

**Förderkonzept zur Entsorgung
gefährlicher Abfälle
in tiefen geologischen Formationen
(1997 - 2001)**

herausgegeben von

Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft,
Forschung und Technologie
Referat 414

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Projektträger des BMBF für Entsorgung (PTE)

April 1998

Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse der bisher vom BMBF geförderten Arbeiten und die aus heutiger Sicht noch bestehenden Aufgaben auf dem Gebiet der Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen vorgestellt. Das Förderkonzept ist Arbeitsgrundlage des BMBF und Basis für Beratungen durch Experten. Außerdem soll es parlamentarische Gremien unterrichten und die Öffentlichkeit über den Stand und die Perspektiven der Forschung und Entwicklung zur untertägigen Entsorgung gefährlicher Abfälle in Kenntnis setzen. Es dient ferner dazu, Forschungsstellen, die an einer Mitarbeit an FuE-Aufgaben dieses Konzeptes interessiert sind, über die dazu bestehenden Möglichkeiten zu informieren.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1 EINLEITUNG.....	1-1
2 PROBLEMSTELLUNG.....	2-1
2.1 <i>Abfallmengen.....</i>	2-1
2.2 <i>Abfallentsorgung in tiefen geologischen Formationen.....</i>	2-4
3 ZIELE DER BMBF-FORSCHUNG ZUR ENTSORGUNG GEFÄHRLICHER ABFÄLLE IN TIEFEN GEOLOGISCHEN FORMATIONEN.....	3-1
4 FuE-AUFGABEN DER NÄCHSTEN JAHRE	4-1
4.1 <i>Rechtlicher und politischer Rahmen</i>	4-1
4.1.1 Rechtlicher Rahmen.....	4-1
4.1.2 Politischer Rahmen.....	4-2
4.1.3 Aufgabenstruktur.....	4-5
4.2 <i>Zukünftige Forschungsschwerpunkte</i>	4-6
4.2.1 Weiterentwicklung von Endlager- und Untertagedeponiekonzeptionen unter Sicherheitsgesichtspunkten.....	4-7
4.2.2 Verbesserung von Instrumentarien für die Sicherheitsbewertung von Endlagern und Untertagedeponien.....	4-17
4.2.3 Anpassung und Weiterentwicklung der Kernmaterialüberwachung an die Bedingungen der Direkten Endlagerung	4-32
4.3 <i>Laufende Forschungsvorhaben (Projektförderung)</i>	4-37
4.3.1 Endlagerung radioaktiver Abfälle und Kernmaterialüberwachung.....	4-37
4.3.2 Untertägige Entsorgung chemotoxischer Abfälle	4-41
4.4 <i>Beiträge der Forschungseinrichtungen.....</i>	4-45
4.4.1 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).....	4-45
4.4.2 Forschungszentrum Jülich (FZJ).....	4-46
4.4.3 Forschungszentrum Karlsruhe (FZK).....	4-48
5 BISHERIGE FÖRDERUNG VON FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGS-ARBEITEN DURCH DAS BMBF	5-1
5.1 <i>Eingesetzte Ressourcen.....</i>	5-1
5.2 <i>Ergebnisse.....</i>	5-6
5.2.1 Endlagerung radioaktiver Abfälle und Kernmaterialüberwachung.....	5-6
5.2.2 Untertägige Entsorgung chemotoxischer Abfälle	5-24
5.3 <i>Nutzung der bisherigen Ergebnisse</i>	5-30
6 REALISIERUNG DER FuE-VORSCHLÄGE ZUR ENTSORGUNG GEFÄHRLICHER ABFÄLLE IN TIEFEN GEOLOGISCHEN FORMATIONEN	6-1
6.1 <i>Fachliche Prioritäten</i>	6-1
6.2 <i>Zeitrahmen und Kosten</i>	6-3
6.3 <i>Durchführung der FuE-Arbeiten</i>	6-5
7 UMSETZUNG VON FuE-ERGEBNISSEN UND BERICHTSWESEN	7-1

8	INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT	8-1
8.1	<i>Europäische Union (EU)</i>	8-1
8.2	<i>OECD-NEA</i>	8-4
8.3	<i>IAEO</i>	8-4
8.4	<i>Bilaterale Zusammenarbeit</i>	8-6
8.4.1	Deutsch-französische Zusammenarbeit.....	8-6
8.4.2	Deutsch-amerikanische Zusammenarbeit.....	8-7
8.4.3	Deutsch-spanische Zusammenarbeit	8-9
8.4.4	Deutsch-niederländische Zusammenarbeit.....	8-10
8.4.5	Deutsch-schweizerische Zusammenarbeit.....	8-11
8.4.6	Deutsch-schwedische Zusammenarbeit	8-12
9	LITERATUR	9-1
10	TABELLE DER VERWENDETEN ABKÜRZUNGEN	10-1

ANHANG 1 *Liste der zukünftigen Forschungsthemen*

- Anhang 1.1 Forschungsthemen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle und Kernmaterialüberwachung
 Anhang 1.2 Forschungsthemen zur untertägigen Entsorgung chemotoxischer Abfälle

ANHANG 2 *Verzeichnis abgeschlossener Fördervorhaben*

- Anhang 2.1 Abgeschlossene Fördervorhaben zur Endlagerung radioaktiver Abfälle und Kernmaterialüberwachung
 Anhang 2.2 Abgeschlossene Fördervorhaben zur untertägigen Entsorgung chemotoxischer Abfälle

1 EINLEITUNG

Umwandlung von Energie und Produktion von Wirtschaftsgütern sind mit Massenströmen von Abfallprodukten verbunden, die zur Gefährdung von natürlichen Ressourcen - wie Wasser, Boden und Luft - und damit zur Verschlechterung der Lebensbedingungen des Menschen beitragen können. Die geordnete Entsorgung nicht vermeidbarer und nicht verwertbarer Abfälle wird eine immer dringendere Aufgabe, wobei insbesondere für umweltgefährdende Abfälle die Entwicklung und der Einsatz technisch fortschrittlicher, wirtschaftlicher und nachweislich langzeitsicherer Entsorgungsoptionen notwendig ist.

Der Bund fördert Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der umweltverträglichen Entsorgung von gefährlichen Abfällen. Das nachfolgende Förderkonzept des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF)¹⁾ befaßt sich mit der Entsorgung gefährlicher Abfällen in tiefen geologischen Formationen. Gefährliche Abfälle im Sinne der weiteren Ausführungen sind zum einen **radioaktive Abfälle**, zum anderen nicht radioaktive **chemotoxische Abfälle**. Letztere werden in der Abfallgesetzgebung als besonders überwachungsbedürftige Abfälle bezeichnet.

Radioaktive Abfälle sind im Sinne von § 2 und § 9a des Atomgesetzes /1/ radioaktive Stoffe, die nicht schadlos verwertet werden und deswegen geordnet zu beseitigen sind.

Chemotoxische Abfälle sind im wesentlichen die in § 41 des Gesetzes zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (kurz Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz, KrW-/AbfG) /2/ beschriebenen besonders überwachungsbedürftigen Abfälle, die nach Art, Beschaffenheit oder Menge in besonderem Maße gesundheits-, luft- oder wassergefährdend, explosibel oder brennbar sind oder Erreger übertragbarer Krankheiten enthalten oder hervorbringen können. Sie sind in der Bestimmungsverordnung besonders überwachungsbedürftige Abfälle (Bestbü-AbfV) /3/ aufgeführt. In der technischen Fachliteratur werden diese Abfälle meist als Sonderabfälle bezeichnet.

Im folgenden werden die Ergebnisse der bisher vom BMBF geförderten Arbeiten und die aus heutiger Sicht noch bestehenden Aufgaben auf dem Gebiet der Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen vorgestellt. Das Förderkonzept ist Arbeitsgrundlage des BMBF und Basis für Beratungen durch Experten. Außerdem soll es parlamentarische Gremien unterrichten und die Öffentlichkeit über den Stand und die Perspektiven der Forschung und Entwicklung zur untertägigen Entsorgung gefährlicher Abfälle in Kenntnis setzen. Es dient ferner dazu, Forschungsstellen, die an einer Mitarbeit an FuE-Aufgaben dieses Konzeptes interessiert sind, über die dazu bestehenden Möglichkeiten zu informieren.

¹⁾ bis 1994 Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT)

2 PROBLEMSTELLUNG

2.1 Abfallmengen

Ende 1995 lag der Bestand an konditionierten **radioaktiven Abfällen** mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in Deutschland bei 60.800 m^3 . Für das Jahr 2010 wird ein Bestand von 173.200 m^3 prognostiziert. Dazu kommen ca. 9.300 m^3 an wärmeentwickelnden Abfällen, die im wesentlichen in Form von verglastem hochaktiven und konditioniertem mittelaktiven Abfall bei der Wiederaufarbeitung von deutschem Kernbrennstoff in England und Frankreich entstehen und zurendlagerung nach Deutschland transportiert werden müssen /4/. Weitere ca. 4.000 t fallen in Form abgebrannter Brennelemente an, für die heute noch nicht entschieden ist, ob sie wiederaufgearbeitet oder direkt endgelagert werden. Dies bedeutet, daß in den 50 Jahren Kernenergienutzung, Betrieb von Forschungsreaktoren und Einsatz radioaktiver Stoffe in Forschung, Industrie und Medizin im Mittel jährlich ca. 4.000 m^3 radioaktiver Abfälle entstanden sind bzw. bis ca. 2010 entstehen werden.

Aufschlußreich ist der Hinweis auf die Abfallverursacher. Von dem für das Jahr 2010 prognostizierten Bestand entstammt der größte Teil der Wiederaufarbeitung von Brennelementen (38%), während je etwa 18% den Bereichen Stilllegung/Rückbau, den Forschungseinrichtungen und dem Betrieb der Kernkraftwerke zuzuordnen sind. Alle übrigen Verursacher, wie z.B. Medizin, Industrie etc., tragen knapp 8% zum Abfallaufkommen bei /5/. Schwach- und mittelaktive Abfälle fallen somit - wenn auch in vergleichsweise geringen Mengen - auch ohne Nutzung der Kernenergie an und müssen beseitigt werden.

In offiziellen Statistiken erfolgen die Mengenangaben für chemotoxische Abfälle in Tonnen, für radioaktive Abfälle in m^3 . Die Zahlenwerte für radioaktive Abfälle in m^3 können nach /6/ durch Multiplikation mit dem Faktor 2 näherungsweise in Tonnen umgerechnet werden.

Die Bedeutung der bei der Entsorgung **chemotoxischer Abfälle** anstehenden Aufgabe wird bereits durch die Mengen zu entsorgender Abfälle ersichtlich. Vom gesamten Abfallaufkommen der Bundesrepublik Deutschland in Höhe von 338 Mio.t entfielen im

Jahr 1993 rund 9 Mio.t auf chemotoxische Abfälle /7/ - ein Rückgang von ca. 30 Prozent im Vergleich zu ca. 13 Mio.t noch in 1990. Neben der Menge ist bei diesen Abfällen ihre chemische Reaktivität und ihr toxisches Potential als Problem anzusehen. Maßgeblich am Aufkommen chemotoxischer Abfälle beteiligte Wirtschaftsbereiche sind die chemische Industrie (ca. 30%), die Energie- und Wasserversorgung sowie die Zellstoff-, Holzschliff- und Papiererzeugung (mit jeweils 8%) sowie Bergbau, eisenschaffende Industrie und Nichteisen-Metallindustrie, Straßenfahrzeug- und Maschinenbau (mit jeweils ca. 3-4%).

62 der 332 in der TA Abfall /8/ aufgeführten Abfallarten sind mit dem Entsorgungshinweis UTD (Untertagedeponie) versehen, und zwar 57 Abfallarten als Präferenzklasse 1 (UTD-Entsorgung im Regelfall), und 5 Abfallarten als Präferenzklasse 2 (UTD-Entsorgungsoption). Diese 62 Abfallarten sind in Tabelle 1 aufgeführt. Sie repräsentieren nach Angaben des Statistischen Bundesamtes für das Jahr 1990 /9/ ein Abfallaufkommen von ca. 630.000 Tonnen, wobei die Abfallarten aus der Untergruppe 515 „Salze“ mit ca. 330.000 Tonnen die bedeutendste Charge darstellen. Für 3 Abfallarten (Abfallschlüssel 51517 Natriumsulfat (Glaubersalz), 51523 Natriumchlorid und 51525 Bariumsalze) wird als Entsorgungsoption ausschließlich die UTD genannt.

Die Menge der radioaktiven Abfälle ist also um mehrere Größenordnungen geringer als die der chemotoxischen Abfälle. Ihre Beseitigung stellt insofern kein Mengenproblem dar. Dem **kumulativen Bestand** von insgesamt 182.500 m³ entsprechend 365.000 t radioaktiver Abfälle (konditioniert) bis zum Jahre 2010, d.h. nach 50 Jahren Kernenergienutzung, steht zur Zeit ein **jährliches Abfallvolumen** von ca. 9 Mio.t an chemotoxischen Abfällen (nicht konditioniert) in Deutschland gegenüber, von denen ca. 500.000 - 1.000.000 t/Jahr untertätig entsorgt werden sollen oder bereits entsorgt werden.

Gegenstand des im weiteren behandelten Förderkonzeptes ist die untertägige Entsorgung in Form der Tieflagerung. Während in Deutschland die untertägige Entsorgung für radioaktive Abfälle aller Kategorien vorgesehen ist, besteht bei chemotoxischen Abfällen keine derart eindeutige Zuordnung von Abfallarten zur Entsorgung in tiefen geologischen Formationen.

Tabelle 1: Abfälle, die nach TA Abfall für die Ablagerung in UTD vorgesehen sind, nach /9/

Schlüssel	Bezeichnung	Aufkommen in t (1990)
313 11	Filterstäube aus Sonderabfallverbrennungsanlagen	3.246
313 12	Feste Reaktionsprodukte aus der Abgasreinigung von Abfallverbrennungsanlagen	18.630
313 13	Feste Reaktionsprodukte aus der Abgasreinigung von Sonderabfallverbrennungsanlagen	k.A. (1)
313 16	Feste Pyrolyserückstände	16.575
314 40	Strahlmittelrückstände mit schädlichen Verunreinigungen	51.561
316 28	Härtereischlamm, cyanidhaltig	2.010
316 29	Härtereischlamm, nitrat-, nitrithaltig	481
316 32	Bariumsulfatschlamm, quecksilberhaltig	26.091
353 07	Berylliumhaltige Abfälle / Reststoffe	214
353 23	Nickel-Cadmium-Akkumulatoren	916
353 24	Batterien, quecksilberhaltig	441
353 25	Trockenbatterien (Trockenzellen)	1.962
353 26	Quecksilber, quecksilberhaltige Rückstände, Quecksilberdampflampen, Leuchtstoffröhren	17.469
399 03	Steinsalzrückstände (Gangart)	42.259
399 04	Gasreinigungsmasse, Rohrstaub aus Gasleitungen	9.698
513 10	Sonstige Metalloxide und -hydroxide ohne Fe- und Al-oxide, -hydroxide	8.890
515 02	Häutesalze	1.098
515 03	Na- und K-phosphatabfälle / -reststoffe	928
515 04	Imprägniersalzabfälle / -reststoffe	106
515 05	Lederchemikalien, Gerbstoffe	3
515 07	Düngemittelreste	5.205
515 08	Alkalicarbonate	1.189
515 09	Salmiak (Ammoniumchlorid)	1.135
515 11	Salzbadabfälle / -reststoffe	781
515 12	Ammoniumhydrogenfluorid	70
515 13	Arsenkalk	8.020
515 16	Brüniersalzabfälle / -reststoffe	231
515 17	Natriumsulfat (Glaubersalz)	57.831
515 18	Natriumbromid	k.A. (3)
515 19	Eisenchlorid	28.989
515 20	Eisensulfat (Grünsalz)	179.361
515 21	Bleisulfat	398
515 23	Natriumchlorid	11.807
515 24	Bleisalze	187
515 25	Bariumsalze	10.556
515 26	Calciumchlorid	3.650
515 27	Magnesiumchlorid	k.A. (2)
515 28	Alkali- und Erdalkalisulfide	k.A. (3)
515 29	Schwermetallsulfide	613
515 30	Kupferchlorid	1.418
515 31	Al-sulfat, -phosphatrückstände	185
515 33	Salze, cyanidhaltig	9.662
515 34	Salze, nitrat- oder nitrithaltig	4.035
515 35	Vanadiumsalze	k.A. (3)
515 38	Boraxrückstände	14

515 39	Arsenverbindungen	1.298
515 40	Sonstige Salze, löslich	2.280
531 03	Altbestände und Reste von Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmitteln	560
531 04	Produktionsabfälle / -reststoffe von Pflanzenschutz und Schädlingsbekämpfungsmitteln	14.776
535 02	Abfälle / Reststoffe aus der Produktion und Zubereitung von pharmazeutischen Erzeugnissen	19.564
541 10	PCB-haltige Geräte und Betriebsmittel	18.905
541 11	Sonstige PCB-haltige Abfälle / Reststoffe	754
542 06	Metallseifen	459
555 15	Farbmittel (Pigmente und Farbstoffe), anorganisch	2.604
593 01	Feinchemikalien	3.637
593 02	Laborchemikalienreste, organisch	6.980
593 03	Laborchemikalienreste, anorganisch	1.991
593 04	Mit Chemikalien verunreinigte Betriebsmittel	1.787
595 07	Katalysatoren und Kontaktmassen	7.884
596 04	Vorgemischte Abfälle zum Zweck der Ablagerung	1.496
597 05	Anorganische Destillationsrückstände	9.449
599 01	Polychlorierte Biphenyle (PCB)	4.316

Summe **626.655**

- k.A. keine Angaben
 (1) 313 13 Aufkommen 1987 37.000 t
 (2) 515 27 Aufkommen 1987 30.005 t
 (3) 515 18, 515 28, 515 35 mengenmäßig zu vernachlässigen

2.2 Abfallentsorgung in tiefen geologischen Formationen

Ziel der Endlagerung radioaktiver Abfälle und der untertägigen Ablagerung von chemo-toxischen Abfällen ist, diese so von der Biosphäre zu isolieren, daß selbst im Falle einer Freisetzung aus dem Endlager bzw. aus dem Ablagerungsbereich einer UTD keine Gefährdung heute lebender oder zukünftiger Generationen auftritt und die Umwelt sowie Sachgüter geschützt werden. Von den die Kernenergie nutzenden Ländern wurde in den letzten dreißig Jahren eine Reihe von Möglichkeiten betrachtet, wie dieses Schutzziel erreicht werden kann. Allen voran ist die Tieflagerung in geologischen Formationen zu nennen.

Das mit der Tieflagerung verfolgte Schutzziel soll durch die Wirksamkeit natürlicher und technischer Barrieren erreicht werden. Sie sollen sicherstellen, daß nach Möglichkeit kein Transportmedium (d.h. Wasser oder salzhaltige Lösungen) mit dem Abfall in Kontakt kommt bzw. - falls dies nicht realisiert werden kann - die mobilisierten Schadstoffe

nicht in schädlichen Konzentrationen in die Biosphäre gelangen. Als natürliche geologische Barrieren wirken das Wirtsgestein, in dem sich das Endlager oder die Untertagedeponie befindet, aber auch Nebengestein und Gesteinsschichten des Deckgebirges. Sie erfüllen ihre Barrierenfunktion primär durch ihre Eigenschaft „Undurchlässigkeit“ bzw. sehr geringe Durchlässigkeit für Transportmedien (Wässer, Gase), aber z.B. auch durch ihr Sorptionsvermögen für etwaig mobilisierte Inventarbestandteile. Technische Barrieren (z.B. Schacht-, Strecken- oder Bohrlochverschlüsse) unterstützen bzw. ersetzen die natürlichen Barrieren oder verzögern im Fall einer nicht bestimmungsgemäßen Entwicklung des Systems die Mobilisierung, den Transport und die Ausbreitung von Schadstoffen entscheidend. Das bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle verfolgte MultibARRIERensystem ist schematisch in Bild 1 dargestellt /10/.

Der Nachweis der Sicherheit eines Endlagers bzw. einer Untertagedeponie über lange Zeiträume kann nicht experimentell, sondern nur auf der Basis einer standortbezogenen Sicherheitsanalyse geführt werden. Dafür müssen alle relevanten Daten, allen voran die genannten Eigenschaften des Wirtsgesteins, die Wirksamkeit von Barrieren und die relevanten Stoffeigenschaften und -gesetze bekannt sein. Wenn auch die für die Sicherheitsanalyse bedeutsamen Ereignisabläufe noch nicht alle im Detail aufgeklärt und verstanden, die Eingangsdaten für Modellrechnungen mit Unsicherheiten behaftet und folglich auch die zum Einsatz gelangenden mathematischen Modelle noch nicht vollständig entwickelt sind, so herrscht international doch Einigkeit darüber, daß der Nachweis der Sicherheit eines Endlagers über einen Zeitraum bis zu 10.000 Jahren auf analytische Weise quantitativ erbracht werden kann /11/. Die Zielrichtung der weiteren FuE-Arbeiten wird somit durch die zu untersuchenden Details der Ereignisabläufe und die in den bisher ermittelten Daten vorliegenden Unsicherheiten bestimmt. Auch sollen die wissenschaftlichen Voraussetzungen für zumindest qualitative Sicherheitsnachweise über 10.000 Jahre hinaus, z.B. durch die Bewertung des Isolationspotentials geologischer Systeme, erarbeitet und bereitgestellt werden.

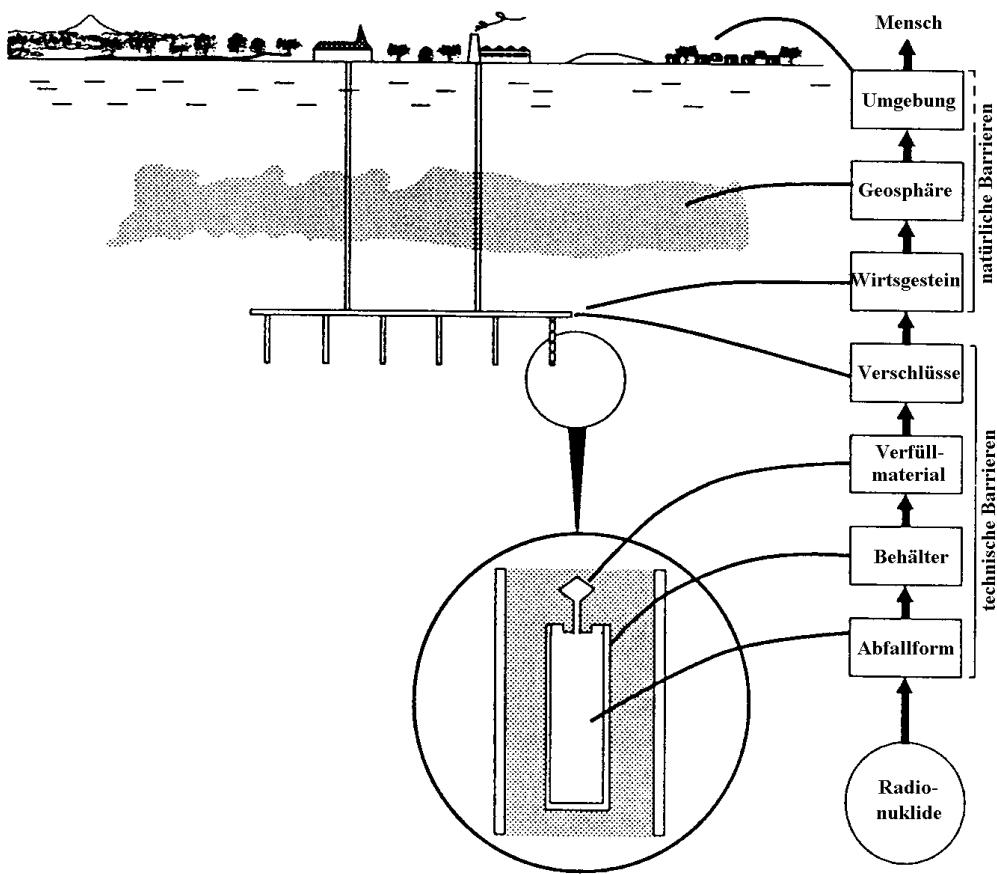


Bild 1: Schema des Multibarrierensystems am Beispiel der langfristigen Isolation hochradioaktiver Abfälle /10/

Von den Alternativen zur Tieflagerung in geologischen Formationen, die mit relativ hohem Aufwand geprüft wurden, soll noch die Einbringung der langlebigen radioaktiven Abfälle in mächtige Sedimentschichten am Boden der Tiefsee erwähnt werden. Die Bundesrepublik und zahlreiche weitere Länder haben sich jedoch einem Moratorium unterworfen, wonach auf das Einbringen radioaktiver Abfälle ins Meer, und damit auch in die Sedimente am Meeresboden, verzichtet wird /12/.

Bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle wird das Schutzziel verfolgt, keine unzulässige Strahlenexposition zuzulassen. Die Einhaltung dieses Schutzzieles muß für das Betriebspersonal und die Bevölkerung in der Umgebung des Endlagers während dessen Betriebszeit, aber auch für die zukünftigen Generationen nachgewiesen werden. Für die

Betriebsphase und die ersten 10.000 Jahre der Nachbetriebsphase sind entsprechende Grenzwerte in der Strahlenschutzverordnung festgelegt.

Bei der untertägigen Ablagerung chemotoxischer Abfälle wird eine ähnliche Zielsetzung wie bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle verfolgt. Es besteht zwar noch kein auf den Menschen bezogenes quantitatives Schutzziel, jedoch ist die Vorgehensweise zum Nachweis der Langzeitsicherheit vergleichbar der bei der Endlagerung der radioaktiven Abfälle, so daß eine analoge Behandlung beider Problemkreise naheliegt. Für die untertägige Entsorgung dieser Abfälle werden u.a. die in Bild 2 skizzierten Deponie-Typen (nach /13/) unterschieden. Die TA Abfall in ihrer jetzigen Form berücksichtigt lediglich die Typen 1 und 2, d.h. die Ablagerung im salinaren Wirtsgestein. Auf diese beziehen sich auch die als Zuordnungsempfehlungen zu verstehenden Entsorgungshinweise zu den Abfallarten (Präferenzklassen).

