency, 1997.
- [74] Noseck, U.; Klotz, D.: Modelling of Colloid Facilitated Contaminant Transport with the Computer Code TRAPIC: Theoretical Basis and Application, 5th GEOTRAP Workshop, Äspö, 07.-09. May 2001. OECD/NEA, Paris 2002.
- [75] Noseck, U.; Klotz, D.: Modellierung der Eu-Migrationsversuche mit dem Rechenprogramm TRAPIC. in: *Untersuchungen zum huminstoffgetragenen Schwermetall-Transport im unterirdischen Wasser - durchgeführt am Beispiel des Europiums*. Klotz, D. (Ed.) GSF-Bericht 13/01. Dezember 2001.
- [76] Noseck, U.; Brewitz, W.; Becker, D.; Buhmann, D.; Fein, E.; Hirsekorn, R.-P.; Kröhn, K.P.; Kühle, T.; Müller-Lyda, I.; Storck, R.: Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern. Abschlußbericht. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-153, Braunschweig 2000.
- [77] Paillard, D.: Basic assumptions, LSCE Centre d'Etudes de Saclay, Gif-sur-Yvette, France.
- [78] Pearson, F.J.; Arcos, D.; Bath, A.; Boison, A.M.; Fernandez, H.E.; Gäbler, E.; Gautschi, A.; Griffault, L.; Hernan, P.; Waber, H.N.: Mont Terri Project - Geochemistry of Water in the Opalinus Clay Formation at the Mont Terri Rock Laboratory. BWG No. 5, Bern 2003.

- [79] Petersen, J.; Pott, R.; Janiesch, P.; Wolff, J.: Umweltverträgliche Grundwasserbewirtschaftung in hydrogeologisch und ökologisch sensiblen Bereichen der Nordseeküste. Husum Druck- und Verlagsgesellschaft, 2003.
- [80] Petit, J.R. et al.: Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core. *Antarctica. Nature* 399 (1999) 429-436.
- [81] Prij, J.: On the Design of a Radioactive Waste Repository. Proefschrift Enschede ISBN 90-375-0261-X, Den Haag 1991.
- [82] Provost, A. M.; Voss, C. I.; Neuszil, C. E.: Site-94 Glaciation and Regional Groundwater Flow in the Fennoscandian Shield, SKI Report, Februar 1998.
- [83] Pusch R. (ed.): Äspö Hard Rock Laboratory, Prototype Repository, Selection of THMCB models. International Progress Report IPR-01-66, SKB, Stockholm, 2001.
- [84] Pusch, R., Kasbohm, J.: Can the Water Content of Highly Compacted Bentonite be Increased by Applying a High Water Pressure? SKB, Technical Report 01-33, 2001.
- [85] Pusch, R., Yong, R.: Water saturation and retention of hydrophilic clay buffer - microstructural aspects. Proceedings des Workshops über "Clay Microstructure and its Importance to Soil Behaviour" in Lund, Applied Clay Science, Vol. 23, 2003.
- [86] Pusch, R., Weston, R., Svoboda, J.: "Mechanisms in buffer hydration - are our modelling attempts ok?". Proceedings zum "Meeting on buffer & backfill modelling" in Lund. SKB International Report (Veröffentlichung in Vorbereitung), 2004.
- [87] Rahmstorf, S.; Ganopolski, A.: Long-term global warming scenarios computed with an efficient coupled climate model. *Climate Change* 43, 353-367 (1999).
- [88] Rodwell, W.R.; Harris, A.W.; Horseman, S.T.; Lalieux, P.; Müller, W.; Ortiz Amaya, L. and Pruess, K. (1999): Gas Migration and Two-phase Flow through Engineered and Geological Barriers for a Deep Repository for Radioactive Waste; a joint

EC/NEA status report published by the EC as European Commission Report EUR 19122 EN.

- [89] Röhlig, K.-J.: The UK Nirex Approach to Scenario Analysis. Summary and Conclusions of a Workshop held in Köln on November 22-26, 1999. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-2772, Januar 2000.
- [90] Rothe, P. : Erdgeschichte:Spurensuche im Gestein, Darmstadt 2000.
- [91] Rothfuchs, T. et al.: The HAW-Project: Test disposal of highly radioactive radiation sources in the Asse salt mine. Final report, Commission of the European Communities, Nuclear science and technology, EUR 16688 EN, 1995.
- [92] Rübel, A.; Müller-Lyda, I.; Storck, R.: Die Klassifizierung radioaktiver Abfälle hinsichtlich der Endlagerung. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-203, Braunschweig 2004.
- [93] Rübel, A.; Noseck, U.; Kröhn, K.-P.; Storck, R.: Umgang mit Gasen im Endlager Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-205, Braunschweig 2004.
- [94] Safety indicators in different time frames for the safety assessment of underground radioactive waste repositories. IAEA-TECDOC-767, Vienna 1994.
- [95] Schelkes, K.; Koesters, E.; Vogel, P.: Influence of long-term climate variations on a freshwater/saltwater system in northern Germany, April 2001.
- [96] Schönwiese, C.D.: Klimaänderungen, Daten, Analysen, Prognosen. Springer-Verlag Berlin 1995.
- [97] Schreiner, A.: Einführung in die Quartärgeologie. E. Schweizerbarth'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1992.
- [98] Schwarzbach, M.: Das Klima der Vorzeit, Eine Einführung in die Paläoklimatologie, Stuttgart, 1974.