Die untertägige Entsorgung von chemotoxischen Abfällen im Salzgestein verfolgt die Zielsetzung, die abgelagerten Abfälle dauerhaft und ohne Nachsorge von der Biosphäre fernzuhalten. Dieses **Konzept des vollständigen Einschlusses** setzt voraus, daß eine vollständige Abschirmung des Abfalls gegen Lösungen und Tiefenwässer erreicht werden kann. Es weist Parallelen zum Endlagerkonzept für radioaktive Abfälle in einer Salzformation auf. Ein vollständiger Einschluß der chemotoxischen Abfälle ist nach heutigem Kenntnisstand vermutlich auch nur im Salzgestein zu realisieren. Möglicherweise läßt sich dieses Konzept auch bei Deponie-Typ 3 (Bergwerk im Grundwassernichtleiter) als Ablagerungsstrategie verfolgen.

Die Abfallverbringung in tiefe geologische Formationen ist nach einvernehmlicher Ansicht in der Fachwelt die sicherste Form der Entsorgung umweltgefährdender Abfälle. Die Forschungsarbeiten im Rahmen dieses Förderkonzeptes sollen daher auch die Voraussetzungen schaffen, über die z.Zt. bestehenden rechtlichen Regelungen hinaus diese Form der Entsorgung weitergehend verfügbar zu machen.

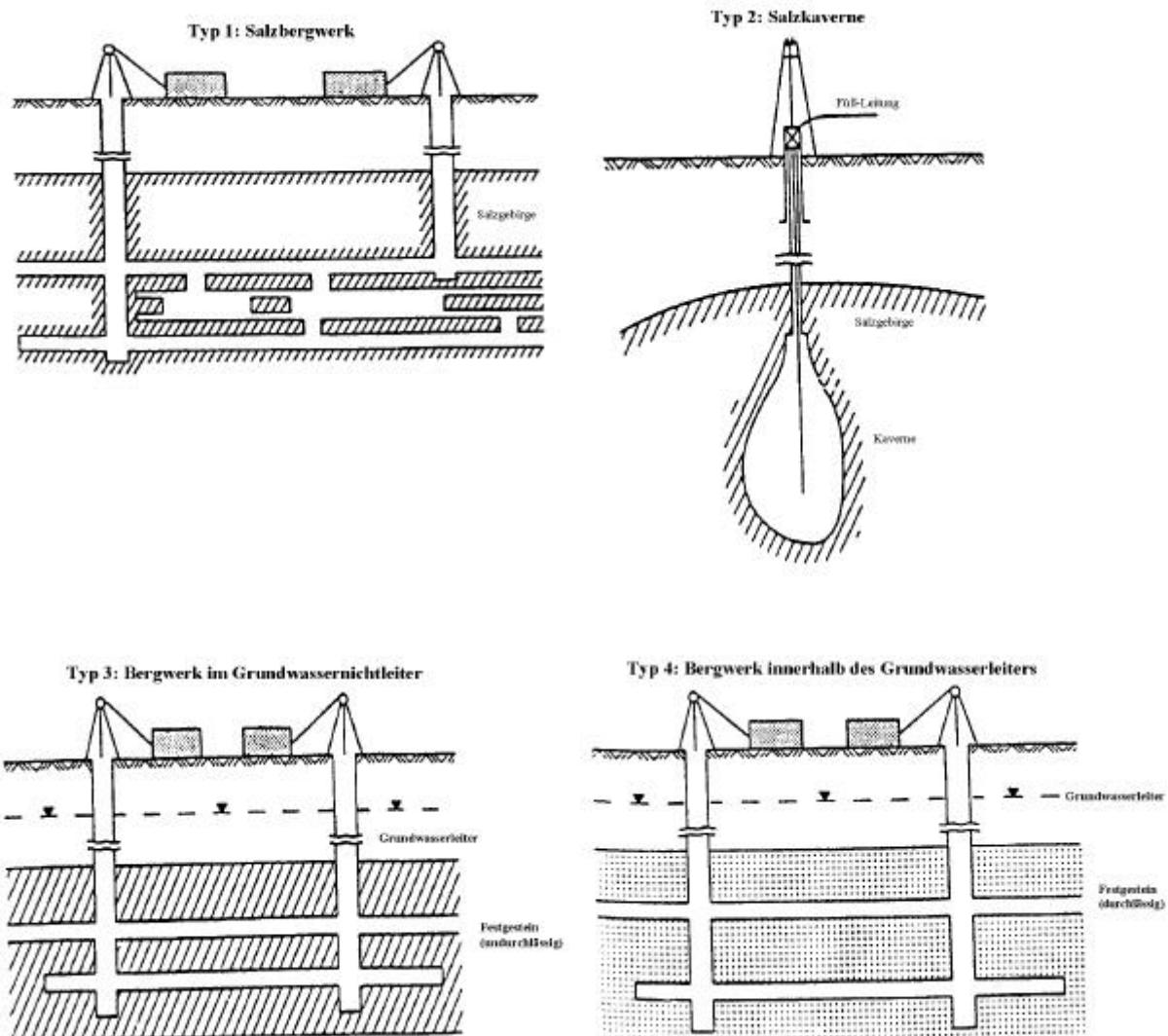


Bild 2: Prinzipielle Typen untertägiger Deponien (nach /13/)

Das **Konzept der immissionsneutralen Ablagerung** muß bei untertägigen Deponien verfolgt werden, bei denen a priori von einem Kontakt des abgelagerten Materials mit vorhandenen Tiefenwässern auszugehen ist, d.h. bei der Deponie des Typs 4 (Bergwerk innerhalb des Grundwasserleiters). Für diese Art der Ablagerung kommen eine Reihe potentieller Wirtsgesteine bzw. Wirtsformationen (z.B. Gips, Karbon, Erzlagerstätten) in Betracht. Man versteht unter immissionsneutraler Ablagerung, daß bei der Wechselwirkung von Wässern oder Lösungen mit dem Abfallmaterial keine schädliche Verunreinigung oder nachteilige Veränderung des Grund- oder Oberflächenwassers erfolgen

darf (vgl. Wasserhaushaltsgesetz /14/ §§ 26 (2) und 34 (2)). Eine Mobilisierung von Schadstoffen (z.B. Schwermetallen) darf nur im Rahmen der am Standort geogen auftretenden Konzentrationsbandbreiten erfolgen. Bei den dafür geeigneten Abfällen, die weitgehend inert gegen zutretende Lösungen sein müssen, haben i.a. Aspekte wie die Entlastung oberirdischer Deponien, Verminderung des Landschaftsverbrauchs und Minderung von Bergschadensgefahren in der Regel die größere Bedeutung; viele von ihnen könnten im Prinzip wegen ihres geringen Umweltgefährdungspotentials auch übertätig abgelagert werden. Doch gerade bei der Strategie der Ablagerung im grundwasserleitenden Wirtsgestein wird die Qualität der Sicherheitsbewertung eines Depo-niesystems entscheidend von der Kenntnis der im System ablaufenden physikalisch-chemischen Effekte und der Barrierefunktion der technischen und natürlichen Barrieren sowie von abgesicherten Daten zu Mobilisierung und Transport umweltgefährdender Stoffe bestimmt.

Obwohl bisher lediglich 3 Abfallarten ausschließlich der untertägigen Entsorgung mit Präferenzklasse 1 zugeordnet sind - für alle anderen Abfallarten bestehen Entsorgungsalternativen z.B. auf oberirdischen Abfalldeponien - und obwohl die im KrW-/AbfG geforderten Vermeidungs- und Verwertungsanstrengungen bereits Erfolge hinsichtlich der Reduktion des Abfallaufkommens zeigen, wird die untertägige Entsorgung chemotoxischer Abfälle aus folgenden Gründen in Zukunft noch an Bedeutung gewinnen:

- Die bei einzelnen Abfallarten aufgrund geänderter Produktionsverfahren und technischen Fortschritts sowie von Verwertungsmaßnahmen erkennbare deutliche Verringerung des Aufkommens wird voraussichtlich durch die immer umfassendere Registrierung der Abfallströme und eine steigende Produktion in einigen Wirtschaftszweigen, die zu einer steten Zunahme des Gesamtaufkommens untertätig zu entsorgender Abfälle führt, kompensiert.
- Trotz der vorrangigen Vermeidung und Verwertung wird auch die Kreislaufführung sogenannter Sekundärrohstoffe bei der großen Masse der Stoffarten lediglich zu einer zeitlich verlängerten Zirkulation der Stoffe führen, ehe die Beseitigung als Abfall der einzige Entsorgungsweg für nicht mehr verwertbare und aus den Kreisläufen auszuschleusende schadstoffhaltige Massen verbleibt.

- Das spezifische Schadstoffinventar von Abfällen, die für die untertägige Entsorgung in Betracht kommen, wird sich durch Anstrengungen zur Mengenverringerung erhöhen. Diese Stoffströme sind lediglich durch teure und aufwendige chemisch-physikalische Verfahren oder die langzeitig sichere Verbringung nach Untertage umweltverträglich zu entsorgen. Die Ablagerung auf oberirdischen Abfall- oder Sonderabfalldeponien, die eine ständige Nachsorge und in absehbarer Zeit aufwendige Sanierungsmaßnahmen erfordert, wird aufgrund der bisherigen Erfahrungen mit solchen „Altlasten von morgen“ zunehmend geringere Akzeptanz finden.
- In Deutschland sind untertägige Hohlräume aus dem Gewinnungsbergbau in großem Umfang vorhanden. Ein Teil dieser Hohlräume lässt sich für die untertägige Entsorgung chemotoxischer Abfälle nutzen. Dies entschärft etwaige Entsorgungsengpässe, die durch die fehlende Akzeptanz von oberirdischen Sonderabfalldeponien bedingt sein könnten.

Aus Gründen der Vorsorge für künftige Generationen werden FuE-Aktivitäten und somit die Bereitstellung fundierter Erkenntnisse und abgesicherten Datenmaterials für die Beurteilung des Langzeitverhaltens und der Langzeitsicherheit solcher Entsorgungseinrichtungen als dringlich angesehen.

Die Ergebnisse der FuE-Arbeiten können auch für den Fall der Verwendung von Abfällen als Versatzmaterial im untertägigen Bergbau genutzt werden. Der Länderausschuß Bergbau hat 1995 mit der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall eine Liste von für die Verwertung als Versatzmaterial geeignet erscheinenden Abfällen abgestimmt, die unter insgesamt 57 Abfallarten nicht weniger als 29 überwachungsbedürftige Abfälle enthält. Mit dieser Verwertungsmethode wurde im untertägigen Bergbau im Jahr 1995 mit ca. 395.000 t bereits eine doppelt so große Menge an überwachungsbedürftigen Abfällen untertägig entsorgt wie in abfallrechtlich zugelassenen Untertagedeponien (ca. 190.000 t).

3 ZIELE DER BMBF-FORSCHUNG ZUR ENTSORGUNG GEFÄHRLICHER ABFÄLLE IN TIEFEN GEOLOGISCHEN FORMATIONEN

Das Förderkonzept „FuE zur Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen“ (im folgenden kurz Förderkonzept „Entsorgung“ genannt) dient der ständigen Weiterentwicklung des Schutzes von Mensch und Umwelt bei der untertägigen Entsorgung radioaktiver und chemotoxischer Abfälle. Diese übergeordnete Zielsetzung ist aus den generellen Zielen sowohl des Energie- /15/ als auch des Umweltforschungsprogramms /16/ der Bundesregierung hergeleitet. Diese Ziele lauten

- für das Energieforschungsprogramm:
 - ⇒ Schaffung der Voraussetzungen für die vorurteilslose Entwicklung und Offenhaltung derjenigen technischen Optionen, die zur nachhaltigen Senkung der energiebedingten Umwelt- und Klimabelastungen und damit letztlich auch zu einer Schonung endlicher Energieressourcen beitragen können.
 - ⇒ Leistung von Beiträgen zur Modernisierung unserer Volkswirtschaft und zur Sicherung des Technologiestandortes Deutschland sowie Verbesserung der Exportchancen für einen wichtigen Zweig der deutschen Wirtschaft.
- für das Umweltforschungsprogramm:
 - ⇒ Dauerhafte Erhaltung der Umwelt in ihrer Funktionsfähigkeit und als Lebensgrundlage des Menschen und Gestaltung der Eingriffe des Menschen in seine Umwelt so, daß die Funktionsfähigkeit des Naturhaushaltes sowie ein menschenwürdiges Leben dauerhaft gesichert werden können.

Ausgehend von den vorgenannten generellen Zielen befaßt sich das Förderkonzept „Entsorgung“ mit folgenden Teilzielen:

- der Weiterentwicklung von Endlager- und Untertagedeponiekonzeptionen unter Sicherheitsgesichtspunkten,
- der Verbesserung von Instrumentarien zur Sicherheitsbewertung von Endlagern und Untertagedeponien,

- der Weiterentwicklung von Konzepten und Techniken der Kernmaterialüberwachung.

Darüber hinaus werden im Rahmen des Förderkonzepts „Entsorgung“ technische und sicherheitstechnische Arbeiten durchgeführt, die im Zusammenhang mit der Entwicklung eines deutschen Entsorgungskonzeptes für abgebrannte Brennelemente aus Forschungsreaktoren stehen.

Aus rein marktwirtschaftlichen Motiven würde nur ein Teil der daraus folgenden Aufgaben bearbeitet werden. Wie auch auf anderen technischen Gebieten (z.B. der Reaktor-, Gen- und chemischen Verfahrenstechnik) muß sich daher der Staat ihrer annehmen.

4 FuE-AUFGABEN DER NÄCHSTEN JAHRE

4.1 Rechtlicher und politischer Rahmen

Die Bereitstellung von sicheren Endlagern und Untertagedeponien ist eine durch Gesetze, Verordnungen, Vorschriften und politische Entscheidungen geregelte Aufgabe. Forschung und Entwicklung, die der Lösung dieser Aufgabe dienen, müssen sich in ihren fachlichen Aspekten an diesem Rahmen orientieren.

4.1.1 Rechtlicher Rahmen

Der rechtliche Rahmen der Entsorgung gefährlicher Abfälle wird im wesentlichen von zwei Gesetzen bestimmt, dem Atomgesetz (AtG) /1/ und dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz des Bundes (KrW-/AbfG) /2/. Beide werden in Landeszuständigkeit vollzogen, das AtG allerdings in Bundesauftragsverwaltung.

Gemäß Atomgesetz ist der Bund für die Bereitstellung von Endlagern für radioaktive Abfälle verantwortlich. Er ist somit auch für alle Forschung und Entwicklung zuständig, die notwendige Voraussetzung für die Errichtung eines Endlagers sind und ohne die ein Planfeststellungsverfahren nicht erfolgreich durchgeführt werden kann. Mit Verabsiedigung der Endlager-Vorausleistungsverordnung (VIV) im Jahre 1982 ist auch die Zuständigkeit für die Finanzierung der zur Bereitstellung von Endlagern für radioaktive Abfälle notwendigen Forschung und Entwicklung geregelt. Nach §21b AtG und der VIV haben die Abfallablieferungspflichtigen die Kosten der anlagenbezogenen FuE zu tragen.

Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz und darüber hinaus das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) /17/ sowie das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) /14/ und das Berggesetz /18/ bilden die Basis für die untertägige Ablagerung chemotoxischer Abfälle. Während Untertagedeponien als Abfallbeseitigungsanlagen abfallrechtlich zugelassen werden und die TA Abfall /8/ die verwaltungsrechtliche Vorschriften vorgibt, werden Versatzmaßnahmen unter Verwendung bergbaufremder Abfälle in bergrechtlichen Betriebsplanverfahren genehmigt. Bei letzterem bilden die Technischen Regeln des Landerausschusses Bergbau /19/ die Richtschnur des verwaltungsrechtlichen Handelns.

Der Vollzug ist Angelegenheit der Bundesländer. Der Bund hat allerdings eine Verordnungsgebungs-Kompetenz.

4.1.2 Politischer Rahmen

Radioaktive Abfälle

Das Entsorgungskonzept von Bund und Ländern für radioaktive Abfälle, dessen Entwicklung 1973 begann, das 1979 verkündet und 1988 hinsichtlich der Direkten Endlagerung weiterentwickelt wurde /20/, umfaßt vier wesentliche Schritte:

1. Zwischenlagerung der bestrahlten Brennelemente in den Kernkraftwerken und in externen Zwischenlagern
2. Wiederaufarbeitung der abgebrannten Brennelemente und Verwertung der hierbei zurückgewonnenen Kernbrennstoffe durch deren Wiedereinsatz in Kernkraftwerken
3. Entwicklung der Direkten Endlagerung
4. Beseitigung der radioaktiven Abfälle mit den Teilschritten Konditionierung, Zwischenlagerung und Endlagerung.

Schon im Rahmen des Zweiten Atomprogramms (1963) hatte die damalige Deutsche Atomkommission die Planung, Vorbereitung und Ausführung eines Endlagers in einer Salzstruktur beschlossen. Für die Endlagerung schwach wärmeentwickelnder Abfälle erfolgte 1982 der Antrag auf Planfeststellung für das ehemalige Erzbergwerk Konrad.

Die Arbeiten zur Direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente wurden in einem Kabinettsbeschuß vom 23.01.1985 bewertet. Darin stellte die Bundesregierung fest, daß die Direkte Endlagerung weiterer FuE-Arbeiten bedarf. Sie hielt es für zweckmäßig, in Ergänzung zur Realisierung der Entsorgung mit Wiederaufarbeitung die Direkte Endlagerung von Brennelementen weiterzuentwickeln. Für solche Brennelemente, für die die Entwicklung einer eigenen Wiederaufarbeitungstechnik wirtschaftlich nicht vertretbar ist, wollte die Bundesregierung durch FuE-Arbeiten dazu beitragen, die Direkte

Endlagerung zur Einsatzreife zu bringen. Die FuE-Arbeiten wurden 1995 abgeschlossen. Mit Verabschiedung des Artikelgesetzes /21/ im Jahre 1994 kann nun die Direkte Endlagerung als gleichberechtigter Entsorgungsweg neben der Entsorgung mit Wiederaufarbeitung praktiziert werden.

Die Konzipierung und Veranlassung notwendiger FuE-Arbeiten zur Bereitstellung der an den Standorten Konrad und Gorleben - vorbehaltlich deren Eignung - geplanten Endlager, d.h. VIV-pflichtige Arbeiten, fallen in den Zuständigkeitsbereich des BMU und des Bundesamts für Strahlenschutz (BfS).

Das BMBF fördert die Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle unter dem Aspekt der Vorsorgeforschung im Rahmen des Energie- und des Umweltforschungsprogramms der Bundesregierung und beschränkt sich dabei auf anwendungsbezogene, anlagenuabhängige Grundlagenarbeiten im wesentlichen zur Langzeitsicherheit der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen und abgebrannten Brennelementen. Darüber hinaus geht das BMBF spezifische Fragestellungen zu MTR-Brennelementen umfassend an, um so zur Lösung von Entsorgungsproblemen aus dem eigenen Bereich (Forschungsreaktoren etc.) beizutragen. Seit 1975 ist die Bundesregierung Partner im Vertrag über die Nichtverbreitung von Kernwaffen. Damit und als Euratom-Mitglied (seit 1958) ist sie den Kernmaterial-Überwachungsmaßnahmen von IAEA und Euratom unterworfen. In diesem Rahmen unterstützt sie beide Organisationen bei der Weiterentwicklung von Überwachungskonzepten und -techniken durch entsprechende Forschung. Im Bereich der Entsorgung spielt die Kernmaterialüberwachung bei Nutzung der Direkten Endlagerung eine wesentliche Rolle.

Chemotoxische Abfälle

Im Gegensatz zum Konzept der Endlagerung radioaktiver Abfälle, das seit langem verfolgt wird, gibt es für die untertägige Entsorgung chemotoxischer Abfälle noch kein vergleichbares, länderübergreifendes Konzept. Jedoch wird in der 1991 veröffentlichten TA Abfall erstmals die Untertagedeponie als Bestandteil einer bundesweiten Entsorgungsstrategie für ausgewählte chemotoxische Abfälle ausgewiesen. Der Bedarf an untertä-

giger Entsorgungskapazität ist bereits in den Abfallentsorgungsplänen verschiedener Bundesländer festgeschrieben.

Die bisher betriebenen untertägigen Entsorgungseinrichtungen für chemotoxische Abfälle gehen auf die Initiative der Betreiber unter Beteiligung der jeweiligen Bundesländer zurück. Die Voraussetzung zur Inbetriebnahme der Untertagedeponie Herfa-Neurode (1972) und der Bergwerksdeponie Heilbronn (1987) waren die als geeignet angesehenen geologischen Gegebenheiten an diesen Standorten. Die Untertagedeponie Zielitz in Sachsen-Anhalt durchlief ein Planfeststellungsverfahren nach dem Abfallgesetz und wurde mit Beschuß vom 1.6.1994 genehmigt.

Aus dem Bundesforschungsbericht ergibt sich, daß fast alle Bundesländer Umweltforschung fördern und einige in diesem Rahmen Fragen der Abfallwirtschaft in ihren Programmen behandeln, aber kein Programm weist die Förderung von Arbeiten zur untertägigen Ablagerung chemotoxischer Abfälle explizit aus.

Alle Bundesländer, auf deren Gebiet durch Gewinnungsbergbau untertägige Hohlräume geschaffen wurden, prüfen die Nutzungsmöglichkeit für die untertägige Entsorgung chemotoxischer Abfälle. Dies führt dazu, daß mittlerweile Formationen der gesamten Palette des in der Bundesrepublik existierenden Tiefbergbaus (Steinkohle, Salz, Spat, Gips etc.) potentiell für derartige Entsorgungsmaßnahmen in Betracht kommen. Zum Teil werden von Seiten der Betreiber bereits orientierende Untersuchungen und Probeeinlagerungen durchgeführt. Hier gilt es, durch Bereitstellung von wissenschaftlich abgesicherten Erkenntnissen Fehlentwicklungen vorzubeugen und die Weiterentwicklung umweltverträglicher und sicherer Entsorgungskonzepte zu unterstützen.

4.1.3 Aufgabenstruktur

Aus der generellen Zielsetzung und den Teilzielen des Förderkonzeptes, seinem rechtlichen und politischen Rahmen sowie auf Grundlage der in Kapitel 5 ausgewiesenen bisher erzielten Ergebnisse ergibt sich die folgende Struktur des zukünftigen Aufgabengebietes:

A Weiterentwicklung von Endlager- und Untertagedeponiekonzeptionen unter Sicherheitsgesichtspunkten

- A1 Abfallcharakterisierung und -klassifizierung
- A2 Wissenschaftliche Grundlagen für Sicherheitsanforderungen
- A3 Weiterentwicklung von Einlagerungs-, Handhabungs- und Überwachungstechniken
- A4 Charakterisierung und Eigenschaften potentieller Wirtsgesteinsformationen (Salz, Kristallin, Ton)
- A5 Geotechnische Barrieren
- A6 Abtrennung und Umwandlung von Aktiniden und langlebigen Spaltprodukten

B Verbesserung von Instrumentarien für die Sicherheitsbewertung von Endlagern und Untertagedeponien

- B1 Szenarienentwicklung
- B2 Verhalten der Wirtsgesteinsformation
- B3 Chemische und physikalische Effekte im Nahfeld
- B4 Verhalten von geotechnischen Barrieren
- B5 Verhalten von geologischen Barrieren
- B6 Methodenentwicklung und Rechenprogramme für Sicherheitsbewertungen
- B7 Validierung von Modellen, Unsicherheitsanalyse

C Anpassung und Weiterentwicklung der Kernmaterialüberwachung an die Bedingungen der Direkten Endlagerung

- C1 Erstellung und Anpassung von Überwachungskonzepten
- C2 Neue Techniken
- C3 Aufnahme, Auswertung, Zusammenführung und Fernüberwachung von Daten

4.2 Zukünftige Forschungsschwerpunkte

Die wichtigsten Forschungsthemen der nächsten Jahre zur Endlagerung radioaktiver Abfälle und zur untertägigen Entsorgung chemotoxischer Abfälle sind in Kurzform in den Anhängen 1.1 und 1.2 voneinander getrennt aufgeführt. Diese Zusammenstellung wird in den folgenden Abschnitten 4.2.1 und 4.2.2 näher beschrieben. Dort, wo Themen in Problemstellung und anzustrebendem Lösungsansatz für beide Abfallarten gleich sind, somit also sowohl dem Bereich der radioaktiven Abfälle als auch dem Bereich der chemotoxischen Abfälle zugeordnet werden können, werden sie gemeinsam erläutert. Sofern die jeweiligen Themen ausschließlich für radioaktive oder chemotoxische Abfälle zutreffen, wird explizit darauf hingewiesen. Zu beachten ist ferner, daß die aufgeführten FuE-Themen i.a. für alle Wirtsgesteinsformationen gelten, in denen untertägig entsorgt wird oder werden soll. Nur in den Fällen, in denen sich die Themen ausschließlich auf eine bestimmte Gesteinsformation beziehen, wird diese ausdrücklich erwähnt. Die in den runden Klammern am Ende des jeweiligen Forschungsthemas aufgeführten Bezeichnungen sind identisch mit den durchnumerierte Forschungsthemen in den Anhängen 1.1 und 1.2.

In dem sich anschließenden Kapitel 4.2.3 sind die zukünftigen Forschungsschwerpunkte zur Kernmaterialüberwachung (Safeguards) bei der Direkten Endlagerung aufgeführt.

4.2.1 Weiterentwicklung von Endlager- und Untertagedeponiekonzeptionen unter Sicherheitsgesichtspunkten

Die Ergebnisse der FuE-Aufgaben zu diesem Sachgebiet tragen zu den Grundlagen für konkrete Maßnahmen zur Einrichtung untertägiger Entsorgungsanlagen bei. Schwerpunkte stellen Beiträge zur Entwicklung von Konzepten sowie die Ermittlung von systemspezifischen Daten dar.

A1 Abfallcharakterisierung und -klassifizierung

FuE-Bedarf zu diesem Themenkomplex besteht in erster Linie bei den chemotoxischen Abfällen.

Grundlage für die Beurteilung des langfristigen Verhaltens von chemotoxischen Abfällen in Untertagedeponien ist die genaue Kenntnis ihrer Zusammensetzung. Die zur Deklaration durchgeführten Analysen geben die quantitative Zusammensetzung oft nur unvollständig wieder. Wesentliche Aufgaben sind das Aufzeigen ungelöster Probleme und entsprechender Lösungswege für die quantitative, chemisch-mineralogische Analyse und die darauf basierende Charakterisierung von Abfällen oder Abfallverwahrformen (behandelte Abfälle) hinsichtlich ihrer chemischen, physikalischen und mineralogischen Eigenschaften. Untersuchungen zu möglichen Wechselwirkungen der Abfälle untereinander und mit dem Wirtsgestein sowie mit potentiell auftretenden Grubenwässern oder Laugen stellen eine verbesserte Datengrundlage für Aussagen zur Stabilität und zur Reaktivität der Abfälle unter Ablagerungsbedingungen bereit und sind ggf. für die Zuordnung von Abfallarten zu bestimmten untertägigen Entsorgungspfaden (Deponietypen, Versatzmaßnahmen) von Bedeutung. Insbesondere die Beurteilung des Verhaltens von Abfallarten, die nicht in Deponietypen nach dem Konzept des vollständigen Einschlusses abgelagert werden, erfordert detaillierte Kenntnisse über die Abfallinhaltsstoffe und das Verhalten des Materials unter den jeweiligen geogenen Bedingungen. Erste Untersuchungen zu diesem Thema wurden bereits durchgeführt. Sie sind auf eine belastbare, statistisch abgesicherte Grundlage zu stellen und möglichst auf alle für die untertägige Entsorgung vorgesehenen Abfälle auszuweiten. Für Regelwerke, die eine Zuordnung

der Abfälle zu bestimmten Deponietypen bzw. Versatzmaßnahmen vornehmen, sind nachvollziehbar ermittelte und belastbare wissenschaftliche Grundlagen und Kriterien erforderlich, nach denen eine Klassifizierung der Abfallarten erfolgt. Diese Kriterienableitung kann ggf. ökotoxikologisch ausgerichtete Untersuchungen begründen, wenn die Beeinflussung der Biosphäre nicht ausschließlich an einem aus der Humantoxikologie abgeleiteten, bisher ebenfalls noch nicht definierten Schutzziel gemessen werden soll (A1.1-C).

Im Bereich der Endlagerung radioaktiver Abfälle besteht FuE-Bedarf zu diesem Themenkomplex bei den abgebrannten Brennelementkugeln von Hochtemperaturreaktoren. Jedes Brennelement besteht aus einigen Zehntausend beschichteter Brennstoffpartikel in einer Graphitmatrix. Diese Brennelemente sind unter Endlagerbedingungen i.a. sehr robust und auslaugresistent. Radionuklidfreisetzung sind praktisch nur aus beschädigten Brennstoffpartikeln zu erwarten. Für die im Endlager zu erwartende Partikelbruchrate wurden bisher bei der Definition des Quellterms sehr konservative Ansätze gewählt. Zum Abbau bzw. zur Quantifizierung dieser Konservativitäten beim bisher verwendeten Quellterm sind Untersuchungen zur Partikelbruchrate durch das auflaufende Gebirge vorgesehen (A1.1-E), und es soll ein experimentell abgesichertes Korrosionsmodell für die Partikelbeschichtungen hergeleitet werden (A1.2-E).

A2 Wissenschaftliche Grundlagen für Sicherheitsanforderungen

In diesem Abschnitt geht es darum, wissenschaftliche Grundlagen als Basis für die Ableitung von Sicherheitsanforderungen in den verschiedenen Teilbereichen der Endlagerung radioaktiver bzw. der untertägigen Entsorgung chemotoxischer Abfälle zu schaffen. Zu diesem Themenkomplex ist ein Forschungsthema ausschließlich auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle und sind zwei Themen ausschließlich auf die untertägige Entsorgung chemotoxischer Abfälle ausgerichtet. Das letzte Forschungsthema ist allgemeiner Art und somit in beiden Bereichen angesiedelt.

Bisherige Planungen von Endlagern für radioaktive Abfälle wurden i.a. mit vorläufigen Auslegungskriterien (z.B. maximale Salztemperatur 200°C) bzw. Arbeitshypothesen

(z.B. Behälterstandzeit 500 Jahre bei Direkter Endlagerung) durchgeführt. Im Hinblick auf eine spätere Anwendung müssen die Anforderungen an die natürlichen und technischen Barrieren weiter konkretisiert und durch FuE-Arbeiten auf eine gesicherte Basis gestellt werden. So führt z.B. eine hohe Auslegungstemperatur zu einer schnelleren Konvergenz offener Hohlräume. Infolgedessen können im Falle eines Laugenzutritts weniger Abfälle ausgelaugt werden. Andererseits führt eine höhere thermische Belastung des Wirtsgesteins unter Umständen eher zu einem Öffnen von Flüssigkeitswegsamkeiten, d.h. zu einem Wasser- bzw. Laugenzutritt. Ein weiteres Beispiel für aus der Sicht der Langzeitsicherheit gegenläufige Tendenzen bei der Anwendung bestimmter Auslegungskriterien ist der POLLUX-Behälter. Die großen Mengen an Eisen, die mit diesem Behälter in das Endlager eingebracht werden, schaffen im Nahbereich ein günstiges geochemisches Milieu für die Radionuklidrückhaltung. Gleichzeitig entstehen aber große Mengen an Wasserstoff, der u.U. die Mobilisierung und den Transport von Radionukliden unterstützt. Anforderungen an einzelne Barrieren müssen daher aus der Betrachtung des gesamten Endlagersystems unter Berücksichtigung aller geomechanischen, hydrogeologischen und geochemischen Systemeigenschaften hergeleitet werden (A2.1-E).

Auch die detaillierte Planung und die Beurteilung der Qualität untertägiger Entsorgungseinrichtungen für chemotoxische Abfälle erfordern quantifizierbare Schutzziele und definierte Eignungskriterien, anhand derer die Beurteilung erfolgt. Sicherheitsanforderungen werden an die einzelnen Teilbereiche (technische und geologische Barrieren) und letztlich auch hier an das Gesamtsystem gestellt. Allgemeine und in der Regel nicht quantifizierte Sicherheitsanforderungen an Untertagedeponien in salinarem Wirtsgestein bzw. an deren Komponenten, die in der Anwendung einen gewissen Ermessensspielraum offen lassen, wurden 1991 in der TA Abfall formuliert. Für Einrichtungen in nicht-salinaren Gesteinen fehlt bisher eine vergleichbare Vorschrift. Die systemanalytisch-wissenschaftlichen Untersuchungen und die konzeptionelle, evtl. vergleichende Betrachtung verschiedener Entsorgungsoptionen sollen die wissenschaftlichen Grundlagen für die Konkretisierung der Anforderungen in bestehenden Regelwerken und die Neuformulierung derartiger Regelungen schaffen (A2.1-C).

Werden Untertagedeponien in Feldesteilen ehemaliger oder noch betriebener Gewinnungsbergwerke eingerichtet, sind Überlegungen zum Abschluß der Teilstufen und zum Endverschluß des Deponiebereichs bzw. des gesamten Bergwerkes notwendig. Besonders schwierig erscheint die Situation, wenn Planungen von der Errichtung einer untertägigen Entsorgungseinrichtung in einem Bergwerk ausgehen, das in anderen Feldesteilen geomechanische oder hydrogeologische Problemzonen aufweist. Da auch in diesem Fall der langfristig sichere Abschluß der abgelagerten Abfälle von der Biosphäre nachzuweisen ist, sind Möglichkeiten eines solchen Abschlusses des Ablagerungsbereichs vom restlichen Grubengebäude zu schaffen und ist auf die wechselseitige Beziehung der dafür erforderlichen Abschlußbauwerke (Dämme, Verschlüsse für Rollöcher/Blindschächte, Schachtverschlüsse) mit dem Wirtsgestein einzugehen. Im Rahmen derartiger Untersuchungen kann darüber hinaus das langfristige Verhalten unterschiedlicher Abschlußkonzepte für untertägige Entsorgungseinrichtungen (offene/versetzte Hohlräume, einfache, langgestreckte, relativ durchlässige Dämme/langzeitsichere aufwendige Dammbauwerke, unterschiedliche Schachtverschlüsse) beurteilt und ein optimiertes Gesamtsystem entwickelt werden (A2.3-C).

Die Anforderungen an die Effizienz der Barrieren eines Endlager- oder UTD-Systems sind beträchtlich. Im Salinar wird von einer langfristigen und vollständigen Abkapselung der Abfälle gegen die Biosphäre ausgegangen. Diese dauerhafte Isolierung der Abfälle ist zu belegen. Sicherheitsanalysen können außerdem Hinweise auf die Funktion und Effizienz von Komponenten des Endlager- oder UTD-Systems geben und Schwachstellen im System identifizieren. Durch Variation der sicherheitstechnisch relevanten Eigenschaften von Systemkomponenten können praxisnahe und technisch realisierbare Auslegungsanforderungen an Barrierenbestandteile wie Abschlußbauwerke oder Versatz abgeleitet bzw. die Notwendigkeit der Fortentwicklung des Standes der Technik für einzelne Systemkomponenten aufgezeigt werden. Im Hinblick auf die Anwendung müssen die Anforderungen an die geologischen und technischen Barrieren weiter konkretisiert und durch FuE-Arbeiten auf eine gesicherte wissenschaftliche Basis gestellt werden. Besondere Aufmerksamkeit ist den Komponenten Versatz bzw. als Versatz wirkenden Abfall-Bindemittel-Mischungen (aushärtender Versatz), Streckendammbauwerken sowie Bohrloch- und Schachtverschlüssen (bei UTD ggf. auch Kavernenverschlüssen) zu wid-

men, die entscheidende Barrieren des Systems darstellen und hinsichtlich ihrer mechanischen und chemischen Stabilität sowie ihres Durchlässigkeitsverhaltens detailliert zu beschreiben sind. Die Ergebnisse dieser FuE-Aktivitäten stellen die Grundlage für die Herleitung quantitativer Auslegungsanforderungen, wie z.B. mechanische Kennwerte von Versatz, geometrische, mechanische und hydraulische Kennwerte von Abschlußbauwerken, dar. Die Festlegung selbst liegt jedoch nicht im Verantwortungsbereich des BMBF (A2.2-E/C).

A3 Weiterentwicklung von Einlagerungs-, Handhabungs- und Überwachungstechniken

Die zu diesem Themenkomplex notwendigen FuE-Arbeiten sind jeweils spezifisch auf radioaktive bzw. chemotoxische Abfälle zugeschnitten.

Das bisher in Deutschland verfolgte Konzept der Direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente sieht die Einlagerung dickwandiger POLLUX-Behälter in den Strecken eines Endlagerbergwerkes vor. Die dafür erforderlichen Einlagerungstechniken sind entwickelt und erprobt. Sollte sich bei der Erkundung des Salzstocks Gorleben herausstellen, daß der Salzstock eher in der Tiefe als in der Fläche genutzt werden sollte, wäre ein Bohrlochkonzept mit langen dünnwandigen Behältern zur Aufnahme unzerschnittener Brennstäbe zu entwickeln und zu erproben (A3.1-E). Auch Überlegungen zu einer Brennstabbüchse für verschiedene Überbehälter analog zum amerikanischen Multi-Purpose-Canister-Concept wären in diesem Zusammenhang anzustellen.

Das Konzept zur Entsorgung abgebrannter Brennelemente aus deutschen Forschungsreaktoren sieht die Rückgabe der überwiegend aus den Vereinigten Staaten stammenden Brennelemente in die USA vor. Diese Option besteht bis zum Jahre 2006. Als backup-Lösung dazu sowie für die nach diesem Zeitpunkt anfallenden US-Brennelemente und für alle anderen ist vorgesehen, langfristig eine Zwischenlagerung in dem speziell entwickelten Lager-/Transportbehälter CASTOR MTR 2 vorzunehmen. Später sollen diese Brennelemente eventuell direkt endgelagert werden. Der CASTOR MTR 2 ist bisher nicht als Endlagerbehälter qualifiziert. Wegen seiner geringen Korrosionsbeständigkeit im Falle eines Laugenzutritts in das Endlager kann er keine langfristige

ge mechanische Barrierenfunktion übernehmen. Unter Umständen kann er jedoch die Funktion einer chemischen Barriere ausüben, die ggf. noch durch Zuschlagstoffe im Versatz, wie z.B. Hydroxylapatit, oder spezielle Verfüllmaterialien im Behälter verbessert werden kann (A3.2-E).

Bei der untertägigen Entsorgung chemotoxischer Abfälle interessieren zunehmend die Nachnutzung existierender Speicherkavernen sowie die Umwidmung von Feldesteilen betriebener oder ehemaliger Gewinnungsbergwerke für Ablagerungszwecke. In diesem Zusammenhang ist die Entwicklung optimierter bzw. im Hinblick auf die abzulagernden Abfälle angepaßter Förder- und Einlagerungstechniken von Bedeutung, insbesondere wenn die für die Untertagedeponie gebräuchliche Behältniseinlagerung nicht praktiziert werden kann oder soll. Für chemotoxische Abfälle, die mit den heute gebräuchlichen und mit BMBF-Beteiligung entwickelten Dickstoffförderverfahren aufgrund ihrer stofflichen Eigenschaften oder ihrer Reaktivität nicht nach Untertage verbracht werden können, sind entsprechend adaptierte Verfahren zum Einbringen der Abfälle in untertägige Hohlräume zu entwickeln und zu erproben, die auf einen großen Massendurchsatz ausgerichtet sind und deutliche Verbesserungen der Betriebs- und Langzeitsicherheit zur Folge haben. Als Beispiele sollen die Behinderung eines Stoffaustrags unter Tage, z.B. durch Einbindung in einen aushärtenden, auslaugresistenten Versatzkörper und die Stabilisierung des Gebirges durch die Abfälle, z.B. durch resthohlraumfreie Verfüllung und Gewährleistung ausreichender Druckfestigkeit genannt werden. Die Durchführung derartiger Untersuchungen liegt vorwiegend im Interesse von Anlagenbetreibern, die kostengünstige und für eine breite Palette von Abfällen geeignete Einlagerungsmethoden suchen (A3.1-C).

A4 Charakterisierung und Eigenschaften potentieller Wirtsgesteinsformationen

In Deutschland kommen im wesentlichen die folgenden Wirtsgesteine bzw. Wirtsformationen in Frage: Salz, Kristallin, Tone einschl. der Tongesteine und Tonschiefer in Steinkohleformationen, Erzlagerstätten. Die erforderlichen FuE-Arbeiten zu diesem Themenkomplex sind weitgehend unabhängig von der Art der Abfälle, die zu entsorgen sind.

Die Aufklärung von Mineralreaktionen und Stofftransportprozessen während der geologischen Vergangenheit leistet einen wichtigen Beitrag für die Beurteilung und Prognostizierbarkeit der Langzeitsicherheit untertägiger Entsorgungseinrichtungen. Für das Wirtsgestein Salinar wurden in abgeschlossenen Vorhaben Methoden entwickelt und eingesetzt, die anhand von Flüssigkeitseinschlüssen Aussagen zur Geschichte des Gesteins in der geologischen Vergangenheit und, aufbauend auf entwickelten Modellierungs- und Prognosemethoden, eine Aussage zur künftigen Entwicklung des Systems erlauben. Diese analytisch und experimentell anspruchsvollen Untersuchungen sollen in laufenden Vorhaben mit modernster, zerstörungsfreier Analysentechnik fortgeführt und auf die Analyse der in den Einschlüssen enthaltenen Gasphase ausgeweitet werden, um noch verlässlichere Aussagen zur Genese und bisherigen Entwicklung solcher geogenen Lösungen zu erhalten. Eine etwaig erfolgte Verlagerung oder Migration solcher Lösungen in den Gesteinskörpern wird voraussichtlich anhand des analysierten Stoffbestands von Flüssigkeitseinschlüssen und Gestein erkennbar sein. Die Modellierung der Migration erfolgt unter dem Gesichtspunkt des gleichartigen oder ähnlichen Verhaltens von Lösungseinschlüssen im Versatz oder in durch Konvergenz verschlossenen Räumen von Untergrunddeponien. Das Verhalten der geogenen Lösungen kann als natürliches Analogon für das Verhalten etwaig entstandener, kontaminierte Lösungen in untertägigen Entsorgungseinrichtungen angesehen werden (A4.1-E/C).

Für die untertägige Erkundung des Wirtsgesteins von Endlagern und Untertagedeponien existieren leistungsstarke physikalische Verfahren. Es handelt sich praktisch ausschließlich um seismische, Radar- und Ultraschall-Verfahren, die jedoch unter ungünstigen Bedingungen (z.B. an Feuchtezonen) unzureichend aussagefähig und von begrenzter Reichweite sind und deren Ergebnisse bei der Interpretation Probleme aufwerfen können. Sie sind für sich genommen in der Regel auf die Durchörterung des Wirtsges-

steinskörpers mit Bohrungen angewiesen, um ausreichend hohe Meßgenauigkeit im interessierenden Bereich zu erhalten. Durch Kombination mehrerer möglichst zerstörungsfrei arbeitender physikalischer Verfahren, die auf unterschiedliche Stoffeigenschaften (elektrische, mechanische, akustische) des Wirtsgesteins reagieren, und durch neue Auswertealgorithmen, z.B. bei den tomographischen Verfahren, können diese Probleme wahrscheinlich überwunden werden. Derartige komplexe Meß- und Auswerteinstrumentarien sollten entwickelt und in-situ erprobt werden (A4.2-E/C).

Die Natur und die in der Natur ablaufenden Prozesse lassen sich mit einer endlichen Anzahl von Meßpunkten nur unzureichend beschreiben. Abhilfe könnten hier geostatistische Methoden bringen, wie sie bereits in der Lagerstättenkunde, Ozeanographie, Hydrogeologie etc. angewendet werden. Die Geostatistik ist ein Sammelbegriff für Methoden, die zur Analyse räumlich und zeitlich variabler, miteinander korrelierter Meßgrößen verwendet werden. Mit Hilfe der Geostatistik ist man in der Lage, die Eigenschaften nicht beprobter Lokationen eines Gebietes vorherzusagen. Die Geostatistik liefert neben einem Schätzwert einer regionalisierten Variablen auch eine Aussage über den Schätzfehler. Ferner lassen sich eine Reihe von Parametern ableiten, die es erlauben, die Güte einer Erkundung zu beurteilen und bei Bedarf Entscheidungen über die optimale Allokation von zusätzlichen Meßstellen zu treffen. Der Einsatz dieses Instrumentariums sollte nicht nur bei der Erkundung und Charakterisierung von Wirtsgesteinsformationen geprüft werden (A4.3-E/C), sondern auch im Zusammenhang mit hydrologischen Fragestellungen aus dem Themenkomplex B6 sowie geologischen Fragestellungen aus den Themenkomplexen B2 und B5.

A5 Geotechnische Barrieren

Geotechnischen Barrieren kommt die Aufgabe zu, Einlagerungshohlräume, Teilstufen oder die komplette untertägige Entsorgungsanlage sicher zu verschließen und so zu einem langzeitsicheren Abschluß der gefährlichen Abfälle von der Biosphäre beizutragen. Die Konzeption und der Bau langzeitsicherer Barrierensysteme ist für unterschiedliche Ablagerungsoptionen und Hohlraumsysteme - wie Bohrlöcher, Strecken, Kavernen und Schächte - zu realisieren. Bohrlochverschlüsse werden bisher insbesondere für die

Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen konzipiert und untersucht (DEBORA-Projekt). Die Entwicklung und Erprobung eines Bohrlochverschlusses für mittelradioaktive, wenig Wärme erzeugende Abfälle steht noch aus und ist im Zusammenspiel mit der Modellierung des Langzeitverhaltens durchzuführen. Künftige FuE-Aktivitäten im Bereich der untertägigen Abfallentsorgung sollten sich auf einfache und robust konzipierte, aber nachweislich langzeitstabile Abschlußbauwerke konzentrieren, die sich mit der Zeit auch unter ungünstigen Randbedingungen (z.B. Laugenzutritt) in Richtung eines stabilen und verlässlich prognostizierbaren Endzustandes entwickeln. Für Deponiekavernen existieren aus dem NGS-Vorhaben /29/ Verschlußkonzepte, die den Anforderungen an eine kurz- und langfristige Dichtheit entsprechen. Die praktische Umsetzung und großtechnische Erprobung dieser Konzepte ist wegen der geringen Aktualität dieser Entsorgungsoption z.Zt. nicht abzusehen. Zu Schachtverschlüssen von Endlagern oder Untertagedeponien wurden bisher Studien durchgeführt und Konzepte entwickelt. Hier ist das Stadium erreicht, bei dem durch Erprobung im Maßstab 1:1 die technische Machbarkeit belegt werden soll. Im Rahmen eines bereits laufenden Vorhabens werden die notwendigen Daten für eine modellhafte Nachbildung des Systems Deckgebirge/Wirtsgestein/Schachtverschluß ermittelt. Hierbei wird eine ausgewählte Variante für einen nach den Anforderungen an Langzeitstabilität ausgelegten Schachtverschluß für Untertagedeponien in Salzbergwerken in großtechnischem Maßstab untersucht. In einem weiteren Vorhaben wird ein Versuchsbauwerk als mögliche Option für einen langzeitstabilen Streckenverschluß errichtet und untersucht (A5.1-E/C).

A6 Abtrennung und Umwandlung von Aktiniden und langlebigen Spaltprodukten

In Fachkreisen herrscht die Meinung vor, daß von der Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen ein Risiko ausgeht, das viel kleiner ist als ein Großteil der gesellschaftlich akzeptierten Risiken. Diese Ansicht wird durch Rechnungen zur Langzeitsicherheit der Endlagerung untermauert, wie sie z.B. im PAGIS-Report der EU dokumentiert sind. Trotzdem laufen in einigen Industriestaaten, vor allem in Frankreich (SPIN-Programm), Japan (Programm OMEGA) und den USA auf dem Gebiet der Abtrennung langlebiger Spaltprodukte und Aktiniden aus dem radioaktiven Abfall und de-

ren Umwandlung in stabile und kurzlebige Isotope relativ umfangreiche Untersuchungen. Die Arbeiten zur Aktinidenabtrennung und Transmutation haben in den letzten Jahren auch unter dem Aspekt der Vernichtung von Plutonium (Abrüstung, Terrorismus) weltweit zunehmend an Bedeutung gewonnen.

Wenn auch die Abtrennung langlebiger Radionuklide und deren Transmutation aus Sicht einer technischen Anwendung in Deutschland zur Zeit kein Thema sein kann (z.B. fehlendes Schnellbrüter-Programm, Wiederaufarbeitung im Ausland, zunehmende Favorisierung der Direkten Endlagerung), so besteht doch Interesse, diese Entwicklungen vorsorglich zu verfolgen, um ihr Potential beurteilen zu können. Außerdem besteht das Interesse, die internationalen Bemühungen um den Abbau der weltweit vorhandenen großen Plutoniummengen wissenschaftlich zu unterstützen. Es ist daher sinnvoll, daß die Bundesrepublik Deutschland sich an der internationalen Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet mit begrenztem Aufwand beteiligt.

In Deutschland befassen sich vor allem die Forschungszentren Jülich und Karlsruhe mit diesem Thema, wobei ein großer Teil der Arbeiten im Rahmen der deutsch-französischen Kooperation auf dem Gebiet "Behandlung und Endlagerung radioaktiver Abfälle sowie Stilllegung kerntechnischer Anlagen" durchgeführt wird. Viele deutsche Aktivitäten sind in das EU Programm "Sicherheit bei der Kernspaltung" eingebunden, das sich ebenfalls mit diesem Thema befaßt. Alle Arbeiten werden z.Zt. im Rahmen der institutionellen Förderung der beiden Großforschungseinrichtungen durchgeführt.

Das Programm des Projektes Nukleare Sicherheitsforschung des Forschungszentrums Karlsruhe hat seinen Schwerpunkt bei der Transmutation mit schnellen Reaktoren nach herkömmlichem Konzept, während die Jülicher Arbeiten beschleunigergetriebene Transmutationssysteme schwerpunktmäßig untersuchen. Rechnungen zur Effizienz der Umwandlungen sowie Sicherheitsfragen stehen im Mittelpunkt der Untersuchungen. Gerade der Aspekt der Plutoniumvernichtung spielt bei den Karlsruher Arbeiten eine wichtige Rolle (CAPRA-Programm). In begrenztem Umfang befaßt man sich in Jülich und Karlsruhe auch mit Arbeiten zur Abtrennung von langlebigen Radionukliden aus Wiederaufarbeitungsabfällen (A6.1 bis A6.3).

4.2.2 Verbesserung von Instrumentarien für die Sicherheitsbewertung von Endlagern und Untertagedeponien

In diesem Kapitel werden FuE-Arbeiten beschrieben, deren Ergebnisse in Sicherheitsanalysen Eingang finden. Dabei geht es vor allem um die Entwicklung von Modellen für physikalisch-chemische Vorgänge. Ebenso wichtig ist die Bereitstellung der Daten, die für die modellhafte Beschreibung dieser Vorgänge benötigt werden.

B1 Szenarienentwicklung

Eine auf fundierten wissenschaftlichen Erkenntnissen beruhende Sicherheitsanalyse setzt die Kenntnis der langzeitigen Entwicklung eines geologischen Systems über mehrere hunderttausend Jahre voraus. Daher sind alle sicherheitsrelevanten Entwicklungsmöglichkeiten eines Endlagers für radioaktive Abfälle bzw. einer Untertagedeponie für chemotoxische Abfälle im Rahmen einer Szenarienanalyse zu betrachten. Anhand von sog. Features, Events and Processes (FEPs) müssen die Auswahl, Prüfung und Bewertung sowohl für die Teilsysteme als auch für das Gesamtsystem nachvollziehbar durchgeführt und dabei alle gegenwärtigen Informationen zu Geologie und Hydrologie sowie über langdauernde klimatische Entwicklungen (Eiszeit, Meeresspiegelerhöhung) und geologische Veränderungen (Tektonik, Erosion) aufgearbeitet werden. Für diejenigen Szenarien, bei denen die gravierendsten Auswirkungen zu erwarten sind, ist eine Konsequenzenanalyse notwendig. Diese Vorgehensweise ist systemspezifisch für das jeweilige Endlager- oder Deponiekonzept zu verfolgen. Szenarien im Zusammenhang mit menschlicher Einwirkung (human intrusion) sind ebenfalls zu untersuchen (B1.1-E/C).