- [99] Seiler, W.: Der globale Klimawandel: Ursachen, Wirkungen und Maßnahmen. Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK-IFU), FZK 2003, [www.w-geiger.de/geiger.nsf/g&x/energie/\\$file/enregie.pdf](http://www.w-geiger.de/geiger.nsf/g&x/energie/$file/enregie.pdf).
- [100] Shabalova, M. V., Buishand A.: Project SWURVE, Interim Annual Report, Royal Netherlands Meteorological Institute (KNIMI), 2002, www.ncl.ac.uk/swurve/downloads/2002team2kumi.pdf.
- [101] Shestopalov, V.M.; Rudenko, Y.F.; Shymkiv, M. et al.: Grounds for radioactive Waste Disposal in Crystalline Rocks within the Chernobyl Exclusion Zone. DISTEC 2004, Proceedings of International Conference on Radioactive Waste Disposal, Berlin, 26. - 28. April 2004.
- [102] Sirocko, F. et al: Verbund: Klimaänderungen am Ende einer Warmzeit (EEM), Projekt DEKLIM. Zwischenbericht 2002, www.deklim.de/download/dokumente/Tagungsband-kickoff.pdf.
- [103] SKI Site-94, Deep Repository Performance Assessment Project. Volume II, SKI Report 96:36, Dezember 1996.
- [104] Stockmann, N. et al.: Dammbau im Salzgebirge, Abschlussbericht Projektphase II, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit mbH München, GSF-Bericht 18/94, 1994.
- [105] Storck, R.; Becker, D.; Rübél, A.; Hirsekorn, P.; Preuss, J.; Wollrath, J.: The safety case for the Morsleben Repository. In: Jakusz, S. (ed.): Disposal Technologies and Concepts 2004. Proceedings of the DisTec 2004 conference, Kontec GmbH, Hamburg, 2004.
- [106] Sverjenski, D.A.: Standard states for the activities of mineral surface sites and species. *Geochim. Acta*, 67, 17-28 (2003).
- [107] swisstopo, Bundesamt für Landestopographie, 2003, www.swisstopo.bugpower.ch/vortraege/gletscher.pdf.
- [108] Thomas, H.R., Cleall, P.J., Chandler, N., Dixon, D. and Mitchell, H.P.: Hydromechanical behaviour of unsaturated buffer. Proceedings der ISSMGE International

Conference "From experimental evidence towards numerical modelling of unsaturated soils", Weimar, 2003 (Veröffentlichung in Vorbereitung).

- [109] Thomas, H.R., Cleall, P.J., Melhuish, T.A. and Seetharam, S.C.: Modelling the thermal-hydraulic-chemical-mechanical (THCM) behaviour of bentonite buffers. in: SKB International Report, 2004 (Veröffentlichung in Vorbereitung).
- [110] 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.
- [111] Vereecken, H.; Döring, U.; Hardelauf, H.; Jaekel, U.; Hashagen, U.; Neuendorf, O.; Schwarze, H.; Seidemann, R.: Analysis of solute transport in a heterogeneous aquifer: the Krauthausen field experiment. *J. Contaminant Hydrology* 45, 329-358, 2000.
- [112] Vieno, T.; Nordman, H.: Safety Assessment of Spent Fuel Disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara. TILA-99, Helsinki, March 1999.
- [113] Winberg, A.; Andersson, P.; Hermanson, J.; Byegård, J.; Cvetkovic, V.; Birgersson, L.: Äspö Hard Rock Laboratory final report of the first stage of the tracer retention understanding experiments. Technical Report TR-00-07. Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, Stockholm, Schweden, March 2000.
- [114] Yamaguchi, I.; Tanuma, S.; Yasutomi, I.; Nakayama, T.; Tanabe, H.; Katsurai, K.; Kawamura, W.; Maeda, K.; Katao, H.; Saigusa, M.: A study on chemical forms and migration behaviour of radionuclides in hull wastes. ICEM '99 Conference Proceedings, Nagoya, Japan, 26. - 30. Sept. 1999.