B2 Verhalten der Wirtsgesteinsformation

Die ersten beiden FuE-Themen zu diesem Komplex sind allgemeiner Natur und sowohl für Endlager als auch für Untertagedeponien im Salinar von Bedeutung. Das dritte und vierte FuE-Thema ist jeweils spezifisch für die Endlagerung radioaktiver Abfälle bzw. für die untertägige Entsorgung chemotoxischer Abfälle

Das mechanische Verhalten von Salzgesteinen - zumeist Steinsalz - ist eingehend untersucht worden. Das führte zu einer Vielzahl von Stoffgesetzansätzen, die sich aus den jeweiligen Untersuchungsergebnissen ableiten ließen. Die Übertragbarkeit dieser Stoffgesetze auf reale, nicht homogene und großräumige Gesteinsbereiche erscheint jedoch unsicher. Bisherige Prognosen des großräumigen Verhaltens von Steinsalz differieren beträchtlich von dem experimentell ermittelten Verhalten in entsprechend angelegten Langzeitversuchen. Aus Auslegungsexperimenten zum Kavernenbau und Versuchen an gelochten Bohrkernen ist das Phänomen bekannt, daß Versagensfälle durch Modellrechnungen zumindest zeitlich nicht verlässlich prognostiziert werden können. Das thermo- und geomechanische Verhalten von Salzgesteinen soll deshalb unter Ausweitung der Untersuchungen auf weitere Salzmineralarten und andere für untertägige Entsorgungseinrichtungen relevante Gesteinstypen unter Berücksichtigung auftretender Inhomogenitäten (Fremdmineralanteile, Fremdmineraleinschaltung) und unter Ausweitung der Versuchsrandsbedingungen auf realistische Beanspruchungsbedingungen (Druckrandsbedingungen, Lösungseinfluß, Gasdrucke) bis in den Bereich des Versagens der Gesteine durch Kriechbruch oder Rißbildung aufgeklärt werden. Erst dann wird die Datenbasis für die modelltheoretische Behandlung des langfristigen mechanischen Verhaltens von Salzgesteinen vorliegen, die eine sichere Prognose zu Standfestigkeiten, Kriechverhalten (Konvergenz) und Reaktionen auf evtl. im Laufe der Zeit wechselnde Beanspruchungen zuläßt (B2.1-E/C).

Die Konvergenz des Salzgesteins spielt nicht nur im Hinblick auf den Einschluß der Abfälle und damit für die Abschottung gegenüber Störeinflüssen (insbesondere Laugenzutritt) eine wesentliche Rolle. Kommt es vor dem vollständigen Einschluß der Abfälle zu einem Laugenzutritt in die untertägigen Entsorgungseinrichtungen, dann ist die Konvergenz der noch offenen Hohlräume die treibende Kraft für das Auspressen der Lauge,

die durch die Abfallstoffe kontaminiert sein kann. In diesem Fall nimmt die Konvergenz direkt Einfluß auf den Transport von Radionukliden oder sonstigen Schadstoffen. Da sie stark von Druck, Temperatur, Zeit und der Zusammensetzung des Salzgestein abhängt, sind diese Parameter bei der Modellierung zu berücksichtigen. Erste Schritte zur Validierung des bisher in Langzeitsicherheitsanalysen verwendeten Konvergenzansatzes wurden vorgenommen. Allerdings sind einige Fragen hinsichtlich der Wechselwirkung mit dem Versatz (Stützwirkung bei kleinen Porositäten), des Einflusses unterschiedlicher Feuchte sowie der Langzeitwirkung noch offen (B2.2-E/C). Zur Quantifizierung des langsam ablaufenden Konvergenzprozesses verfüllter Hohlräume können Untersuchungen in alten Bergwerken beitragen.

Ein Endlager für radioaktive Abfälle im Kristallin wird wahrscheinlich in einem eigens dafür aufgefahrenen Bergwerk eingerichtet werden. Dabei würde nur der für die Durchführung des Endlagerbetriebs und der Abfall-Endlagerung erforderliche Hohlraum aufgefahren. Bei Endlagertemperaturen unter 100°C sind im Hartgestein nur geringe Konvergenzen zu erwarten. Das thermomechanische Verhalten des Wirtsgesteins hat daher bei allen bisher erarbeiteten Konzepten für Endlager im Kristallin eine untergeordnete Rolle gespielt. Größeres Augenmerk wird auf die in der Umgebung der aufgefahrenen Hohlräume entstehenden Auflockerungszonen gelegt, die Ausbreitungspfade für Flüssigkeiten und Gase bilden können. Deshalb sind umfangreiche Untersuchungen über die Ausbreitung von Radionukliden in den Klüften und in der Matrix des Wirtsgesteins erforderlich. Dabei ist die chemische Form der in Lösung befindlichen Radionuklide zu berücksichtigen, um ihre Wechselwirkung und Rückhaltung mit und in dem Wirtsgestein zu bestimmen. Darüber hinaus ist die Ausbreitung und der Verbleib von Gasen zu untersuchen, die aus den Abfällen freigesetzt werden können oder infolge der Korrosion der Abfallbehälter gebildet werden. Diese Untersuchungen haben zum Ziel, den Transport von Radionukliden in einem Mehrphasensystem (Zweiphasenfluss) zu bestimmen und die chemischen (oxidierenden oder reduzierenden) Bedingungen in der Umgebung der eingelagerten Abfälle zu ermitteln. Für die langfristige Vorhersage des Ablaufs dieser Vorgänge sind Modelle zu entwickeln, deren Gültigkeit anhand von In-situ-Versuchen zu überprüfen ist (B2.3-E).

Werden für Sicherheitsbetrachtungen untertägiger Entsorgungsanlagen in nicht salinaren Wirtsgesteinen erweiterte Kenntnisse zum geomechanischen und geochemischen Verhalten des Wirtsgesteins benötigt, sind diese in geeigneten Labor- und In-situ-Experimenten zu ermitteln. Da Entsorgungseinrichtungen für chemotoxische Abfälle in der Regel in standfesten Bergwerksfeldern von Gewinnungsbetrieben eingerichtet wurden oder die speziellen Rahmenbedingungen des Steinkohlebergbaus nutzen und eine thermomechanische Belastung des Wirtsgesteins wegen des fehlenden Wärmeeintrags auszuschließen ist, wird die geomechanische Charakterisierung des Gesteins und des Nahbereichs bei Untertagedeponien für chemotoxische Abfälle eine untergeordnete Rolle spielen. Von besonderem Interesse hingegen ist die Ermittlung der Rückhalteeigenschaften von Wirts- und Nebengesteinen für mobilisierte Schadstoffe im Falle eines Lösungszutritts zum Deponiebereich. Gebiete, in denen solche Untersuchungen bereits aufgenommen wurden, sind die Bestimmung der Sorptionseigenschaften nicht-salinaler Gesteine (erzhaltige Gesteine oder Nebengesteine des Karbons) für Schwermetalle. Die Anwendbarkeit (Übertragbarkeit) der Ergebnisse dieser Untersuchungen auf großräumige geologische Körper und In-situ-Verhältnisse ist durch Felduntersuchungen zu überprüfen (B2.3-C).

B3 Chemische und physikalische Effekte im Nahfeld

Ein großer Teil der erforderlichen FuE-Arbeiten zu diesem Themenkomplex ist vom methodischen Ansatz her bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle und der untertägigen Entsorgung chemotoxischer Abfälle identisch und kann daher gemeinsam behandelt werden. Die für die Modellrechnungen benötigten Eingangsparameter sind allerdings in starkem Maße abfallspezifisch.

Die Aufklärung des Verhaltens von umweltgefährdenden Schadstoffen im Endlager- oder Deponienahfeld ist eine der entscheidenden Aufgaben, die als wesentliche Vorbereitung von quantitativen Sicherheitsbetrachtungen zu lösen ist. Werden Schadstoffe - wie z.B. Radionuklide oder Schwermetalle - beim Zutritt von Lösungen mobilisiert, entsteht ein beweglicher und damit potentiell umweltgefährdender Inventaranteil. Mobilisierungsverlauf und Menge des freigesetzten Schadstoffes können mit geeigneten Re-

chenprogrammen prognostiziert werden, vorausgesetzt, die entsprechende Datenbasis steht zur Verfügung. Um das Verhalten von Radionukliden bzw. Spaltprodukten oder Schwermetallen in hochsalinaren Lösungen und unter den in den Entsorgungseinrichtungen sich einstellenden physikalisch-chemischen Verhältnissen beschreiben zu können, müssen vor allem die bisher nicht verfügbaren thermodynamischen oder kinetischen Basisdaten experimentell bestimmt werden. Im Vorfeld werden bekannte und in der Literatur recherchierte Daten, die unter ähnlichen Randbedingungen ermittelt wurden, hinsichtlich ihrer Qualität überprüft und in die Datenbasis mit aufgenommen. Die Schaffung bzw. Weiterentwicklung einer überprüften thermodynamischen Datenbasis für umweltrelevante Bestandteile wie chemotoxische Schadstoffe, Aktiniden und Spaltprodukte stellt die Voraussetzung für eine geochemische Modellierung dar, welche die Situation im Nahbereich und die künftige Entwicklung des Nahfeldes ausreichend genau beschreibt. Die Stabilitätskonstanten für gelöste Schadstoffspezies, Oberflächenkomplexe und relevante Festphasen sind für Temperaturen bis zu 200°C, für niedrige und hohe Ionenstärke und unter Berücksichtigung etwaiger Mischphasenbildung zu ermitteln. Kinetisch kontrollierte geochemische Reaktionen sind in die Beschreibung mit einzubeziehen (B3.1-E/C).

In einem Endlager für radioaktive Abfälle erschweren einerseits der Abfall in seiner jeweiligen Form selbst und zum anderen die Endlagerbehälter eine Mobilisierung der im Abfall enthaltenen Schadstoffe. Die Effizienz solcher Barrieren ist von ihren Eigenschaften wie mechanischer Belastbarkeit und Korrosionsbeständigkeit abhängig. Untersuchungen zur Korrosion von Behälterwerkstoffen sollen Aussagen über die zu erwartende Beständigkeit und Wirksamkeit dieser technischen Barriere, ihre Ausfallwahrscheinlichkeit und letztlich die Formulierung eines Quellterms für den Mobilisierungsprozeß von Schadstoffen ermöglichen. Die bisherigen Untersuchungen sind ggf. auf die im Kristallin auftretenden Grundwässer auszudehnen. Chemische bzw. geochemische Effekte und Prozesse bestimmen entscheidend das sich entwickelnde chemische Milieu, das sich auf Prozesse wie Behälterkorrosion, Schadstoffmobilisierung, Ausfällung, Sorption und Gasentwicklung auswirkt. Durch das chemische Milieu werden u.a. das Ausmaß der Mobilisierung und ihr zeitlicher Ablauf bestimmt. Bisher wurden vorwiegend Einzelprozesse wie z.B. Korrosion von Behältern oder Mobilisierung aus der Abfallmatrix in defi-

nierten, nicht immer realitätsbezogen ausgelegten Laborexperimenten untersucht. In Zukunft müssen verstärkt Untersuchungen zum Einfluß bisher nicht explizit mit einbezogener Phänomene auf die Mobilisierung bzw. Rückhaltung von Schadstoffen durchgeführt werden. Genannt seien beispielsweise die retardierende Wirkung von neugebildeten Korrosionsprodukten, der Übergang von anfangs oxidierenden in reduzierende Verhältnisse, die Sorption an Mineralneubildungen und die Mobilität evtl. gebildeter anorganischer Komplexe oder Kolloide. Das von geogenen Lösungen bzw. von Eluaten aus dem Deponiekörper bestimmte chemische Milieu im Nahbereich einer Untertagedeponie für chemotoxische Abfälle beeinflußt ebenfalls Mobilisierung und Ausbreitung umweltgefährdender Schadstoffe. Für die unterschiedlichsten untertägigen Entsorgungsoptionen ist das sich entwickelnde chemische Milieu zu charakterisieren, Quellterme für Schadstoffe zu ermitteln und mobilisierende oder retardierende Reaktionsmechanismen aufzuklären. Diese Untersuchungen, die für die salinaren Verhältnisse bereits weit fortgeschritten sind, bilden die Basis und Voraussetzung für die geochemische Modellierung. Aus der experimentellen Untersuchung der ablaufenden Prozesse werden Modellvorstellungen abgeleitet, die die Prognose und Berechnung der über lange Zeiträume ablaufenden Reaktionen ermöglichen. Diese Modellansätze, die letztlich Eingang in sicherheitsanalytische Betrachtungen finden, müssen eingehend überprüft und so gut wie möglich abgesichert sein (B3.2-E/C). Die Beschreibung der Migration der Schadstoffe in chemisch unterschiedlichen Systemsegmenten macht letztlich die Kopplung von Transport- und Speziationsmodellen erforderlich (vgl. B6.2).

Aufgrund verschiedener Bildungsmechanismen (z.B. Radiolyse, Korrosion, mikrobielle Aktivitäten) können in einem Endlager oder einer UTD Gase, vor allem Wasserstoff, entstehen. Der damit zusammenhängende Druckaufbau kann die Integrität einer untertägigen Entsorgungsanlage beeinträchtigen und Einfluß auf die Integrität der geologischen Barriere und damit den Schadstofftransport nehmen. Neben den Kenntnissen zu den unterschiedlichen Gasbildungsmechanismen sind die modellmäßige Beschreibung der Transportvorgänge und damit zusammenhängende bzw. sie beeinflussende Effekte aufgrund geochmechanischer oder hydraulischer Wechselwirkung notwendig. In den letzten Jahren wurden im Rahmen von FuE-Vorhaben der Code GABI entwickelt, der die Berechnung der zeitabhängigen Gasproduktion durch relevante Bildungsmechanismen

gestattet. Ferner wurde der Programmcode TOUGH in Hinblick auf die Anwendbarkeit für poröse Medien weiterentwickelt und in einem Benchmark-Vorhaben getestet. Da davon auszugehen ist, daß in einer untertägigen Entsorgungseinrichtung neben Gas weitere Phasen (Flüssigkeit, Dampf) vorhanden sein können und dies letztlich Auswirkungen auf den Schadstofftransport haben wird, kommt im Zusammenhang mit der Gasproblematik der Untersuchung des Mehrphasenflusses eine wachsende Bedeutung zu. Zur Modellierung des Transportes sind u.a. Kenntnisse zu mikroskopischen Effekten und Prozessen notwendig. Dies betrifft im besonderen Kapillareffekte und die Bestimmung relativer Permeabilitäten (B3.3-E/C).

Die folgenden vier Forschungsthemen sind ausschließlich auf den Bereich der Endlagerung radioaktiver Abfälle bezogen. Teilweise werden Punkte konkret angesprochen, die in der Darstellung der übrigen Forschungsaufgaben zu diesem Themenkomplex sehr allgemein gehalten waren.

Bei den Korrosionsuntersuchungen an HAW-Glas und abgebranntem LWR-Brennstoff in Salzlauge und granitischen Wässern mit Eisenzusatz (Behältermaterial) wurde in den letzten Jahren beobachtet, daß die Korrosionsprodukte der Behälterwerkstoffe einen wesentlichen Beitrag zur Immobilisierung einiger für die Langzeitsicherheit relevanter Radionuklide leisten können. Derartige Untersuchungen sind auch auf andere Brennstoffe (LWR-MOX, MTR, HTR) auszudehnen und die Ergebnisse auf eine wissenschaftlich gesicherte Basis zu stellen. Auch das Spektrum der sicherheitsrelevanten Radionuklide ist auszuweiten. Die dabei auftretenden Phasenumwandlungen und neuen Wirtsphasen sind zu analysieren, ihre Stabilität hinsichtlich der Langzeitimmobilisierung kritischer Radionuklide zu ermitteln und die dabei auftretenden Prozesse zu modellieren. Bei der Modellierung des Quellterms für Langzeitsicherheitsanalysen sind derartige Prozesse in geeigneter Form zu berücksichtigen (B3.4-E).

Abgebrannter Kernbrennstoff ist im Gegensatz zu verglastem hochaktiven Abfall aus der Wiederaufarbeitung ein sehr inhomogener Abfall. So befinden sich z.B. einige Prozente des gesamten Jod- und Cäsiuminventars im Spaltgasraum und an den Korngrenzen des Brennstoffs. Bei Zutritt von Lauge bzw. Grundwässern kann dieses Inventar instantan freigesetzt werden. Wirksame Rückhaltemechanismen im Nah- und Fernfeld sind für

diese leicht flüchtigen Spaltprodukte nicht bekannt. Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager mit abgebrannten Brennelementen zeigen, daß die Dosisbelastung nach einigen 10.000 Jahren in erster Linie auf dieses sog. Gapinventar zurückzuführen ist. Es sollen daher geeignete und preisgünstige Materialien ausgewählt und untersucht werden, die Jod und Cäsium chemisch binden und die entweder als Zuschlagstoff zum Versatz oder als Verfüllmaterial im Endlagerbehälter eingesetzt werden können (B3.5-E).

Tails-Uran aus der Anreicherung oder wiederaufgearbeitetes Uran (WAU) können - falls es nicht als Wertstoff genutzt wird - in Form von UO_2 oder U_3O_8 nach Verpacken in Stahlbehältern in ein Endlager verbracht werden. Viel wirtschaftlicher dürfte es sein, diese relativ stabilen Formen des Urans in einem alten Uranerzbergwerk abzulagern. Geochemisch sollten sich diese Abfälle ähnlich verhalten wie das schon vorher vorhandene Uranerz. Mit höheren Freisetzungswerten als den bereits vorhandenen ist daher nicht zu rechnen. Diese grundlegenden Überlegungen müssen vertieft und durch Untersuchungen abgesichert werden (B3.6-E).

Bestrahlte Brennelemente aus Forschungsreaktoren und Brennelemente mit hohen Pu-Gehalten (MOX-Brennstoff) sollen eventuell direkt endgelagert werden. Ähnlich wie bei bestrahlten Brennelementen aus Leichtwassereaktoren muß auch hier der Nachweis geführt werden, daß im Endlager in der Nachbetriebsphase kein Kritikalitätsstörfall eintreten kann. Hierzu sind einmal Kritikalitätsrechnungen durchzuführen, zum anderen ist der Nachweis zu führen, daß keine selektiven Spaltstoffanreicherungen zu erwarten sind (B3.7-E).

B4 Verhalten von geotechnischen Barrieren

Auch die zu diesem Themenkomplex notwendigen FuE-Arbeiten sind weitgehend unabhängig von den abzulagernden Abfällen. Charakteristische Unterschiede hinsichtlich des Konzeptes und der eingesetzten Materialien gibt es eher im Hinblick auf die zur Ablagerung vorgesehene Wirtsgesteinsformation. Im dritten Forschungsthema zu diesem Themenkomplex werden FuE-Arbeiten beschrieben, die in erster Linie für dieendlagerung radioaktiver Abfälle relevant sind.

Aus der eingehenden wissenschaftlichen Untersuchung des Verhaltens geotechnischer Barrieren resultieren die Erkenntnisse und Basisdaten, die für die Beurteilung und Prognose des Verhaltens dieser Systeme über lange Zeiträume in Sicherheitsanalysen benötigt werden. Von besonderem Interesse sind dabei die Eigenschaften und das Verhalten der eingesetzten Materialien und der einzelnen Komponenten der Abschlußbauwerke, welche die Langzeitbeständigkeit und -funktionsfähigkeit der geotechnischen Barrieren bestimmen. Die Untersuchungen umfassen dabei sowohl geomechanisch ausgerichtete Arbeiten zu Setzung, Verformung, Kompaktion und Spannungsaufbau, als auch geochemische Untersuchungen zur Wechselwirkung mit zutretenden Lösungen und evtl. stattfindenden Materialveränderungen mit Auswirkung auf die Langzeitstabilität. Die Untersuchungen sollen auf einfach aufgebaute aber nachweislich langzeitstabile Streckendammbauwerke ausgedehnt werden. Die Durchlässigkeit von Abschlußbauwerken gegenüber Lösungen oder Gasen als bestimmender Faktor für ihre Funktion ist unter Berücksichtigung von evtl. ablaufenden langsamen Reaktionen bei der Wechselwirkung der eingesetzten Materialien mit Fluiden unter realitätsnahen Bedingungen zu ermitteln. Dabei werden Untersuchungen an großtechnischen und prototypischen Bauwerken als notwendige Ergänzung von Labor- oder Technikumsversuchen angesehen. Bei ihnen kann zum einen der Nachweis der technischen, qualitätsgesicherten Realisierbarkeit geführt werden, zum anderen besteht die Möglichkeit, Daten an Mehrkomponentensystemen unter realen Bedingungen über relativ lange Untersuchungszeiträume zu ermitteln (B4.1-E/C).

Die beim Auffahren von untertägigen Hohlräumen und Strecken entstehenden Auflockerungs- und Störzonen können potentielle Ausbreitungspfade für mobilisierte Schadstoffe

darstellen. Solche Auflockerungszonen können mit entwickeltem Instrumentarium detektiert werden, und es existieren Abschätzungen hinsichtlich einiger wichtiger sicherheitsrelevanter Eigenschaften wie Durchlässigkeiten und geomechanischem Verhalten. Um das langfristige Verhalten solcher Zonen insbesondere im Salinar beschreiben und ggf. auf der Grundlage zu entwickelnder Vorstellungen modellieren zu können, sind weiterführende Untersuchungen nötig. Da diese Störzonen die geotechnische Barriere entscheidend beeinflussen können, kommt der Untersuchung technischer Verfahren oder natürlich ablaufender Prozesse, die eine Verbesserung der Barrierenwirkung des Gebirges durch eine Abdichtung solcher gestörter Zonen bewirken, aber auch der Untersuchung der Gasdruckbelastbarkeit von Gesteinen oder Versatzmaterial als mögliche Entstehungsursache für Risse oder Auflockerungen eine gewisse Bedeutung zu. Von besonderem Interesse sind derartige Untersuchungen für Wirtsformationen, bei denen eine Ausheilung dieser Störzonen nicht zu erwarten ist, wie z.B. im Kristallin oder im Salzgestein mit flacher Lagerung (B4.2-E/C).

In einem Endlager für radioaktive Abfälle in einer Steinsalzformation ist Salzgrus als Versatzmaterial vorgesehen. In mehreren laufenden FuE-Vorhaben wird das Kompaktierungsverhalten von Salzgrus untersucht. Ein Nachteil von Salz ist, daß es keine Rückhaltewirkung für freigesetzte Radionuklide aufweist. Dieser Nachteil kann durch Zugabe geeigneter Zuschlagstoffe, wie z.B. Hydroxylapatit, kompensiert werden. Beim amerikanischen Endlager für Transuranabfälle, der Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) in New Mexico, das in einer Salzformation errichtet worden ist, wird eine Zugabe von 30% Bentonit zum Salzgrus diskutiert. Dessen Rückhaltewirkung unter dem Einfluß erhöhter Temperatur und bei Anwesenheit von Lauge ist jedoch im Detail noch nicht untersucht. Im Kristallin hat sich hochkompakterter Bentonit als Verfüll- und Puffermaterial mit einer Reihe günstiger Rückhalteeigenschaften und hoher mechanischer Stabilität erwiesen. Jedoch ist erstrebenswert, die Grenze der Temperaturbelastbarkeit etwa durch geeignete Zuschlagstoffe oder die Wahl eines anderen Verfüll- und Puffermaterials zu erhöhen, ohne dabei Einbußen bei der hydraulischen Leitfähigkeit, dem Sorptionsvermögen etc. zu erleiden. Die damit verbundenen Vorteile bei der Behälter- und Endlagerauslegung im Kristallin könnten beträchtlich sein (B4.3-E).

B5 Verhalten von geologischen Barrieren

Im Gegensatz zu den Themenkomplexen B2 und B3 ist hier das sog. Fernfeld angesprochen. Der Transport oder die Ausbreitung (Migration) von aus dem untertägigen Entsorgungssystem freigesetzten Schadstoffen im Deckgebirge wird von einer Vielzahl von Effekten beeinflußt, die noch nicht alle aufgeklärt und verstanden sind. Ihre Behandlung oder Einbeziehung in das sicherheitsanalytische Instrumentarium erfolgt daher über vereinfachte Modellansätze und den Versuch, dabei eine konservative Vorgehensweise zu realisieren. Zur Beschreibung der Beeinflussung der Schadstoffmigration durch geochemische (z.B. Sorption) und hydrologische (z.B. hydrodynamische Dispersion) Effekte sind realitätsnähere Ansätze zu entwickeln und zu validieren. Dazu zählen beispielsweise die Berücksichtigung hoher Ionenstärke (gesättigte Laugen im Salinar bis zum Übergang Wirtsgestein/Deckgebirge), die Einbeziehung der Kolloidbildung und des Transports kolloidaler Schadstoffspezies sowie die Bildung von Huminstoffkomplexen und deren Einfluß auf die Schadstoffmigration. Des weiteren sind besser geeignete Ansätze zur Beschreibung der Sorption von Schadstoffen an Deckgebirgsgesteinen als das bisher praktizierte Kd-Konzept zu entwickeln und zu überprüfen (B5.1-E/C).

B6 Methodenentwicklung und Rechenprogramme für Sicherheitsbewertungen

Die meisten Forschungsthemen zu diesem Themenkomplex sind allgemeiner Art und unabhängig von den zu entsorgenden Abfällen. Lediglich im letzten Forschungsthema werden einige spezielle Aspekte derendlagerung radioaktiver Abfälle in Hartgestein angesprochen.

Eine vollständige, d.h. alle Teilsysteme umfassende Langzeitsicherheitsanalyse für untertägige Entsorgungseinrichtungen mit radioaktiven bzw. chemotoxischen Abfällen kann nur mit einem leistungsfähigen Instrumentarium durchgeführt werden. Das grundlegende Werkzeug zur Durchführung von Langzeitsicherheitsanalysen liegt vor. Die fortschreitende Vertiefung von Kenntnissen über Standortverhältnisse (Geologie, Hydrologie), Eigenschaften von Teilsystemen und den in ihnen ablaufenden Prozessen geochemischer, geomechanischer, hydrologischer Art sowie zu Materialeigenschaften er-

fordert jedoch die ständige Weiterentwicklung entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik. Diese Weiterentwicklung ist unter Verwendung geeigneter Szenarien, verbesserter und validierter Modelle, einer qualifizierten Datenbasis sowie fortschrittlicher mathematischer Verfahren und Methoden zu realisieren (B6.1-E/C).

Bei Untersuchungen zu den Ursachen für Lösungszutritte und deren Auswirkungen sind Einflüsse unterschiedlicher Art zu berücksichtigen. Dazu zählen geomechanische (Änderungen der Porosität und Permeabilität), hydrologische und geochemische Effekte (Auflösung, Umlösung). Als weiterer Einflußfaktor ist die Temperatur zu nennen. Bisher wurden diese Einflüsse modellhaft als Einzelphänomene betrachtet. In Hinblick auf eine mögliche Wechselwirkung und damit eine Beeinflussung der Auswirkungen ist eine Modellierung der gekoppelten Effekte vorzunehmen (B6.2-E/C).

Der Transport von Schadstoffen in die Biosphäre erfolgt vor allem über das Grundwasser. Voraussetzung für die Berechnung des Schadstofftransports sind Kenntnisse über die Bewegung des Grundwassers und der darauf Einfluß nehmenden Faktoren. So ist bei einer Simulation der Grundwasserbewegung zu berücksichtigen, daß diese i.a. großräumig erfolgt und ein homogener Aufbau des betrachteten Gebietes naturgemäß nicht gegeben ist. Dies bedeutet, daß komplexe physikalische, hydrologische und geologische Gegebenheiten modellhaft zu beschreiben sind. Eine Simulation derart komplexer Zusammenhänge kann nur mit einem leistungsfähigen rechentechnischen Instrumentarium durchgeführt werden. In einem BMBF-Vorhaben wird zu diesem Zweck erstmals ein Rechencode entwickelt, der nicht nur modernste mathematisch-numerische Verfahren nutzt, sondern der auch auf Parallelrechnern lauffähig sein wird. Die damit erreichte Leistungsfähigkeit soll derartige Simulationen großräumig und in vertretbaren Zeiten ermöglichen. Zukünftige FuE-Aktivitäten betreffen Fragen zum Einfluß geologischer (z.B. Kluftstruktur) und hydrologischer Faktoren (Durchlässigkeitsverteilung, Dispersion) sowie der Betrachtung von Mehrphasenströmungen. Fragen zur Maßstabsabhängigkeit relevanter Größen (Übertragbarkeit von Labor- auf Feldskala) sind zum großen Teil noch ungelöst. In diesem Zusammenhang ist auch der Einsatz von geostatistischen Methoden und Verfahren in Betracht zu ziehen. Aufgrund der hohen Anforderungen ist ebenfalls die Weiterentwicklung und Anpassung des notwendigen rechentechnischen Instrumentariums notwendig (B6.3-E/C).

Für die Modellierung des Migrationsverhaltens von radioaktiven oder chemotoxischen Schadstoffen im Wirtsgestein, in geotechnischen Barrieren und im Deckgebirge oder Nebengestein als Basis der Langzeitsicherheitsanalyse sind im Prinzip die gleichen Ansätze zu verwenden. Bestimmend für die Migration in den jeweiligen Teilbereichen sind in erster Linie die jeweils herrschenden physikalisch-chemischen Verhältnisse. Daher müssen Modelle zur Beschreibung des physikalisch-chemischen Zustandes und Transportmodelle gekoppelt werden. Kommt es zu einer Freisetzung von mobilisierten Schadstoffen in den Bereich des Deckgebirges, können die gleichen Grundwasser- und Transportmodelle zur Berechnung des Transportprozesses für radioaktive und chemotoxische Schadstoffe eingesetzt werden. In diesen Fällen kommt der Ermittlung von validierten schadstoffspezifischen Eingangsdaten und der Erarbeitung von Modellansätzen zur Beschreibung von Prozessen wie Sorption, kolloidalem Verhalten und u.U. mikrobiologischen Prozessen eine hohe Bedeutung zu (B6.4-E/C).

B7 Validierung von Modellen, Unsicherheitsanalyse

Grundlage einer Sicherheitsanalyse ist ein wissenschaftlich fundiertes Verständnis der in den Teilbereichen eines Endlagersystems (Quelle, Nahfeld, Fernfeld, Biosphäre) ablaufenden Prozesse. Weiterhin ist es notwendig, anhand von Labor- und Feldexperimenten die notwendigen Daten als Ausgangsbasis für die Modellierung zu ermitteln. Der erforderliche Aufwand wird dabei vom Detaillierungsgrad und von der Komplexität der zu betrachtenden Systeme abhängen (Beschreibung einzelner Prozesse, Verhalten von Teilsystemen, Verhalten des Gesamtsystems).

Die Vorgehensweise bei der Modellerstellung vom konzeptionellen Ansatz über das mathematische zum numerischen Modell bedingt eine schrittweise Vereinfachung des natürlichen Systems. Darin liegt aber das Schlüsselproblem, da es wegen der langen zugrundezulegenden Zeiträume (10.000 Jahre) praktisch nicht möglich ist, zweifelsfrei nachzuweisen, daß die letztlich verwendeten numerischen Modelle die natürlichen Vorgänge richtig wiedergeben. Eine Abweichung der Rechnung von der Realität kann verschiedene Gründe haben, wie z.B. die unzulässige Vereinfachung des natürlichen System im konzeptionellen Modell, eine nicht genügend qualifizierte Datenbasis, ungenü-

gende Berücksichtigung von Langzeitprozessen oder unvollständiger Kenntnisstand über Struktur und Funktionsweise von Teilsystemen.

Zur Durchführung von Sicherheitsanalysen für ein Endlager werden relativ komplexe Rechencodes eingesetzt. Eine notwendige Voraussetzung für die Qualifizierung eines Rechencodes ist seine Verifizierung, d.h. die Überprüfung, ob das mathematische Modell bzw. der entsprechende Code richtig programmiert ist, die Gleichungen richtig codiert und gelöst werden, so daß mathematisch richtige Ergebnisse geliefert werden. Zu diesem Zweck werden bekannte Testbeispiele, analytische Lösungen oder der Vergleich mit Resultaten aus gleichartigen Codes verwendet.

Ungleich schwieriger und problematischer ist die Modellvalidierung, d.h. der Nachweis, daß die im Code implementierten prozeßbeschreibenden Modelle die in der Natur ablaufenden Prozesse richtig wiedergeben. Voraussetzung ist, daß die wesentlichen Prozesse verstanden und hinreichend genau numerisch abschätzbar sind. Ein Modell wird dann als ausreichend validiert angesehen, wenn eine befriedigende Übereinstimmung zwischen Voraussage und experimentellen Ergebnissen erreicht ist. Die akzeptierbare Güte der Übereinstimmung ist abhängig von der Problemstellung, dem Votum der Fachwelt und behördlichen Forderungen.

Allerdings setzt sich zunehmend die Erkenntnis durch, daß eine Modellvalidierung im strengen Sinn nicht durchführbar ist, da aufgrund der zeitlichen und räumlichen Dimensionen des natürlichen Systems nur im Idealfall und für in realistischen Zeiträumen experimentell überprüfbare Abläufe ein direkter Vergleich von prognostizierten Resultaten mit beobachtbaren Größen möglich ist. Sachverständige kommen in grundlegenden Überlegungen zu dem Schluß, daß es sich bei der Natur um ein sog. offenes System handelt, das grundsätzlich nicht validierbar ist.

Aus diesem Grund wird ein Ansatz verfolgt, Modelle schrittweise zu testen, indem Einzelprozesse oder Subsysteme validiert werden (B7.1-E/C). Diese Art der Vorgehensweise wird in einem laufenden BMBF-Vorhaben im Zusammenhang mit der Entwicklung eines Grundwassermodells verfolgt. Beispielsweise werden Ergebnisse aus Experimenten, die auf wesentliche Einzelprozesse, wie z.B. die Dispersion, sensiv sind, mit dem Rechencode nachgerechnet und somit die entsprechenden Ansätze validiert. Die-

ses Vorgehen ist auf andere modellmäßig zu erfassende Effekte im Nahbereich und im Wirtsgestein von untertägigen Entsorgungseinrichtungen auszudehnen. Unterstützt werden muß diese Vorgehensweise durch Untersuchungen, mit denen nachgewiesen werden kann, daß die anhand von Laborversuchen ermittelten Daten und abgeleiteten Modellansätze auch auf reale Verhältnisse in geologischen Systemen übertragen werden können (B7.2-E/C). Damit kann eine Bewertung sowohl der Daten als auch der Modelle hinsichtlich ihrer Fähigkeit erfolgen, In-situ-Verhältnisse zu beschreiben und das Vertrauen in die Modelle erhöht werden. Schließlich ist auch die Aussagesicherheit von Langzeitsicherheitsanalysen zu quantifizieren (B7.3-E/C). Ein möglicher Ansatz könnte evtl. in einem Vorgehen bestehen, wie es bereits im Themenkomplex A4 mit dem Stichwort "Geostatistik" andiskutiert worden ist.

Spielen räumliche und vor allem zeitliche Dimensionen eine wesentliche Rolle, kommt dem Studium von natürlichen und archäologischen Analoga eine wichtige Bedeutung zu. Natürliche Analoga sind Systeme in der Natur, in denen über historische oder geologische Zeiträume physikalische und chemische Prozesse ablaufen oder abgelaufen sind, wie sie ähnlich in untertägigen Entsorgungseinrichtungen oder deren Teilsystemen (Nahfeld, Fernfeld, Biosphäre) erwartet werden. Natürliche Analoga können bei der Entwicklung und dem Nachweis der Gültigkeit von Modellen eingesetzt werden und helfen, die Vollständigkeit und Relevanz der wesentlichen Prozesse des konzeptionellen Modells sowie die Plausibilität und Realitätsnähe der Modellannahmen zu beurteilen. Ferner können sie Hinweise auf fehlerhafte Abbildungen oder mangelnde Kenntnis von Prozessen und Eigenschaften eines Systems liefern.

Von Experten sind Untersuchungen an natürlichen und archäologischen Analoga empfohlen worden, in denen primär chemisch-physikalische und geomechanische Phänomene, die in natürlichen Systemen abliefen, Untersuchungsgegenstand sein sollen und zwar im Hinblick auf die Schadstoffrückhaltung im Nahbereich (B7.4-E/C) und im Deckgebirge (B7.6-E/C) sowie im Hinblick auf die Barrierenwirksamkeit des Wirtsgesteins (B7.5-E/C). Für Aussagen über die langfristige Barrierenwirksamkeit des Wirtsgesteins sind überdies die Untersuchung und Aufklärung bisher abgelaufener geologischer Prozesse (z.B. tektonisch/mechanisches Verhalten von Salzstöcken) von Bedeutung. Bisherige Untersuchungen zu natürlichen Analoga wurden im Hinblick auf die Endlagerung

radioaktiver Stoffe und insbesondere im Ausland an nicht-salinaren Formationen durchgeführt. Die Anwendung der Methodologien auf untertägige Entsorgungseinrichtungen für chemotoxische Abfälle ist bis auf erste Untersuchungen in Frankreich durch das Bureau de Recherche Geologique et Minère (BRGM) noch nicht in Angriff genommen worden.

Alle hier angesprochenen Themenkreise wie Validierung, Unsicherheitsanalyse, natürliche Analoga, Votum der Fachwelt etc. sind Elemente einer übergeordneten Strategie, die das Ziel verfolgt, das Vertrauen in Langzeitsicherheitsanalysen zu stärken. Hierfür wird neuerdings häufig der Begriff "Vertrauensbildung" (Confidence Building) verwendet.

4.2.3 Anpassung und Weiterentwicklung der Kernmaterialüberwachung an die Bedingungen der Direkten Endlagerung

Dem internationalen Konsens zufolge sind ausgediente Brennelemente nicht für eine Entlassung aus der internationalen Kernmaterialüberwachung qualifiziert. Dies trifft auch auf deren Entsorgung durch die Direkte Endlagerung zu.

C1 Erstellung und Anpassung von Überwachungskonzepten

Da das Kernmaterial bei der Direkten Endlagerung, im Unterschied zu Kernmaterial in anderen Anwendungen, von einem bestimmten Punkt an nicht mehr zugänglich ist, müssen die Überwachungsstrategien entsprechend adaptiert werden. Hierfür wurde bereits 1988 in Zusammenarbeit mit den beiden Inspektoraten von IAEA und EURATOM ein Referenzkonzept erstellt, das eine letzte Messung des Materials bei letztmaliger Zugänglichkeit in der Konditionierungsanlage vorsieht und sich im übrigen auf Methoden der Einschließung und Beobachtung bis an die Ein-/Ausgänge des Endlagerschachtes stützt.

Grundsätzlich ist dieses Referenzkonzept auch für die Direkte Endlagerung von Forschungsreaktor-Brennelementen anwendbar, hierzu müßten allerdings Meßverfahren vor dem Einfüllen in den Endlagerbehälter adaptiert werden. Um ein geschlossenes Überwachungskonzept erstellen zu können, das selbstverständlich in erster Linie auch den Sicherheitsanforderungen für das Endlager entsprechen muß, ist unter anderem auch die Neu- oder Weiterentwicklung geeigneter Komponenten (Instrumente und Verfahren) erforderlich (C1-1).

Diese Notwendigkeit wird noch verstärkt durch erweiterte Anforderungen, die sich aus dem im Juli 1997 von der IAEA verabschiedeten Protokoll INFCIRC/540 "zur Verstärkung der Effektivität und Verbesserung der Effizienz" der internationalen Überwachungsmaßnahmen ergeben werden. Dieses Protokoll soll nach der Entdeckung der heimlichen Nuklearprogramme des Irak und Nordkoreas die Rechte der IAEA-Inspektoren erweitern.

Das bestehende, seit 1988 entwickelte Überwachungskonzept entspricht auch den heutigen Anforderungen, die sich aus der internationalen Safeguards-Diskussion ergeben. Weitere Anpassungen sind jedoch erforderlich, um Konzepte im Rahmen des INFCIRC/540 - Protokolls zu entwickeln und einzubeziehen. Dies bezieht sich vor allem auf die Verifikation der Grundlegenden Technischen Merkmale des Endlagers, für die neue Methoden entwickelt werden sollen. Weitere Anpassungen wären notwendig, falls das Endlagerungskonzept wesentlich geändert würde, wie z.B. bei Anwendung von wiederverwendbaren Abschirmbehältern (C1-2).

C2 Neue Techniken

Die internationalen Inspektorate lassen sich zum jetzigen Zeitpunkt nicht darauf festlegen, welche Verfahren und Instrumente im Endlager letztlich verwendet werden. Der Grund dafür liegt darin, daß für die Inbetriebnahme eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle das Jahr 2012 angenommen wird und die technische Entwicklung der vergangenen 15 Jahre darauf schließen läßt, daß bis dahin Instrumente und Verfahren verfügbar sein können, die heute noch nicht verbreitet oder auch nur bekannt sind.

Zur Verfolgung einzelner Endlagergebinde wurden zwei Verfahren erarbeitet, bei denen ein Behälter durch die Verifikation einer Schweißnaht identifiziert werden kann. Dabei wurden zwei Prototypen entwickelt, einer nutzt Laserstrahlen, der andere Ultraschallwellen. Nachdem sich Behälterentwickler und IAEA für das Ultraschall-Verfahren ausgesprochen haben, soll ein Instrument für den Routinegebrauch entwickelt werden. Dabei ist die automatische Fernhantierbarkeit das langfristige Ziel (C2-1).

Für die Überprüfung der Grundlegenden Technischen Merkmale des Endlagerbergwerks müssen ebenfalls Entwicklungsarbeiten geleistet werden mit dem Ziel, aus der Zahl der international diskutierten Methoden die geeigneten auszuwählen. Die Beteiligung an dieser internationalen Diskussion kann nur auf Basis fundierter eigener Untersuchungen stattfinden, um unpraktikablen Vorschlägen entgegentreten zu können. Beispielsweise wird häufig der Einsatz geophysikalischer Verfahren diskutiert, was als wesentliche Aufgabe erfordert, die Brauchbarkeit einzelner geophysikalischer Verfahren für die konkreten Bedingungen des Endlagers zu überprüfen. Gleichzeitig muß auch weiterhin Strategien entgegengetreten werden, bei denen die feste Installation von Überwachungsinstrumenten im Endlager vorgesehen ist: Hierdurch würden Wegsamkeiten vom Endlager in die Biosphäre geschaffen, wodurch wesentliche Aspekte der Langzeitsicherheit beeinträchtigt wären (C2-2).

Schließlich müssen auch die Untersuchungen fortgesetzt werden, die eine Überwachung des Endlagers in der Nachbetriebsphase ermöglichen sollen. Von deutscher Seite wird hierfür in Kooperation mit Großbritannien die Aussagekraft kommerziell verfügbarer Satellitendaten untersucht, die auch aus anderen Gründen (Entdeckung heimlicher Aktivitä-

ten) geprüft wird. Das Potential der Satellitenerkundung soll durch Einbeziehung weiterer Techniken (z.B. Radarwellen) untersucht werden (C2-3).

C3 Aufnahme, Auswertung, Zusammenführung und Fernübertragung von Daten

Speziell für die Safeguardsmaßnahmen bei derendlagerung ist die Entwicklung eines integrierten Systems von Bedeutung, das neben den Daten aus digitalen Kameras ebenfalls solche von Siegeln, Strahlenmonitoren sowie anderen Sensoren verarbeiten soll. Bestimmte Komponenten sind bereits vorhanden, wie etwa eine neue digitale Überwachungskamera mit ihrem Potential zur Datenfernübertragung. Andere Komponenten sind noch zu entwickeln, z.B. ein elektronisches Siegel, das dem neuesten technischen Stand entspricht und die gestiegenen Anforderungen der Inspektorate erfüllt. Vor allem aber muß ein Datenverarbeitungssystem entwickelt werden, das die Einzeldaten zu einem kompletten und spezifischen Datensatz zusammenfaßt, damit sie mit den Schritten der Materialhandhabung korreliert werden können. Auf diese Weise wird erreicht, daß die Materialhandhabung in einer Anlage von einer Kontrolleinheit aus überwacht werden kann (C3-1).

Die Fernübertragung von Inspektionsdaten ist im neuen IAEA-Zusatzprotokoll INFCIRC/540 ausdrücklich vorgesehen. Wesentliche Aspekte (z.B. Authentifizierung und Verschlüsselung) sind bereits entwickelt und in einzelne meßtechnische Komponenten integriert worden. Die weitere Entwicklung wird Speicher- und Übertragungsmedien mit größerer Kapazität auf den Markt bringen, deren Verwendbarkeit unter den Gesichtspunkten der Effektivität in der Leistung und Effizienz bei den Kosten geprüft werden muß (C3-2).

Bei allen deutschen Gerät-Entwicklungen wird darauf Wert gelegt, daß Komponenten mit industriell Standard verwendet werden. Wegen der speziellen Aufgabenstellung und der relativ geringen Zahl an Instrumenten, die für Zwecke der internationalen Kernmaterialüberwachung erforderlich sind, müssen diese Industrieprodukte entsprechend zusammengestellt und adaptiert werden. Auf diese Weise wird eine den Safeguardsanforderungen genügende Zuverlässigkeit erreicht. Die Entwicklung der Überwachungsge-

räte wird sich auch weiterhin am technischen Stand kommerziell verfügbarer Komponenten orientieren müssen, der zur Zeit so schnell fortschreitet, daß neue Produkte schon nach wenigen Jahren überholt sind. Hier gilt es, den Anschluß nicht zu verlieren.

4.3 Laufende Forschungsvorhaben (Projektförderung)

Im folgenden sind die laufenden Forschungsvorhaben (Stand 30.6.1997) für den Bereich der Endlagerung radioaktiver Abfälle und der Kernmaterialüberwachung sowie, daran anschließend, für den Bereich der untertägigen Entsorgung chemotoxischer Abfälle aufgelistet.

4.3.1 Endlagerung radioaktiver Abfälle und Kernmaterialüberwachung

A Weiterentwicklung von Endlagerkonzeptionen unter Sicherheitsgesichtspunkten

A1 Abfallcharakterisierung und -klassifizierung

02 E 8623 10/93 bis 12/97	Uni Bonn	Entwicklung und Erprobung radiochemischer Verfahren für die Bestimmung reiner Alpha- und Beta-Strahler im Radionuklidinventar radioaktiver Abfälle
------------------------------	----------	--

A3 Weiterentwicklung von Einlagerungs-, Handhabungs- und Überwachungstechniken

02 E 8181A 01/94 bis 12/97	GNB	Verkehrs- und atomrechtliches Zulassungsverfahren für den Transport- und Lagerbehälter CASTOR MTR 2
02 E 8946 10/96 bis 01/00	DBE	Entwicklung und Erprobung redundanter faseroptischer Meßsysteme mit Selbstkontrolle zur Endlagerüberwachung
02 S 7523 10/93 bis 12/97	Noell	Entwicklung und Bau einer mobilen Umladestation zur Entsorgung von Brennelementen aus Forschungsreaktoren

A4 Charakterisierung und Eigenschaften potentieller Wirtsgesteinsformationen

02 E 8141 A 07/94 bis 06/98	BGR	Deutsch-Schweizerische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Endlagerung: Stofftransport in geklüftetem Fels /Gebirgscharakterisierung im Stollennahmbereich
02 E 8785 01/96 bis 07/98	GRS Braunschweig	Untersuchung physikalischer Prozesse und Parameter zum Fluid- und Gastransport im Nahbereich von Endlagern in granitischen Formationen des Felslabors Grimsel (Phase 4)
02 E 9027 01/97 bis 12/99	GRS Braunschweig	Zweiphasenfluß-Experiment im geklüfteten Kristallin im Hartgesteinlabor (HRL) ÄSPÖ

02 E 9037 01/97 bis 06/00	BGR	Zweiphasenfluß-Experimente im geklüfteten wasserführenden Kristallin
KWA 9503 06/95 bis 12/98	FZK	Deutsch-schwedische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Granit - Beteiligung an den Untersuchungen im schwedischen Untergelabor ÄSPÖ

B Verbesserung von Instrumentarien für die Sicherheitsbewertung von Endlagern

B2 Verhalten der Wirtsgesteinsformation

02 E 8755 09/95 bis 08/98	IfG Leipzig	Untersuchung der Barrierewirksamkeit des Gesteinsverbandes Steinsalz/Anhydrit/Salzton (BARITON)
02 E 8765 09/95 bis 08/98	GRS Braunschweig	Untersuchung der Barrierewirksamkeit des Gesteinsverbandes Steinsalz/Anhydrit/Salzton (BARITON)

B3 Chemische und physikalische Effekte im Nahfeld

02 E 8030 A 07/94 bis 04/98	FU Berlin	Bestimmung von Löslichkeitsprodukten endlagerrelevanten Elementen in gesättigten Salzlösungen in Gegenwart von Hydroxylapatit
02 E 8654 04/94 bis 03/98	FZJ	Untersuchungen zur Radionuklidfreisetzung durch Einwirkung konzentrierter Salzlasuren auf Alu-MTR-Brennelemente
02 E 8725 04/95 bis 06/97	FU Berlin	Elektrochemische und radiochemische Korrosionsuntersuchungen an Urandioxyd in endlagerrelevanten Elektrolytsystemen

B4 Verhalten von geotechnischen Barrieren

02 E 8715 10/95 bis 12/98	GRS Braunschweig	Untersuchung der Langzeit-Dichtwirkung von Bohrlochverschlüssen aus Salzgrus (DEBORA-Projekt Phase 2)
02 E 8805 01/96 bis 12/98	GRS Braunschweig	Experimentelle Untersuchungen zum Verhalten von Versatz in Endlagerstrecken im Salinar
02 E 8876 02/96 bis 04/99	TU BAF	Durchlässigkeitsverhalten von Steinsalzversatz bei gekoppeltem Einfluß von Fluiddynamik, Gebirgsmechanik und Lösungsvorgängen

02 E 8886 02/96 bis 04/99	BIG	Durchlässigkeitssverhalten von Steinsalzversatz gegenüber Laugen unter Berücksichtigung von zeitlich veränderlichen Überlagerungsdrücken und Lösungsvorgängen
02 E 8896 02/96 bis 12/98	BGR	Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Verhalten von Versatz in Endlagerstrecken im Salinar
02 E 8956 07/96 bis 06/99	GRS Braunschweig	Experimentelle und theoretische Untersuchung physikalisch-chemischer Vorgänge beim Laugenzutritt in Einlagerungsstrecken - theoretischer Teil -
02 E 8966 07/96 bis 06/99	Stoller	Experimentelle und theoretische Untersuchung physikalisch-chemischer Vorgänge beim Laugenzutritt in Einlagerungsstrecken - experimenteller Teil -
02 E 8986 07/96 bis 06/99	GRS Braunschweig	Untersuchungen zur geochemischen Stabilität von Tonen in Endlagern und Untertagedeponien im Salzgestein
02 E 9006 01/97 bis 01/00	GRS Braunschweig	Gasfreisetzung und Migration im Boom-Clay von Mol im Projekt CORALUS
02 E 9017 01/97 bis 12/99	GRS Braunschweig	Untersuchungen zum Zweiphasenfluß und diffusiven Transport in Tonbarrieren und Tongesteinen
02 E 9047 05/97 bis 04/00	GRS Braunschweig	Wirksamkeit der Abdichtung von Versatzmaterialien - Geochemische Untersuchungen
02 E 9057 01/98 bis 07/01	K-UTEC	Wirksamkeit der Abdichtung von Versatzmaterialien - Technikums- und In-situ-Versuche

B5 Verhalten von geologischen Barrieren

02 E 8664 10/95 bis 09/98	GSF	Geochemische Modellierung der Rückhaltung von Radionukliden der Elemente Sr, Cs, U, Am, Se und Ni in wassergesättigten Aquiferen
02 E 8795 11/95 bis 10/98	Uni Mainz	Einfluß von Huminstoffen auf das Migrationsverhalten radioaktiver und nichtradioaktiver Schadstoffe unter räturnahen Bedingungen
02 E 8815 11/95 bis 10/98	FZR	Einfluß von Huminstoffen auf das Migrationsverhalten radioaktiver und nicht radioaktiver Stoffe unter naturnahen Bedingungen - Synthese, radiometrische Bestimmung funktioneller Gruppen, Komplexierung -

B6 Methodenentwicklung und Rechenprogramme für Sicherheitsbewertungen

02 E 8705 01/95 bis 05/98	BSH	Transportmechanismen radioaktiver Substanzen im Arktischen Ozean - Numerische und experimentelle Studien am Beispiel der Kara- und Barentssee
------------------------------	-----	---

02 E 8835 01/96 bis 12/98	GRS Braunschweig	Weiterentwicklung des Rechenprogramms EMOS zur Durchführung von Langzeitsicherheitsanalysen
02 E 8845 01/96 bis 12/98	GRS Braunschweig	Aktualisierte Langzeitsicherheitsanalyse für wärmeerzeugende Abfälle im Salinar
02 E 8855 04/96 bis 03/99	GRS Braunschweig	Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern
02 E 8916 04/96 bis 03/99	TU Clausthal	Mobilisierung und Immobilisierung endlagerrelevanter Elemente

B7 Validierung von Modellen, Unsicherheitsanalyse

02 E 8865 01/96 bis 12/98	GRS Braunschweig	Validierung von Einzeleffekten in Grundwassermodellen
02 E 8926 06/96 bis 05/97	GRS Braunschweig	Untersuchung der Uran-Thorium-Mobilisation als natürliches Analogon für den Radionuklidtransport im Deckgebirge eines Endlagers für radioaktive Abfälle
02 E 8996 09/96 bis 06/97	GRS Braunschweig	Untersuchung von Altversatz als Analogon zur Konvergenz und Kompaktierung versetzter Strecken über lange Zeiträume - Phase 1 -

C Anpassung und Weiterentwicklung der Kernmaterialüberwachung an die Bedingungen der Direkten Endlagerung

In der folgenden Aufstellung sind auch Vorhaben enthalten, die über das Gemeinsame Programm von BMBF und IAEA für die technische Entwicklung und weitere Verbesserung der IAEA-Sicherheitsmaßnahmen durchgeführt werden. Diese Vorhaben sind mit GP abgekürzt. Die nachfolgende Zahl bezieht sich auf die laufende Nummer des Gemeinsamen Programms.