6 **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 2.1	Vergleich von Sicherheitsindikatoren für die Studie SPA-GRS.....	6
Abb. 2.2	Variation der Anfangskonvergenzrate K_0	22
Abb. 2.3	Variation des Parameters λ_S	23
Abb. 2.4	Variation der Referenzporosität ϕ_r	24
Abb. 2.5	Variation des Parameters g_2	25
Abb. 2.6	Konvergenzraten für unversetzte Grubenbaue unter konstantem Fluiddruck	27
Abb. 2.7	Konvergenzraten über der Zeit: trockener und feuchter Versatz	28
Abb. 2.8	Konvergenzraten über der Porosität: trockener und feuchter Versatz ..	29
Abb. 2.9	Relative Zeitverläufe der Aktivität aller betrachteten Inventare.....	44
Abb. 2.10	Einstufung der Inventare aufgrund der Klassifikation der IAEA.....	45
Abb. 2.11	Effektive Desorptionsraten in Abhängigkeit der Transportzeit	88
Abb. 2.12	Schadstofffahne am Standort Cape Cod.....	94
Abb. 2.13	Relative Temperaturveränderung der Erde in den letzten 420 000 Jahren	97
Abb. 2.14	Die absoluten Temperaturen der Erde während des Holozäns	98
Abb. 2.15	Übersicht über die Auswirkungen von Warm- und Kaltzeiten auf Prozesse in der Geo- und Hydrosphäre	101
Abb. 2.16	Verbreitung bedeutender Salz-, Ton- und Kristallin-Formationen in Deutschland.....	102
Abb. 2.17	Entwicklung eines Diapirs.....	105
Abb. 2.18	Verbreitung bedeutender Salz-, Ton- und Granit-Formationen in Deutschland und quartäre Eisgrenzen	109
Abb. 2.19	Die quartären Rinnensysteme in Niedersachsen, sowie eine 3-d Ansicht der Panzenbergrinne bei Verden	110
Abb. 2.20	Verbreitung bedeutender Salz-, Ton- und Granit-Formationen in Deutschland und bei einem Meeresspiegelanstieg von 60 m überflutete Gebiete	111
Abb. 2.21	Illustration zur Rolle von NA-Studien für den Dialog mit unterschiedlichen Stakeholdern	117
Abb. 2.22	Strahlenexposition und Beiträge wichtiger Nuklide für ein Endlager im Granit bei einer normalen Entwicklung	123

Abb. 2.23	Strahlenexposition und Beiträge wichtiger Nuklide für ein Endlager im Salz bei einem Störfall-Szenario.....	123
Abb. 2.24	Parametervariationen für ein Endlager im Granit für die normale Entwicklung	126
Abb. 2.25	Parametervariationen für das betrachtete Störfallszenario für ein Endlager im Salz	126
Abb. 2.26	2d-Modell für das Deckgebirge über einem Salzstock	128
Abb. 2.27	Konzentrationsprofile von I-129 und Np-237 zu ausgewählten Zeitpunkten.....	129
Abb. 3.1	Geometrien der Tracerexperimente in Feature A	141
Abb. 3.2	Empfehlungen für die Anwendung thermodynamischer Sorptionsmodelle (CA- bzw. GC-Ansatz)	152
Abb. 3.3	Mögliche Standortgebiete für die tiefe Endlagerung radioaktiver Abfälle.....	167

7 Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Kompartments für verschiedene Typen von Performance-Indikatoren ...	7
Tab. 2.2	Performance-Indikatoren und ihre Anwendungsbereiche.....	8
Tab. 2.3	Sicherheitsfunktionen und Performance Indikatoren	8
Tab. 2.4	Referenzwerte	21
Tab. 2.5	Vergleich der verschiedenen Inventare.	42
Tab. 2.6	Inventar ausgewählter Radionuklide in Brennstoff und Metallteilen	46
Tab. 2.7	Hauptbildungspfade ausgewählter Radionuklide beim Abbrand im Reaktor	47
Tab. 2.8	Anfangsverunreinigungen im Brennstoff	47
Tab. 2.9	Liste mit FEPs, für die noch Forschungsbedarf besteht.....	59
Tab. 2.10	Wichtige Faktoren für die Klimaausbildung	96
Tab. 2.11	Generische Matrix für das Nahfeld eines Endlagers	116
Tab. 3.1	Themen mit amerikanischen und deutschen Kontaktpersonen.....	161
Tab. 3.2	Salinität und pH-Werte der Wasserproben aus der Bohrung SG-8 im Krivoy Rog Gebiet]	169
Tab. 3.3	Stand der Endlagerarbeiten in den einzelnen Ländern	173
Tab. 3.4	Möglicher Nutzen gemeinsamer FuE-Aktivitäten	178
Tab. 3.5	FuE-Themen, die von europäischer Zusammenarbeit profitieren könnten.....	180

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

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon (02 21) 20 68 -0
Telefax (02 21) 20 68 -888

Forschungsinstitute
85748 Garching b. München
Telefon (0 89) 3 20 04 -0
Telefax (0 89) 3 20 04 -300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon (0 30) 8 85 89 -0
Telefax (0 30) 8 85 89 -111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon (05 31) 80 12 -0
Telefax (05 31) 80 12 -200

www.grs.de