C1 Erstellung und Anpassung von Überwachungskonzepten

GP-Nr. A.13	GNS	Sicherheitsmaßnahmen für die Pilot-Konditionierungsanlage: Weiterentwicklung eines Instruments zur Identifizierung von Behälterschweißnähten mittels Ultraschall
GP-Nr. A.14	FZJ	Sicherungsmaßnahmen für die Direkte Endlagerung von Kernmaterialien einem geologischen Endlager: Untersuchung geophysikalischer Messungen

02 W 6206 01/97 bis 12/98	FZJ	Internationale Kernmaterialkontrolle vor neuen politischen und technischen Herausforderungen
------------------------------	-----	--

C2 Neue Techniken

02 W 6184 02/94 bis 12/98	FZJ	Verbesserung von Safeguards durch Datenfernübertragung und Auswertung von Satellitendaten
------------------------------	-----	---

C3 Aufnahme, Auswertung, Zusammenführung und Fernüberwachung von Daten

GP-Nr. D.26	FZJ	Entwicklung des digitalen Kamerasytems mit digitaler Aufzeichnungs- und Überprüfungsmöglichkeit auf der Basis des VXI-Bus
GP-Nr. D.27	FZJ	Entwicklung eines neuen elektronisch - optischen Siegels mit Integrationsmöglichkeiten über VXI-Bus

4.3.2 Untertägige Entsorgung chemotoxischer Abfälle

A Weiterentwicklung von Untertagedeponiekonzeptionen unter Sicherheitsgesichtspunkten

A1 Abfallcharakterisierung und -klassifizierung

02 C 0415 01/96 bis 12/97	GRS Braunschweig	Erprobung und Anpassung ökotoxikologischer Methoden zur Bewertung UTD-relevanten Abfall-Eluate
02 C 0506 08/96 bis 07/99	GRS Braunschweig	Erweiterung und Übertragung von Untersuchungsmethoden für die untertägige Einbringung von Abfällen - Realitätsnahe Untersuchungsmethoden zur Bestimmung des Langzeitverhaltens -

A2 Wissenschaftliche Grundlagen für Sicherheitsanforderungen

02 C 0294 01/95 bis 07/97	BGR Berlin	Tiefversenkung von Abwässern und flüssigen Abfällen in den östlichen Bundesländern
------------------------------	------------	--

A3 Weiterentwicklung von Einlagerungs-, Handhabungs- und Überwachungstechniken

02 C 0486 01/97 bis 04/00	Uni Magdeburg	Grundlagenuntersuchungen zum Dickstoffverfahren mit chemisch/toxischen Abfällen, insbesondere MVA-Filteraschen, im Salinar
------------------------------	---------------	--

A4 Charakterisierung und Eigenschaften potentieller Wirtsgesteinsformationen

02 C 0425 01/96 bis 09/97	GRS Braunschweig	Untersuchungen zur Auflockerungszone um Hohlräume im Steinsalzgebirge
02 C 0527 10/97 bis 01/01	TU BAF	Strömungskennwerten in Auflockerungszonen
02 C 0537 10/97 bis 01/01	Fraunhofer	Aktive akustische Verfahren zur Detektion von Auflockerungszonen

A5 Geotechnische Barrieren

02 C 0496 03/97 bis 07/98	TU BAF	Untersuchung und Bewertung alter Spülversatzkörper aus bergbaueigenen Rückständen der Kaliindustrie hinsichtlich der Eignung für Verschlußarbeiten in UTD
02 C 0516 08/96 bis 07/01	Kali und Salz	Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken -Forschungsvorhaben Schachtverschluß Salzdetfurth Schacht SA II
02 C 0547 10/97 bis 01/02	TU BAF	Entwicklung eines Grundkonzepts für langzeitstabile Absperrbauwerke für Strecken im Salinar

B Verbesserung von Instrumentarien für die Sicherheitsbewertung von Untertagedeponien

B2 Verhalten der Wirtsgesteinsformation

02 C 0264 04/95 bis 09/98	IfG Leipzig	Untersuchungen (Stoffgesetz-Entwicklung, Modellierung) zum Sprödbruchverhalten von Carnallitit und seiner Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit von UTD
02 C 0274 04/95 bis 12/98	IfG Leipzig	Untersuchungen zur Langzeitsicherheit von UTD in Salzformationen der flachen Lagerung im Zusammenhang mit dem Verformungs- und Bruchverhalten (Phase II)

B3 Chemische und physikalische Effekte im Nahfeld

02 C 0385 08/95 bis 10/97	TU Berlin	Untersuchung des langfristigen Gefährdungspotentials anorganischer Rückstände bei deren Integration in Schicht- und Sedimentgestein
02 C 0395 08/95 bis 01/99	TU Clausthal	Untersuchungen zur dauerhaften Immobilisierung schadstoffhaltiger Rückstände unter Berücksichtigung der Barrierewirkung kompakter Wirtsgesteine
02 C 0405 09/95 bis 12/97	TU BAF	Erstellung einer Datenbasis zur Modellierung der Wechselwirkung von chrom-, kupfer- und nickelhaltigem Deponegut mit Lösungen des Salzgestein einer UTD
02 C 0475 10/95 bis 09/98	GRS Braunschweig	Experimentelle Untersuchungen und geochemische Modellierung zum Verhalten schwermetallhaltiger chemisch-toxischer Abfälle in UTD in Salzformationen

B4 Verhalten von geotechnischen Barrieren

02 C 0193 11/93 bis 09/97	TU BAF	Materialuntersuchungen für Mehrkomponentensysteme auf Ton/Bentonit-Basis für Dichtung und Lastabtrag mit hohem Rückhaltevermögen für den langzeitsicheren Verschluß von UTD und Endlagern im Salinar
02 C 0526 08/96 bis 07/99	GRS Braunschweig	Wirksamkeit der Abdichtung von Versatzmaterialien - Geochemische Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Salzversatz mit Zuschlagstoffen -

B6 Methodenentwicklung und Rechenprogramme für Sicherheitsbewertungen

02 C 0224 01/94 bis 03/98	GRS Köln	Entwicklung und Anwendung analytischer Methoden zur Eignungsuntersuchung der Verbringung bergbaufremder Rückstände in dauerhaft offene Grubenräume im Festgestein
02 C 0244 04/94 bis 08/97	TU BAF	Entwicklung von Verfahren und Programmen zur Kalibrierung von Strömungs- und Transportmodellen
02 C 0365 08/95 bis 07/98	BGR	Arbeiten zur Modellierung von Grundwasserströmungen mit variabler Dichte -Testrechnungen und Modellanwendungen im Hinblick auf Verifizierung/Validierung des in Entwicklung befindlichen schnellen Grundwasserprogramms
02 C 0465 01/96 bis 03/98	GRS Braunschweig	Entwicklung eines schnellen Programms zur Modellierung von Grundwasserströmungen mit variabler Dichte

B7 Validierung von Modellen, Unsicherheitsanalyse

02 C 0113 07/93 bis 11/97	IFAG	Validierungsverfahren von Prognoserechnungen zur Standsicherheit der Grubengebäude von Endlagern chem./tox. Abfälle durch Verwendung eines Arrays von hochauflösenden Strainmetern
02 C 0354 08/95 bis 12/98	TU Clausthal	Genese, Mobilisierung und Migration fluider Komponenten in Salinargesteinen als natürliche Analoga für Mineralreaktionen und Stofftransporte in Untergrund-Deponien
02 C 0375 08/95 bis 07/98	GRS Köln	Anwendung von Qualitätssicherungsmaßnahmen sowie Durchführung von Test- und Verifizierungsrechnungen zur Qualifizierung des in Entwicklung befindlichen schnellen Grundwasserprogramms

4.4 Beiträge der Forschungseinrichtungen

Neben den projektgeförderten Forschungsarbeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle und untertägigen Entsorgung chemotoxischer Abfälle werden in den beiden Großforschungseinrichtungen des BMBF (Forschungszentrum Jülich (FZJ) und Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) auch institutionelle Forschungsarbeiten zur Entsorgung dieser Abfälle durchgeführt. Sie sind integraler Bestandteil dieses Förderkonzeptes.

Bis einschließlich 1994/95 hatte sich auch das Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit mit seinem Institut für Tieflagerung (GSF-IfT) an diesen Arbeiten beteiligt. Schwerpunkte waren die Entwicklung von Handhabungs- und Einlagerungstechniken, die experimentelle Bestimmung wichtiger geotechnischer und geochemischer Daten zum Verhalten der wesentlichen Barrieren sowie die Entwicklung und ständige Aktualisierung von Rechenprogrammen zur realitätsnahen Modellierung des Endlagersystems. Detaillierte Ausführungen zu bisherigen Aktivitäten des GSF-IfT sind in Kap. 5.1 enthalten. Mitte 1995 ist die FuE-Abteilung des Instituts für Tieflagerung in die GRS überführt worden. Damit wurde sichergestellt, daß das bei der GSF angesammelte Wissen in Deutschland zentral erhalten bleibt und, soweit notwendig, im Rahmen anwendungsorientierter Grundlagenforschung weiterentwickelt wird.

Der geologische Teil der Thematik des vorliegenden Programms ist darüber hinaus auch Bestandteil des FuE-Programms und des Wirtschaftsplans der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), einer nachgeordneten Behörde des BMWi.

4.4.1 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

Die BGR ist in die Planung und Errichtung der Endlagerprojekte Konrad und Gorleben eingebunden. Die Arbeiten für das geplante Endlager im Salzstock Gorleben umfassen neben den Routineaufgaben (z.B. seismische Überwachung) die Steuerung der untertägigen Erkundung anhand geologischer Befunde bis zur geowissenschaftlichen Eigenschaftsaussage.

Ein Forschungsschwerpunkt der BGR im Rahmen der Arbeiten zu diesem Förderkonzept ist die Ableitung von physikalischen Stoffgesetzen der Wirtsgesteine, insbesondere zum thermomechanischen Verhalten von Salzgestein und Versatzmaterial. Ein wichtiger Schritt ist dabei die Entwicklung von experimentellen Methoden zur Bestimmung der Stoffgesetzparameter sowie die Weiterentwicklung der Prüf- und Meßtechnik für Labor- und In-situ-Versuche, die neben dem Kriechen auch Dilatanz, Permeation und Durchlässigkeit für Gase und Flüssigkeiten beinhalten. Nur die Kenntnis der Gesetzmäßigkeiten und der spezifischen Parameter erlaubt die genügend genaue Vorausberechnung des Langzeitverhaltens des Gebirges. Außerdem werden Modelle zur Grundwasserbewegung entwickelt und getestet, die die Dichteunterschiede des Grundwassers berücksichtigen und so mithelfen, die Langzeitsicherheit besser einzuschätzen. Ferner beteiligt sich die BGR maßgebend an den Forschungsarbeiten im Felslabor Grimsel und im Hard Rock Laboratory Äspö.

4.4.2 Forschungszentrum Jülich (FZJ)

Das Forschungszentrum Jülich beschäftigt sich im Bereich Entsorgung mit Fragen der betrieblichen Sicherheit und der Langzeitsicherheit von untertägigen Entsorgungseinrichtungen. Die Arbeiten werden im Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik (ISR) durchgeführt. Beiträge zur Charakterisierung von HTR-Brennelementen kommen außerdem aus dem Bereich der Heißen Zellen. Arbeitsschwerpunkte sind:

- Charakterisierung und Behandlung von HTR- und MTR-Brennelementen und von Abfällen für die Endlagerung
- Endlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen und HTR/MTR-Brennelementen
- Neue Abfallverwahrformen
- Radiochemische Untersuchungen zur Isotopentransmutation

Ziel der Untersuchungen zur **Charakterisierung und Behandlung von HTR- und MTR-Brennelementen und von Abfällen für die Endlagerung** ist die Ermittlung der für die Zwischen- und Endlagerung relevanten Eigenschaften des Abfalls. Die Ergebnisse fließen in die Sicherheitsanalysen für die Betriebs- und die Nachbetriebsphase eines

Endlagers ein. Dazu werden die chemischen und physikalischen Eigenschaften sowie die Aktivitätsinventare der radioaktiven Abfälle und der verbrauchten Brennelemente bestimmt. Ihr Freisetzungsvorverhalten unter trockenen Lagerbedingungen und unter dem Einfluß von Salzlauge wird untersucht. Daneben werden Behandlungsverfahren entwickelt, mit denen spezielle Abfälle in eine endlagergerechte Form gebracht werden können.

Wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle müssen mit einer die speziellen Abfalleigenschaften berücksichtigenden Technik endgelagert werden. Die Untersuchungen zur **Endlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen und HTR/MTR-Brennelementen** konzentrieren sich auf die Endlagerung z.B. in Bohrlöchern und umfassen insbesondere die detaillierte Beschreibung der mit dem Salzgrusversatz zusammenhängenden Effekte wie Lastabtragung, Gasentwicklung und -ausbreitung (VIV-Arbeiten).

Entwicklungsziel des Themas **Neue Abfallverwahrformen** ist die Herstellung und Charakterisierung keramischer Abfallverwahrformen einer zweiten Generation: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ -Matrix auf der Basis eines Sol-Gel-Herstellungsverfahrens für HAW/TRU-Abfallösungen sowie von Natrium-Aluminosilikaten und Zementgläsern zur Fixierung von LAW/MAW.

Die Umwandlung langlebiger Radionuklide in kurzlebige oder stabile Isotope (Transmutation), die radiologisch ungefährlich sind, setzt deren Vorabtrennung aus dem HAW (Partitioning) voraus. Ziel der **Radiochemischen Untersuchungen zur Isotopentransmutation** ist die Entwicklung effizienter Verfahren zur Abtrennung der Transuranelemente. Untersucht werden chromatographische ebenso wie extraktive Trennverfahren. Parallel zu diesen radiochemischen Abtrennuntersuchungen werden aktive ^{129}I - und ^{237}Np -Targets hergestellt, in Beschleunigern bestrahlt und aufgearbeitet. Über die Bestimmung der Produktnuklide sollen die Wirkungsquerschnitte bestimmt bzw. bestätigt werden.

4.4.3 Forschungszentrum Karlsruhe (FZK)

Die FZK-Arbeiten im Rahmen dieses Förderkonzeptes werden im wesentlichen durch das Institut für Nukleare Entsorgungstechnik (INE) durchgeführt. Die Untersuchungen zur Aktiniden- sowie Spaltproduktabtrennung und -transmutation laufen im Projekt Nukleare Sicherheitsforschung (PSF). Im Rahmen der INE-Arbeiten werden grundlegende geochemische Untersuchungen für den Langzeitsicherheitsnachweis anwendungsbezogen aber anlagenunabhängig durchgeführt. Die Forschungsarbeiten beziehen sich auf wärmepräproduzierende Abfälle, d.h. auf verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung und abgebrannte Brennelemente. Dabei werden Salz- und Hartgesteinformationen betrachtet. Im Gegensatz zu anderen mit der Endlagersicherheit befaßten Institutionen stehen im INE die geochemischen Aspekte des Sicherheitsnachweises im Vordergrund. Ziel ist die Quantifizierung der maximal möglichen Freisetzung von Radionukliden. Der Schwerpunkt der Arbeiten besteht in der Untersuchung der Migration der toxitätsbestimmenden Aktiniden und Spaltprodukte über technische, geotechnische und geologische Barrieren hinweg bis hin zur Biosphäre (“Multibarrierensystem”).

Die Arbeiten des INE beinhalten folgende Themenschwerpunkte:

- Szenarienentwicklung und Vergleich von Endlagerkonzepten
- Radionuklidrückhaltung durch technische und geotechnische Barrieren
- Radionuklidrückhaltung in der geologischen Barriere
- Aquatische Chemie der Aktiniden und langlebiger Spaltprodukte
- Geochemische-Transportmodellierung sowie Untersuchung der Übertragbarkeit.

Im Themenschwerpunkt **Szenarienentwicklung und Vergleich von Endlagerkonzepten** werden Forschungsarbeiten zur Beschreibung der thermischen und thermomechanischen Prozesse sowie der Umlösevorgänge (Salz) im erweiterten Nahbereich eines Endlagers durchgeführt. Zusätzlich werden Strategien für szenarienunabhängige Sicherheitsanalysen entwickelt. Konzepte zur Transmutation von langlebigen Aktiniden und Spaltprodukten und zur Immobilisierung von Plutonium werden unter dem Gesichtspunkt der Endlagersicherheit mit den derzeit favorisierten Konzepten verglichen. Ferner wird an einer Untersuchung zur Endlagerung in Hartstein mitgearbeitet.

Die Wirksamkeit und Redundanz des Multibarrierensystems zur Isolation und Immobilisierung der Radionuklide wird durch gezielte Untersuchung des Sicherheitsbeitrages jeder einzelnen Barriere quantifiziert. Im Rahmen des Themenschwerpunkts **Radionuklidrückhaltung durch technische und geotechnische Barrieren** wird die nach eventuellem Wasserzutritt erfolgende Korrosion von HAW-Gläsern, abgebranntem Kernbrennstoff und von Behältermaterialien untersucht. Diese Vorgänge gehen einher mit der Änderung des geochemischen Milieus im Endlagernahbereich. Durch Quantifizierung der Radionuklidmigration in der geotechnischen Barriere, d.h. im Nahbereich des Endlagers, wird der Anteil der Radionuklide bestimmt, der mobil und somit transportierbar ist. Hierzu werden die Mobilisierung bzw. Rückhaltung von Radionukliden in neu gebildeten Wirtsphasen untersucht und Versatzmaterialien mit einer zusätzlichen Rückhaltewirkung entwickelt ("intelligente Barriere").

Die Arbeiten zum Themenschwerpunkt **Radionuklidrückhaltung in der geologischen Barriere** (im Fernbereich des Endlagers) haben das Ziel, den weiträumigen, teilweise kolloidgetragenen Transport von Radionukliden und ihre Rückhaltung durch Sorptionsprozesse in natürlichen Aquifern zu quantifizieren. Die im Aquifersystem enthaltenen Huminstoffe und Kolloide können die Radionuklide in Lösung stabilisieren und Migration ermöglichen. Den Schwerpunkt bilden Untersuchungen zur Wechselwirkung von Radionukliden mit Grundwasserkolloiden und Oberflächen der Geomatrix (Sorption) sowohl an Modellsystemen wie auch an standortspezifischen realen Aquifersystemen.

Die Kenntnisse aus den Forschungsarbeiten zum Themenschwerpunkt **aquatischen Chemie der Aktiniden und langlebigen Spaltprodukte** bilden die Grundlage für die Untersuchungen zur Radionuklidrückhaltung im Multibarrierensystem. Diese Untersuchungen umfassen die Bestimmung thermodynamischer Daten für Komplexbildungsgleichgewichte in der wässrigen Phase (Bildung mobiler Spezies) sowie für Gleichgewichte an der Grenzfläche fest-flüssig (Sorption, Bildung fester Lösungen). Für die wichtigsten geochemischen Reaktionen der tri- und pentavalenten Aktiniden wurden belastbare Daten über einen weiten Salinitätsbereich bei Raumtemperatur bestimmt. Entsprechende Daten fehlen für die tetravalenten Aktiniden und für alle Nuklide bei endlagerrelevanten erhöhten Temperaturen. Maximale Lösungskonzentrationen für Aktiniden sind in Gegenwart von Kolloiden noch nicht quantifizierbar.

Der Themenschwerpunkt **Geochemische/Transportmodellierung sowie Untersuchung der Übertragbarkeit** hat die Entwicklung von Modellen zur Beschreibung und zur Prognose des Migrationsverhaltens der Radionuklide als Grundlage für Langzeitsicherheitsanalysen zum Ziel. Anhand thermodynamischer Daten werden geochemische Modelle zur Vorhersage der Eigenschaften der Radionuklide in komplexen natürlichen Systemen entwickelt. Die Stabilität der Abfallprodukte und ihre Fähigkeit zur Rückhaltung von Radionukliden sowie die Bildung neuer Wirtsphasen für Radionuklide wird mit geochemischen Modellen beschrieben. Unter Einbeziehung von Transport- und Sorptionsmodellen einschließlich von Modellen zum Kolloidtransport wird das Migrationsverhalten der Radionuklide im Endlagernahbereich und Endlagerfernberreich quantifiziert. Übertragbarkeitsstudien dienen der Bewertung der Belastbarkeit von Modellaussagen. Dazu werden standortspezifische Daten mit den Vorhersagen der Modelle (geochemische Modelle, gekoppelte Transport- und Speziationsmodelle) verglichen und Rückschlüsse auf die Übertragbarkeit gewonnen. Darüber hinaus werden natürliche Analoga zur Validierung von Daten und Modellen untersucht.

Im Rahmen des Projekts Nukleare Sicherheitsforschung (PSF) werden im FZK Arbeiten zur Aktinidenabtrennung und Transmutation durchgeführt. Schwerpunkte der Arbeiten sind

- Neutronenphysikalische Untersuchungen zur Transmutation von Aktiniden und Spaltprodukten
- Sicherheitsuntersuchungen zum dynamischen Verhalten von Kernen mit Aktinidenanteil
- Bestrahlungsexperimente zur Transmutation von Aktiniden
- Abtrennverfahren für Aktiniden aus hochradioaktiven Abfällen.

Beteiligte Institute sind das Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik (INR), das Institut für Reaktorsicherheit (IRS), das Institut für Materialforschung (IMF) und das Institut für Technische Chemie (ITC).

Die Programme der beiden Großforschungseinrichtungen FZJ und FZK sind, was die Endlagerung anbelangt, zum großen Teil auf radioaktive Abfälle ausgerichtet. Hierfür wurden 1996 insgesamt etwa 22 Mio.DM aufgewendet. Die Forschungsaufwendungen

von FZJ und FZK auf dem Gebiet der Aktinidenabtrennung und Transmutation beliefen sich 1996 auf insgesamt etwa 8 Mio.DM.

5 BISHERIGE FÖRDERUNG VON FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSARBEITEN DURCH DAS BMBF

Das BMFT/BMBF fördert Forschung und Entwicklung zur geordneten untertägigen Be- seitigung radioaktiver Abfälle seit mehr als 30 Jahren. Die Förderung begann 1964 mit dem Erwerb des stillgelegten Salzbergwerks Asse durch den Bund für die Durchführung von In-situ-Untersuchungen über die Eignung des Mediums Salz zur Endlagerung radio- aktiver Abfälle. Die Förderung von FuE zur untertägigen Ablagerung chemotoxischer Abfälle durch das BMFT begann im Jahre 1989 durch die Beteiligung an einem Projekt der Niedersächsischen Gesellschaft zur Endablagerung von Sonderabfall mbH (NGS), das die Nutzung von Salzkavernen für die Ablagerung von chemotoxischen Abfällen zum Ziele hatte. Der überwiegende Teil der bisherigen Forschungsbemühungen um die un- tertägige Abfallentsorgung konzentrierte sich somit auf radioaktive Abfälle. Grund dafür waren das frühere Vorliegen eines Entsorgungskonzeptes der Bundesregierung für die- se Abfälle mit der Vorgabe einer Endlagerung in tiefen geologischen Formationen so- wie die gesetzliche Zuständigkeit des Bundes für die Bereitstellung von Endlagern.

5.1 Eingesetzte Ressourcen

Das BMFT/BMBF hat für FuE-Arbeiten zur **Endlagerung radioaktiver Abfälle** von Mit- te der 60er Jahre bis Ende 1996 rund 1,4 Mrd.DM aufgewendet, davon allein ca. 1,2 Mrd.DM im Zeitraum 1981 bis 1996. Diese Summen teilen sich etwa folgendermaßen auf:

- Eigenmittel der Großforschungseinrichtungen GSF, FZJ, FZK (institutionelle Förderung ohne Asse-Aufwendungen) 37%
- vom BMFT/BMBF direkt finanzierte Forschungsvorhaben (Projektförderung oh- ne Asse-Aufwendungen) 38%
- Vorhalten und Betrieb des Salzbergwerks Asse 25%.

Der Verlauf der jährlichen Aufwendungen der letzten sechzehn Jahre ist Bild 3 zu ent- nehmen. Diese lagen bis einschließlich 1992 bei etwa 80 bis 90 Mio.DM/a.

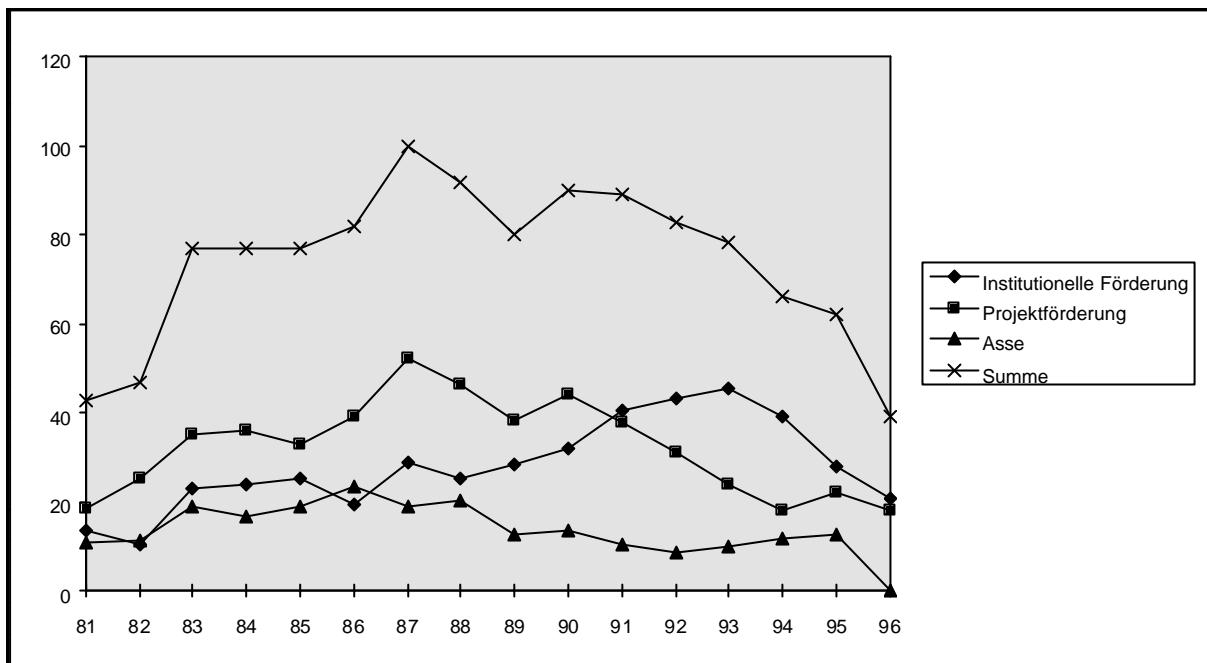


Bild 3: Jährliche Aufwendungen des BMFT/BMBF für FuE-Arbeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle

Die starke Steigerung in den Jahren 1987 und 1988 ist in erster Linie auf FuE-Arbeiten zur Direkten Endlagerung zurückzuführen (Projektförderung), die zu diesem Zeitpunkt mit der Entwicklung dieses Entsorgungsweges zur Anwendungsreife in das Stadium aufwendiger Demonstrationsversuche traten.

Die über die Projektförderung zur Verfügung stehenden Mittel waren Anfang der 90er Jahre stark rückläufig, scheinen sich aber in den letzten Jahren stabilisiert zu haben. Im Gegensatz dazu standen aus der institutionellen Förderung der Großforschungseinrichtungen - vor allem bei FZK - nach dem Verzicht auf die Wiederaufarbeitungsanlage in Wackersdorf ab 1989 zunächst zusätzliche Mittel für FuE-Arbeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle zur Verfügung. Allerdings sind auch hier die finanziellen Aufwendungen in den letzten Jahren rückläufig.

Für das Vorhalten und den Betrieb des ehemaligen Salzbergwerks Asse, das als untertägiges Labor für FuE-Arbeiten unter weitgehend realitätsnahen Bedingungen dient, wurden in den 80er Jahren 10 bis 20 Mio.DM/a aufgewendet, mit fallender Tendenz in

den letzten Jahren. Die erhöhten Aufwendungen Mitte der 80er Jahre waren in erster Linie sicherheitsbezogen und dienten außerdem dem Ausbau des ehemaligen Salzbergwerks Asse als untertägiges Labor. Seit 1996 wird der Betrieb des Salzbergwerks Asse nicht mehr als FuE-Aufwendung geführt, da dort wahrscheinlich keine neuen FuE-Arbeiten begonnen werden und das Bergwerk zur Stilllegung vorbereitet wird.

Der Untertagebereich, der heute hauptsächlich für Experimente zur Verfügung steht, erstreckt sich von 800 bis 1.000 m Teufe (siehe Bild 4). Er entstand mit dem Aufschluß dieses Bereichs in den Jahren 1980 bis 1991, und zwar durch das Auffahren von drei neuen Sohlen, einer Wendelstrecke zu ihrer Verbindung und dem Abteufen dreier Blindschächte im Bohrverfahren. Zusammen mit der anschließend eingerichteten Infrastruktur (Zugänge, Werkstätten etc.) wurde der neue Teil des Bergwerks zu einem einzigartigen Testfeld, das trotz Diskussion um eine Schließung der Asse grundsätzlich noch einige Zeit für FuE-Arbeiten genutzt werden kann. Im Jahr 1996 wandte das BMBF für FuE-Arbeiten zurendlagerung radioaktiver Abfälle insgesamt etwa 40 Mio.DM auf, von denen ca. 55% auf die institutionelle Förderung und ca. 45% auf die Projektförderung entfielen.

Für FuE-Aktivitäten auf dem Gebiet der **untertägigen Ablagerung chemotoxischer Abfälle** wurden bis Ende 1996 insgesamt ca. 50 Mio.DM aufgewendet. Dieses Finanzvolumen beinhaltet die Beteiligung am Vorhaben der NGS mit ca. 6,7 Mio.DM sowie die ab 1991 aufgenommene Projektförderung auf den in diesem Programm beschriebenen Themengebieten. Zusätzlich wurden aus dem Bereich der institutionellen Förderung ca. 4,5 Mio.DM zur Verfügung gestellt. Im Jahre 1996 lag das Fördervolumen bei rund 10 Mio.DM.

In Deutschland wurden maßgebliche FuE-Arbeiten zurendlagerforschung und zur untertägigen Entsorgung chemotoxischer Abfälle am früheren Institut für Tieflagerung der GSF durchgeführt. Da auch viele der nachfolgend dargestellten Ergebnisse aus Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des GSF-IfT resultierten, sollen die diesen Arbeiten zugrunde liegenden Forschungsschwerpunkte des IfT hier kurz skizziert werden.

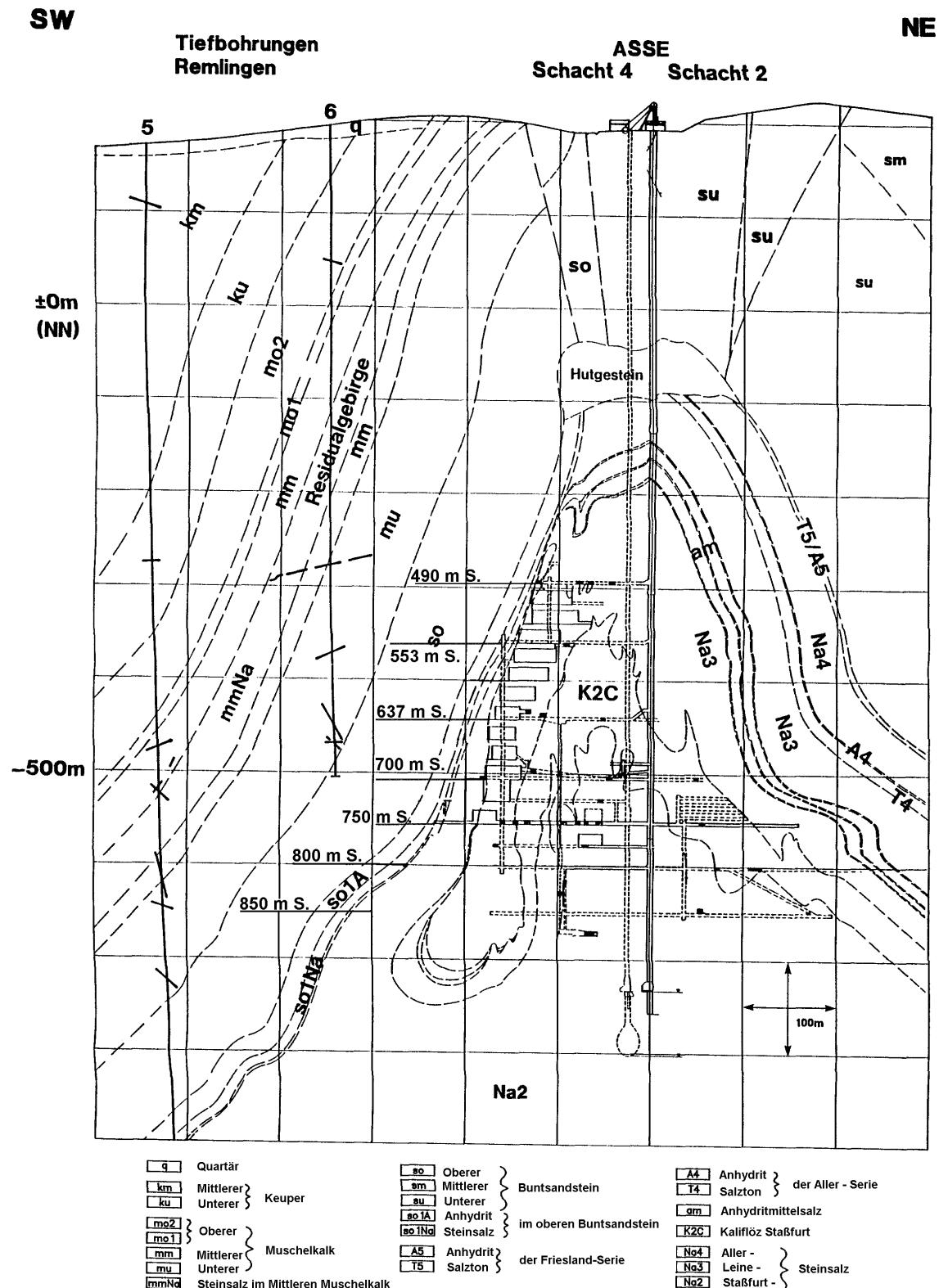


Bild 4: Schnitt durch das Grubengebäude des ehemaligen Salzbergwerks Asse

- Sicherheitstechnische Rahmenbedingungen, die bei Planung, Bau und Betrieb von Endlagern erfüllt werden müssen, wurden erarbeitet und fortgeschrieben. An der Ermittlung geologischer, hydrologischer, geochemischer und geotechnischer Parameter, die für die Bewertung von Endlagerformationen und -standorten von entscheidender Bedeutung sind, wurde gearbeitet. Des weiteren wurde die Charakterisierung der Abfälle und die Beschreibung ihres Verhaltens unter Endlagerbedingungen mit hohem experimentellen Aufwand verfolgt.
- Handhabungs- und Einlagerungstechniken für Endlager wurden entwickelt und eingehend erprobt. Besonderes Augenmerk wurde am IfT dabei adaptierten bergtechnischen Methoden und Verfahren gewidmet, die zur Errichtung des Multi-barrieresystems durch die Verfüllung und den Verschluß von Hohlräumen eingesetzt werden. Auch Methoden zur Schaffung und zum Verschluß spezifischer Ablagerungshohlräume wurden erprobt.
- Moderne Sicherheitsbetrachtungen schließen Untersuchungen zu Auftreten und Konsequenzen möglicher Störfälle oder nicht bestimmungsgemäßer Entwicklungen ein. Die bei der Endlagerung gefährlicher Abfälle relevanten Prozesse wie der Zutritt von Lösungen und die Entstehung sicherheitsrelevanter Gasvolumina wurden durch geeignete experimentelle und analytische Ansätze untersucht und beschrieben. Als Vorsorge gegen solche Ereignisabläufe wurden langzeitig stabile Abschlußbauwerke konzipiert.
- Der Nachweis der Langzeitsicherheit untertägiger Entsorgungseinrichtungen ist wegen der zu betrachtenden langen Zeiträume nur analytisch mit Hilfe von Modellrechnungen zu erbringen. Für die erwartete bestimmungsgemäße Entwicklung aber auch für etwaig zu berücksichtigende Störfälle wurden Szenarien definiert und hinsichtlich ihrer Konsequenzen beurteilt. Die Güte solcher rechnerischen Prognosen ist entscheidend von den verwendeten Eingangsparametern und den eingesetzten Rechenmodellen abhängig. Sowohl Datenbasis als auch Rechenmodelle wurden fortlaufend überprüft und aktualisiert sowie spezifischen Gegebenheiten und Anforderungen angepaßt.

Der Erhalt des auf diesen Gebieten erworbenen Know-how ist durch die 1995 erfolgte Eingliederung des FuE-Bereichs des IfT als Fachbereich Endlagersicherheitsforschung in die GRS sichergestellt.

5.2 Ergebnisse

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse der bisherigen BMFT/BMBF-finanzierten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für die Bereiche Endlagerung radioaktiver Abfälle und Kernmaterialüberwachung sowie untertägige Entsorgung chemotoxischer Abfälle dargestellt. Innerhalb dieser Bereiche erfolgt eine Aufteilung in die Sachgebiete „Weiterentwicklung von Endlager- bzw. Untertagedeponiekonzeptionen unter Sicherheitsgesichtspunkten“ und „Verbesserung von Instrumentarien für die Sicherheitsbewertung von Endlagern bzw. Untertagedeponien“. Das Sachgebiet „Weiterentwicklung von Endlager- bzw. Untertagedeponiekonzeptionen unter Sicherheitsgesichtspunkten“ enthält auch Ergebnisse über technische Entwicklungen. Anhang 2 enthält eine Liste aller seit 1980 geförderter und abgeschlossener Fördervorhaben auf den Gebieten der Endlagerung radioaktiver Abfälle und Kernmaterialüberwachung sowie der untertägigen Entsorgung chemotoxischer Abfälle.

5.2.1 Endlagerung radioaktiver Abfälle und Kernmaterialüberwachung

5.2.1.1 Weiterentwicklung von Endlagerkonzeptionen unter Sicherheitsgesichtspunkten

Salz als Endlagermedium

Bereits in einem Bericht der Amerikanischen Akademie der Wissenschaften /22/ wurden Salzformationen wegen des Fehlens von Wasser als besonders geeignet für die Endlagerung radioaktiver Abfälle bezeichnet. Im Zweiten Deutschen Atomprogramm wurde 1963 eine Empfehlung für Salz ausgesprochen /23/, ebenso in einem Gutachten der Bundesanstalt für Bodenforschung, der Vorgängerorganisation der jetzigen Bun-

desanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe /24/. Alle Untersuchungen führten zu dem Ergebnis, daß Salz als Endlagermedium grundsätzlich geeignet ist.

Die für die Endlagerung wichtigen Eigenschaften von Steinsalz sind dessen Plastizität, die zu einem raschen Verschließen von Rissen und Hohlräumen führt, ferner die im Vergleich zu anderen Endlagermedien hohe Wärmeleitfähigkeit, die extrem geringe Durchlässigkeit gegenüber Wasserzuflüssen von außen, sowie die Möglichkeit, auf relativ einfache Weise Hohlräume im Salz zu erstellen.

Andere geologische Formationen als Salz

Neben Steinsalz (Evaporiten) kommen auch andere in Deutschland vorhandene Gesteinsarten aus unterschiedlichen geologischen Formationen als Wirtsgestein für die Endlagerung gefährlicher Abfälle in Betracht.

Untersuchungen zur Frage der Eignung des 1976 stillgelegten Eisenerzbergwerks Conrad für die Endlagerung schwach- und mittelaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung wurden in den Jahren 1976 bis 1982 durchgeführt. Sie ergaben unter anderem, daß die mächtigen Ton- und Mergelschichten des Deckgebirges über dem Erzlager ein Eindringen von oberflächennahem Grundwasser ins Endlager und eine Radionuklidfreisetzung aus dem Endlager verhindern. Die bergmännischen Erfahrungen aus dem Erzbergbau haben außerdem gezeigt, daß die Auffahrung standfester, d.h. bergtechnisch beherrschbarer Endlagerkammern möglich ist. Alle erzielten Ergebnisse wiesen den Standort und die vorgesehene Formation als geeignet aus.

Im Hinblick auf Granit beteiligt sich das BMBF seit 1982 im Rahmen eines bilateralen Abkommens mit der Schweiz an den laufenden Untersuchungen im schweizerischen Felslabor Grimsel. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, daß Granit als Einlagerungsmedium für radioaktive Abfälle grundsätzlich geeignet ist. Darüber hinaus wurden Meßverfahren für detaillierte Untersuchungen an potentiellen Granitstandorten entwickelt und Konzepte zur Standorterkundung erarbeitet. Ferner wurde ein Programm zur Berechnung von dreidimensionalen Durchströmungs- und Stofftransportproblemen in geklüftetem Gestein entwickelt und Untersuchungen zur Zweiphasenströmung durchgeführt. Die in den verschiedenen Versuchen angewandten Meßmethoden sowie die gewonnenen

Ergebnisse, z.B. zum Ausbreitungsverhalten von Radionukliden, sind auch für andere Gesteine, wie z.B. Salz, von Nutzen.

Endlagerung im Meeresboden

Zwischen 1976 und 1987 untersuchte eine internationale Arbeitsgruppe im Auftrag der OECD-NEA die Möglichkeit, verglaste hochradioaktive Abfälle in das Sediment von Tiefsee-Ebenen in etwa 5.000 Meter Wassertiefe einzubringen. Erfolgreiche Versuche hatten gezeigt, daß die für den verglasten HAW vorgesehenen torpedoförmigen Stahlbehälter (Penetratoren) durch den freien Fall im Wasser bis zu 35 m tief in das weiche und plastische Sediment eindringen und anschließend fest umschlossen werden. Auf deutscher Seite förderte das BMBF die Modellierung des Langzeitverhaltens der Radionuklide. Die Verteilung der Radionuklide in den Weltmeeren und der Verzehr von Meerestieren führt demnach zu maximalen Individualdosen, die weit unter den zulässigen Grenzwerten liegen. Die FuE-Arbeiten zu diesem Thema wurden eingestellt, da sich die Bundesrepublik zusammen mit anderen Ländern in der Londoner Konvention /12/ verpflichtet hatte, auf die Ablagerung radioaktiver Abfälle im Meer zu verzichten.

Potentielle Standorte für nukleare Endlager in Salz und Hartgestein

Bereits in den Jahren 1972 bis 1975 wurden zahlreiche potentielle Standorte nach einem umfangreichen Kriterienkatalog auf ihre Eignung als Endlager für radioaktive Abfälle geprüft. 1977 bestimmte die Niedersächsische Landesregierung Gorleben als einzigen Standort, der untersucht werden sollte. Die bislang vorliegenden Erkundungsergebnisse untermauern laut BfS die Eignungshöufigkeit des Salzstocks.

Des weiteren gab die Bundesregierung angesichts der bald nach der Auswahl einsetzenden politischen Diskussion über alternative Standorte zu Gorleben bei der BGR vorsorglich drei Studien zur Bewertung von Kristallin- und Salzstandorten in der Bundesrepublik Deutschland in Auftrag für den Fall, daß sich Gorleben wider Erwarten als ungeeignet für ein Endlager erweisen sollte. Diese Studien lagen 1982/83 vor. Dabei konnten untersuchungswürdige potentielle Standortgebiete identifiziert werden. Diese Studien wurden, ausgehend von der im Januar 1991 geschlossenen Koalitionsvereinbarung der Regierungsparteien, im Auftrag des BMU (für Salz) und des BMBF (für Kristal-

lin) in den letzten Jahren durch die BGR um entsprechende Informationen aus den Neuen Bundesländern ergänzt. Die Untersuchungen, die in der Auswertung vorhandener geologischer Informationen bestanden, haben ergeben, daß auch in den Neuen Bundesländern untersuchungswürdige potentielle Standorte im Kristallin und Salz vorhanden sind /25/, /26/.

Endlagerung schwach- und mittelaktiver Abfälle (LAW/MAW)

Parallel zu den Grundsatzuntersuchungen zur Eignung von Steinsalz stand die Entwicklung einer Technik zur Einlagerung mittel- und schwachaktiver Abfälle im Salz im Vordergrund. Mehrjährige Versuche im stillgelegten Salzbergwerk Asse zeigten, daß für schwachaktive, in 200-l-Fässern konditionierte Abfälle die Versturztechnik mit nachfolgender Salzgrusüberdeckung eine zuverlässige Methode der Einlagerung darstellt. Zur Endlagerung mittelaktiver, nicht wärmeerzeugender Abfälle wurden Techniken für die Handhabung entwickelt. Die Gebinde wurden oberhalb der für die Endlagerung eingerichteten Kammer angeliefert, mit strahlenschutzgemäßen Techniken in die Kammer abgesenkt und so sicher endgelagert. Die Dosisleistung im Bergwerk liegt unterhalb der natürlichen Strahlenbelastung über Tage.

Verfestigung und Lagerung von LAW/MAW in Salzkavernen

In Ergänzung zu der vorgenannten Versuchseinlagerung wurde ab 1976 an einer behälterlosen Einlagerungstechnik für mittel- und schwachaktive Abfälle gearbeitet. 1988 wurde das Verfahren im Salzbergwerk Asse demonstriert, wobei rund 1.000 Tonnen inaktives Gemisch durch eine Rohrleitung in eine 1.000 m tief gelegene Prototypkaverne eingebracht wurden. Eine Kostenanalyse ergab Vorteile dieses Verfahrens im Vergleich zur Einlagerung in Fässern. Allerdings entfiel 1989 durch die Verlagerung der Wiederaufarbeitung ins Ausland die für den Verfahrensablauf notwendige Voraussetzung, auf die Abfallvorbehandlung einwirken zu können.

Endlagerung hochradioaktiver Abfälle

Grundlegende Erkenntnisse über das Verhalten hochradioaktiver Abfälle in Salz folgten aus Versuchen, in denen die Wärme- und Strahlungseinwirkung auf das Medium mit elektrischen Erhitzern und Co-60-Quellen (Laugenmigrationstest) im Salzbergwerk As-

se simuliert wurde. Bei den Erhitzerversuchen war die Freisetzung von Feuchte in das Bohrloch zu gering, um eine Korrosion der Einlagerungsbehälter zu bewirken. Eine Freisetzung von Kristallwasser aus dem Steinsalz aufgrund von Rekristallisationsphänomenen trat erst oberhalb von 230°C auf. Das liegt deutlich über der für die Endlagerplanung vorläufig vorgesehenen Auslegungstemperatur von 200°C. Ferner zeigten sich die erwarteten guten Kriecheigenschaften des Steinsalzes, insbesondere bei hohen Temperaturen. Im sog. Laugenmigrationstest wurde eine nur geringe, auf die engere Umgebung der Einlagerungsposition beschränkte Veränderung der Kristallstruktur des Salzes durch Strahlung unter später im Endlager herrschenden Temperaturverhältnissen beobachtet.

Im Rahmen eines Nachfolgeprojektes zu diesen Untersuchungen wurde die gesamte Handhabungstechnik für die Einlagerung von hochaktiven Abfällen in Bohrlöchern im Maßstab 1:1 entwickelt und erfolgreich erprobt. Diese umfaßt Transportbehälter und Transportfahrzeug für die Förderung von hochradioaktiven Quellen nach unter Tage, die Einlagerungsmaschine sowie die Bohrlochabschirmung (siehe Bild 5). Die ursprünglich beabsichtigte Einlagerung von 30 Kokillen mit hochaktiven Abfallsimulaten wurde aufgrund von Diskussionen um die Zuständigkeit der Finanzierung des Projektes, an denen auch der Bundesrechnungshof beteiligt war, zum 31.12.1992 aufgegeben.

Herstellung tiefer Bohrlöcher

Es ist vorgesehen, hochaktive und wärmeentwickelnde mittelaktive Abfälle in tiefen Bohrlöchern im Salz endzulagern. Da 300 bis 600 m tiefe Bohrlöcher mit Durchmessern von 600 mm und darüber nicht mit herkömmlichen Trockenbohrverfahren erstellt werden können, wurden sogenannte Schleusenbohrköpfe mit automatischer Richtungskorrektur und Ausbringung des Bohrkleins mittels Druckluft entwickelt. Bei der Erprobung dieser neuen Technik im Salzbergwerk Asse ergab sich für eine 350-m-Bohrung eine Abweichung von lediglich 10 cm von der Vertikalen. Mit einer neu entwickelten Bohranlage mit automatischer Bohrkopfsteuerung wurde ein 500 m tiefes, lotrechtes Bohrloch spezifikationsgerecht erstellt. Für den routinemäßigen Einsatz ist allerdings noch die Weiterentwicklung des Verfahrens notwendig.

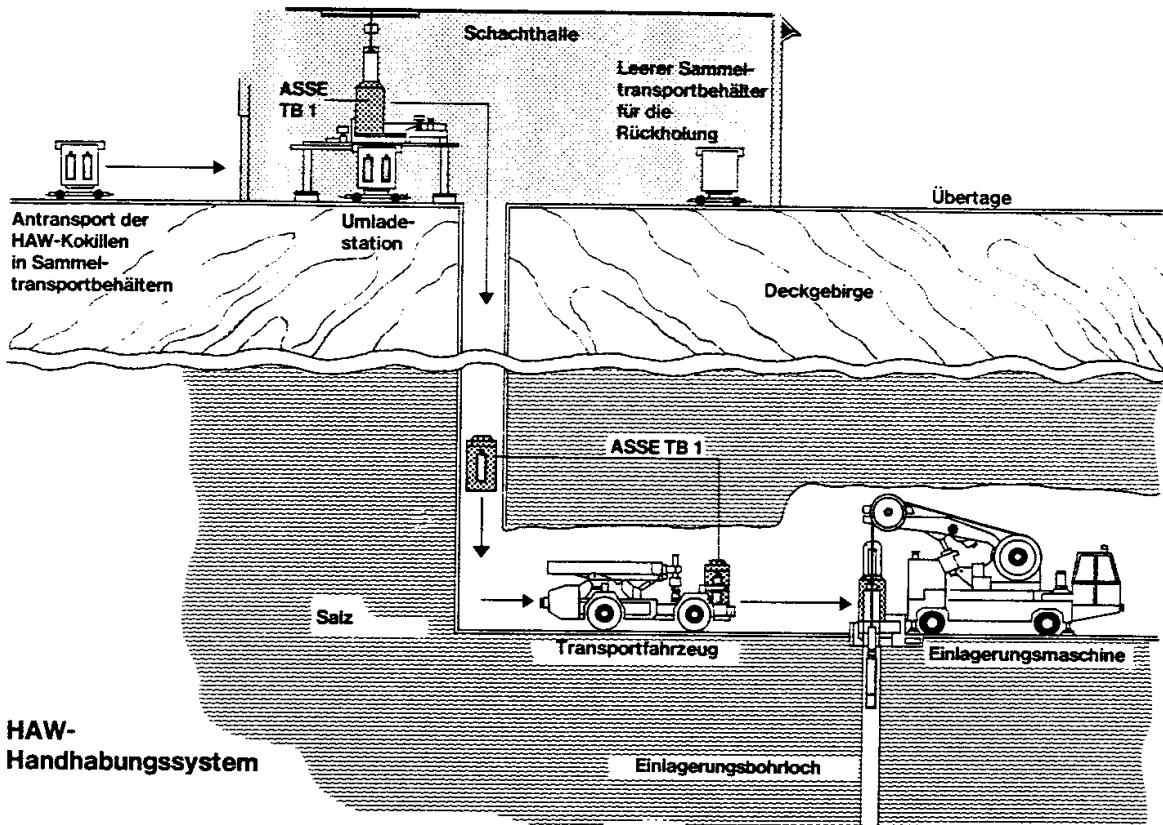


Bild 5: Für den HAW-Versuch entwickelte Einlagerungstechnik für hochaktive Abfälle

Nach der erfolgreichen Erstellung von zwei rund 180 m tiefen Bohrschächten von 3,5 m Durchmesser steht außerdem auch eine Technik zur Verfügung, die prinzipiell die Endlagerung nicht wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle sowie chemotoxischer Abfälle als Massengut in Großbohrlöchern erlaubt.

Grundlegende Arbeiten zur Bohrlochtechnik

Wie erwähnt, sollen hochaktive und wärmeentwickelnde mittelaktive Abfälle übereinander gestapelt in tiefen Bohrlöchern endgelagert werden. Die Abfälle sind in dünnwandigen Abfallbehältern eingeschlossen, deren Festigkeit nicht ausreicht, die Last einer größeren Anzahl darüber gestapelter Behälter aufzunehmen. Es konnte jedoch gezeigt werden, daß durch eine Einbettung der Behälter in Salzgrus die Stapelkräfte weitgehend in das Gebirge abgeleitet werden können und eine Beschädigung der Behälter ausgeschlossen werden kann.

Direkte Endlagerung

Als es im Jahre 1979 aus politischer Sicht sinnvoll erschien, parallel zur Endlagerung nach Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente aus Leichtwasser-Reaktoren auch eine Endlagertechnik für nicht wiederaufgearbeitete Brennelemente zu untersuchen, entstand der FuE-Schwerpunkt „Andere Entsorgungstechniken“. Wesentlicher Bestandteil dieses Programms war die Entwicklung eines technischen Konzeptes für die Direkte Endlagerung sowie ein Sicherheitsvergleich der beiden Entsorgungswege mit und ohne Wiederaufarbeitung. Die Direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente erwies sich dabei als grundsätzlich realisierbar. Daraufhin beschloß die Bundesregierung 1985, diese FuE-Arbeiten weiter zu fördern und die Direkte Endlagerung von Brennelementen aus Leichtwasserreaktoren in Ergänzung zur Endlagerung mit Wiederaufarbeitung weiterentwickeln zu lassen. Sie bekräftigte diesen Beschuß im Jahre 1989.

Das technische Konzept, auf das man sich für die weiteren Forschungsarbeiten verständigte, ist in Bild 6 dargestellt. Es geht von der Lagerung großer selbstabschirmender Behälter (POLLUX-Behälter) in Strecken aus. Auf der Endlagerseite wurden seine Hauptkomponenten in Großversuchen erprobt (Demonstrationsversuche Handhabungs- und Schachtransporttechnik für große und schwere Lasten, Demonstrationsversuch zum Verhalten des Versatzes und des Wirtsgesteins bei der Streckenlagerung). Ferner wurden im Rahmen dieses Programms umfangreiche Planungsarbeiten für eine gemeinsame Einlagerung von Wiederaufarbeitungsabfällen zusammen mit direkt endzulagernden Brennelementen durchgeführt (Systemanalyse Mischkonzept, SAM).

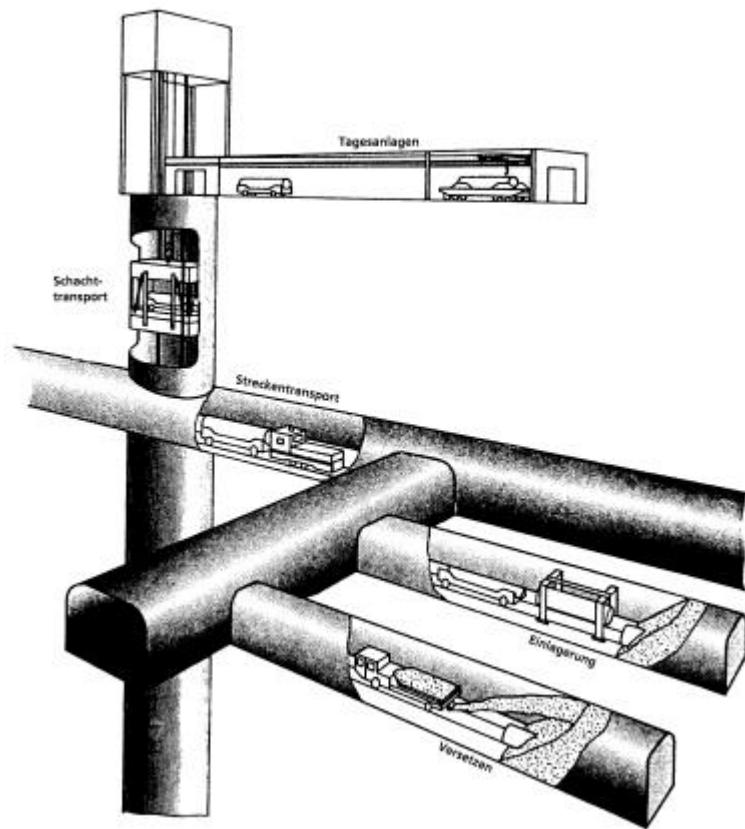


Bild 6: Einlagerungskonzept für die Streckenlagerung von abgebrannten Brennelementen

Im Zusammenhang mit der Entwicklung eines Safeguardskonzeptes für ein Endlager mit abgebrannten Brennelementen spielte die Frage eine Rolle, ob die großen und schweren POLLUX-Behälter aus einem Endlager heimlich zurückgeholt werden können. Eine Studie zur Rückholbarkeit hat gezeigt, daß die technischen Möglichkeiten dazu gegeben sind. Mit modernen Hilfsmitteln lassen sich Schächte und Strecken im Salzgebirge auch noch bei Temperaturen von 100-120°C auffahren. Auf diese Werte aber ist die Umgebungstemperatur an den am längsten eingelagerten Behältern noch innerhalb der Betriebszeit des Endlagers abgeklungen. Damit ist die Rückholung über eigens aufgefahrenen Wege im Prinzip möglich, allerdings mit immensem technischen, zeitlichen und finanziellen Aufwand. Die zur Rückholung erforderliche technische Ausrüstung sowie der Abtransport großer Haufwerksmengen sind durch eine Überwachung der Tagesoberfläche leicht nachzuweisen, so daß eine heimliche Rückholung ausgeschlossen werden kann.

Für abgebrannte Brennelemente aus den deutschen Hochtemperaturreaktoren, für die eine Wiederaufarbeitung nicht vorgesehen ist, wurde ebenfalls die Technik der Direkten Endlagerung entwickelt.

Das Projekt Direkte Endlagerung wurde 1995 erfolgreich beendet. Die Einsatzfähigkeit dieses Entsorgungsweges ist prinzipiell nachgewiesen. Genehmigungsfähige Systeme zur Konditionierung und Handhabung im Endlager sind technisch realisierbar.

5.2.1.2 Verbesserung von Instrumentarien für die Sicherheitsbewertung von Endlagern

Instrumentarien zur Durchführung von Langzeitsicherheitsanalysen

Wesentliche Aufgabe der Forschung zur Langzeitsicherheit von Endlagern für gefährliche Abfälle war zunächst die Entwicklung von Methoden zur Langzeitsicherheitsanalyse. Der umfassende Ansatz dazu war das im Zeitraum 1977-1984 durchgeführte „Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung“ (PSE). Dabei ging es in erster Linie um die Analyse von Störfallereignissen in Einrichtungen der nuklearen Entsorgung einschließlich des Endlagers. Die wesentlichen Elemente dieser Analyse sind die zugrunde liegenden Störfallszenarien (Ereignisabläufe), die Sicherheit des gesamten Endlagersystems bestimmenden physikalischen und chemischen Vorgänge sowie die damit im Zusammenhang stehenden Daten. Die im Rahmen von PSE entwickelten Rechenprogramme sind Bestandteile des heute verfügbaren sicherheitsanalytischen Instrumentariums und bildeten den Ausgangspunkt für nachfolgende Forschungsarbeiten zu dessen Weiterentwicklung

Zu den ersten Anwendungen der in PSE erarbeiteten Methodik zählt die Langzeitsicherheitsanalyse für den Systemvergleich Wiederaufarbeitung-Direkte Endlagerung im Rahmen des FuE-Schwerpunktes Andere Entsorgungstechniken im Jahre 1984. Unter den damals zugrunde gelegten Störfallannahmen zeigten die Rechnungen, daß eine Nuklidfreisetzung weder aus dem Bereich der hochaktiven Wiederaufarbeitungsabfälle noch dem der endgelagerten Brennelemente stattfindet. Die aufgrund der Temperatur erhöhte Plastizität des Salzes führt in beiden Fällen zu einem schnellen Verschließen der Hohlräume im Grubengebäude und verhindert das Vordringen von Lauge in diese Bereiche.

Eine weitere Anwendung der PSE-Methodik zum Nachweis der Langzeitsicherheit eines Endlagers erfolgte 1986 im Zusammenhang mit der Vervollständigung der Planungsunterlagen für das Planfeststellungsverfahren der Schachtanlage Konrad.

Die Vorgehensweise bei den bisher erläuterten Langzeitsicherheitsanalysen war eine deterministische, d.h., Störfallereignisse wurden unterstellt und die Konsequenzen als feste Zahlenwerte errechnet. Die Frage nach der Eintrittswahrscheinlichkeit von Störfallereignissen oder nach der Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer bestimmten Kombination von Eingangsparametern für die Langzeitsicherheitsanalyse wurde nicht gestellt. Wegen der langen Betrachtungszeiträume und des begrenzten Kenntnisstandes bzgl. der zu berücksichtigenden Phänomene sind die Ergebnisse der Analyse mit Unsicherheiten behaftet. Probabilistische Methoden bieten nun die Möglichkeit, Unsicherheiten von Modellparametern und Daten explizit zu berücksichtigen und demzufolge zu einer Rangordnung der Eingangsparameter hinsichtlich ihres Einflusses auf das Analyseergebnis zu gelangen (Sensitivität). Die probabilistische Methode besteht hier in der so genannten Monte-Carlo-Technik, bei der die Berechnung der Konsequenzen eines Störfallszenarios sehr oft wiederholt wird, wobei für jede Berechnung eine bestimmte Kombination der Eingangsparameter gewählt wird.

Langzeitsicherheitsanalysen in Kombination mit dieser probabilistischen Vorgehensweise kamen bei den durch die Kommission der Europäischen Gemeinschaften geförderten Projekten PAGIS (**P**erformance **A**ssessment of **G**eological **I**solation **S**ystems for Radioactive Waste) und PACOMA (**P**erformance **A**ssessment of **C**onfinements for **M**edium-Level and **A**lpha-Contaminated Waste) sowie bei der **S**ystemanalyse **M**ischkonzept (SAM) im Rahmen des FuE-Programms Direkte Endlagerung des BMFT/BMBF zur Anwendung. Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse ergab, daß neben der Konvergenz der Hohlräume im Grubengebäude die strömungsmechanische Größe Permeabilität (Durchlässigkeit) der Endlagerverfüllung und -verschlüsse die größten Auswirkungen auf die berechneten Dosen hat.

Als Rechenprogramme, die den heutigen Stand des Wissens und der Rechentechnik repräsentieren, sind das modular aufgebaute Programmpaket EMOS und das Biosphärenprogramm ECOSYS zu nennen, die aus den Ereignisabläufen in den Teilbereichen

Salzstock, Deckgebirge und Biosphäre die Dosisbelastung des Menschen ermitteln. Die Komplexität einer Langzeitsicherheitsanalyse für Endlager in Salzstöcken mit den wesentlichen Einflußgrößen ist dem Blockschema in Bild 7 zu entnehmen.

Im Verlauf der letzten drei Jahre konnte das Programmsystem EMOS durch die Einbindung neuentwickelter bzw. überarbeiteter Module weiter ertüchtigt werden. Zur Modellierung der Nuklidrückhaltung im Deckgebirge wurde ein neuer Rechencode entwickelt, mit dem sowohl lineare (Kd-Konzept) als auch nichtlineare Sorptionsansätze (Freundlich, Langmuir) verarbeitet werden können.

Ferner wurde ein Modul zur Schadstofffreisetzung aus dem Grubengebäude entwickelt, in dem die Auswirkung der Sorption in versetzten Strecken und Einlagerungsörtern, die Laugenbewegung in teilweise gefüllten Streckenabschnitten und die Gebirgskonvergenz modelliert werden können sowie die Behälterausfälle als Zufallsgrößen beschreibbar sind.

Wesentliche Ergebnisse sind, daß die Sorption im Grubengebäude einen großen Einfluß auf die Freisetzung hat und durch geeignete Zuschlagstoffe maßgeblich beeinflußt werden kann. Der bisherige Konvergenzansatz, der anhand neuer experimenteller Daten überprüft wurde, kann weiter verwendet werden, jedoch sind die Temperaturverläufe, die als Eingangsgrößen für die Berechnung der Konvergenz verwendet werden, sorgfältiger zu wählen. Ferner hat sich gezeigt, daß die Wahl des Behälterausfalls als Zufallsgröße plausibler ist, für die Verwendung einer großen Behälterzahl aber das einfache Modell des gleichförmigen Behälterausfalls als konservativer Ansatz verwendet werden kann.

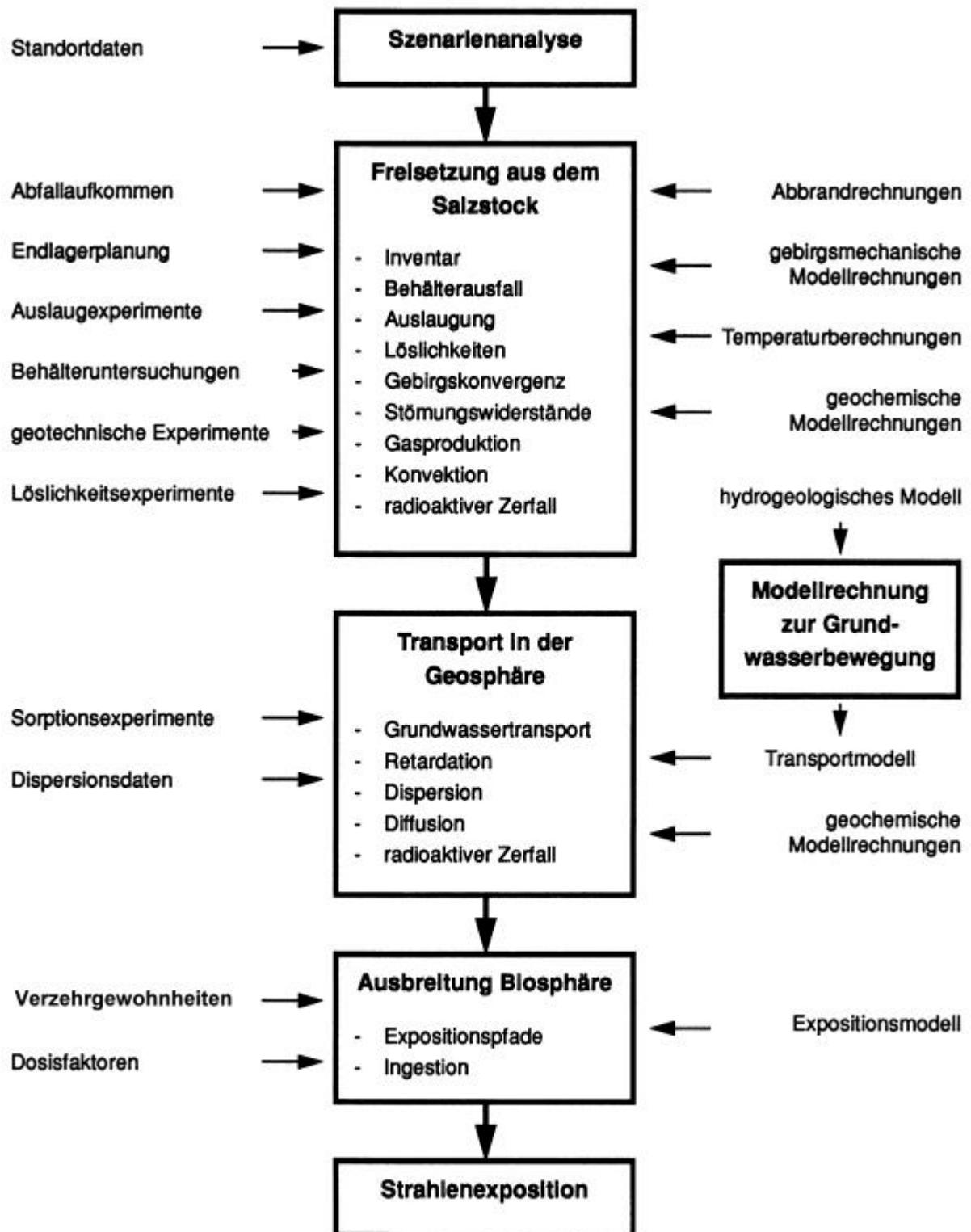


Bild 7: Ablauf einer Langzeitsicherheitsanalyse für Endlager in Salzstöcken /27/

Der internationale Status der Langzeitsicherheitsanalytik wurde 1991 durch das **Radioactive Waste Management Committee** (RWMC) der OECD-NEA in einer gemeinsamen Stellungnahme seiner Mitglieder bewertet /11/. Das RWMC stellt darin fest, daß heute sicherheitsanalytische Methoden verfügbar sind, um potentielle radioaktive Belastungen, die von sorgfältig ausgelegten Endlagern ausgehen können, zu bewerten. Das RWMC stellte außerdem fest, daß die angemessene Anwendung solcher Sicherheitsanalysen zusammen mit ausreichenden Informationen über vorgeschlagene Standorte die technische Grundlage für eine Entscheidung darüber ermöglicht, ob bestimmte Endlager eine ausreichende Sicherheit für die gegenwärtigen und zukünftigen Generationen bieten. Die deutsche Endlagerforschung hat zu diesem Status wesentlich beigetragen.

Flutung des Kalibergwerks Hope

Das Störfallereignis (Szenarium) „Wasser- oder Laugenzutritt in ein Endlager während der Nachbetriebsphase“ kann nicht völlig ausgeschlossen werden. Im Zusammenhang mit der Flutung des stillgelegten Kalisalzbergwerks Hope bot sich die Möglichkeit, für ein solches Szenario Forschungsarbeiten zu geochemischen, geomechanischen, geophysikalischen und geotechnischen Vorgängen maßstabsgetreu durchzuführen.

Für die von 1984 bis 1987 dauernde Flutung wurden 1,7 Millionen Kubikmeter gesättigte Steinsalzlösung verwendet, die aus der Herstellung benachbarter Gasspeicherkavernen stammte. Die Ergebnisse von geochemischen Modellrechnungen stimmten mit den meßtechnisch verfolgten Löse- und Umwandlungsprozessen gut überein. Bei der Flutung bestand außerdem erstmals die Gelegenheit, die Wirksamkeit eines Abschlußbauwerks (Damm) für ein Endlager zu prüfen. Bis zur Einstellung der Messungen wegen Stilllegung des Bergwerks wurde keine Sole in dem hinter dem Bauwerk liegenden Streckenabschnitt detektiert.

Auslaugverhalten von hochradioaktiven Endlagerprodukten

Auslauguntersuchungen unter simulierten Störfallbedingungen in einem Endlager haben gezeigt, daß abgebrannter Kernbrennstoff ein mindestens gleichwertiges Abfallprodukt wie verglaste hochradioaktive Spaltproduktlösungen aus der Wiederaufarbeitung darstellt. Erste Ergebnisse deuten ferner darauf hin, daß beide Abfallprodukte erst nach

mehreren tausend Jahren vollständig aufgelöst sind und daß eine Reihe langlebiger Radionuklide an den Korrosionsprodukten von Behältermaterialien wieder immobilisiert werden. Auch durch spezielle Zuschlagstoffe zu Versatzmaterialien (z.B. Hydroxylapatit) läßt sich eine Immobilisierung von Radionukliden im Endlagernahbereich erzielen.

Aquatische Chemie der Aktiniden

Die grundlegenden Untersuchungen zu physikalisch-chemischen Eigenschaften der Aktiniden erforderten die Entwicklung hochempfindlicher laserspektroskopischer Speziationmethoden. Die Speziation von U(VI) und Am(III) wurde mit der neu entwickelten Laserinduzierten Photoakustischen Spektroskopie, die geochemisch wichtigsten Reaktionen von Cm(III) als Repräsentant für trivale Aktinide mit Hilfe der zeitaufgelösten Laser-Fluoreszenzspektroskopie untersucht. Aus spektroskopischen und Löslichkeitsuntersuchungen sowie aus isopiastischen Messungen konnten thermodynamische Daten für tri-, penta- und hexavalente Aktinide bei 25°C bestimmt werden. Diese wurden zur Parameterisierung des Ion-Wechselwirkungsmodells (Pitzer-Gleichungen) für drei- und fünfwertige Aktinide verwendet. Damit ist für diese Ionen die Prognose homogener und heterogener Gleichgewichte in aquatischen Systemen im gesamten relevanten Konzentrationsbereich möglich.

Nachweis des langfristigen Isolationspotentials von Salzformationen

Mit mineralogisch-petrographischen und geochemischen Untersuchungsmethoden sowie geochemischer Modellierung wird der feste, flüssige und gasförmige Stoffbestand eines Evaporitkörpers (Salzstock) studiert. Die Informationen dienen zur Interpretation sowohl der Genese eines Evaporitkörpers als auch der Prozesse, die im Laufe geologischer Zeit abgelaufen sind und zu Veränderungen geführt haben. Daraus können auch Schlüsse auf die zukünftige Entwicklung gezogen werden.

Durch die Kombination verschiedener experimenteller Methoden und Modelle zur Untersuchung an Lösungseinschlüssen, an den in Salzschichten vorkommenden Gebirgslösungen sowie an den Carnallitgesteinen in Kaliflözen norddeutscher Salzstöcke ist ein Instrumentarium entwickelt worden, das die Wirksamkeit fluider Phasen in Salzformationen während der geologischen Vergangenheit zu beurteilen erlaubt. Es konnte damit

exemplarisch nachgewiesen werden, daß die für Einlagerungen vorgesehenen Teile des Salzstocks Gorleben seit 250 Mio. Jahren gegenüber wäßrigen Lösungen aus dem Deckgebirge und dem Nebengestein isoliert waren. Seit dieser Zeit also hat kein Fluidzutritt zu diesen Bereichen des Salzstocks stattgefunden; das Salz hat damit als natürliche Isolationsbarriere gewirkt. Damit ist ein wesentlicher Beitrag zur Eignungsaussage geleistet und ergeben sich neue Perspektiven für Prognosen zur Langzeitsicherheit von Endlagern in Salzstöcken.

Auch das mechanische Verhalten der Salzformation, d.h. des Steinsalzes und der anderen darin vorkommenden Gesteine (z.B. Carnallitit, Anhydrit, Salzton) spielt für die Voraussage des kurz- und langfristigen Verhaltens des Endlagers eine wichtige Rolle. Der Kenntnisstand hierüber ist in den zurückliegenden Jahren kontinuierlich vertieft worden. Stoffgesetze für stationäres und transientes Kriechen sind auf der Grundlage physikalischer Vorgänge entwickelt worden. Die beobachteten Unterschiede im Kriechverhalten verschiedener Gesteinsproben lassen sich auf unterschiedliche geologische Gegebenheiten zurückführen, wie z.B. Verunreinigungen, Feuchtegehalt etc. Auch konnte gezeigt werden, daß unter endlagerspezifischen Randbedingungen keine Beeinflussung des Kriechverhaltens durch die Strahlung der radioaktiven Abfälle zu erwarten ist.

Gasbildung und Gastransport

Aufgrund unterschiedlicher Bildungsmechanismen (z.B. Korrosion) können in einem Endlager Gase entstehen, die zum einen, genügend Druck vorausgesetzt, zu einer Beeinträchtigung der Integrität des Endlagers führen können und zum anderen Einfluß auf den Radionuklidtransport haben können. Zur Bewertung der Langzeitsicherheit ist deshalb ein Instrumentarium notwendig, das neben der Bestimmung des radioaktiven Quellterms auch den Gastransport zu beschreiben erlaubt. Das programmtechnische Instrumentarium, die Rechencodes GABI und TOUGH II, wurden im Rahmen von gemeinsam durch BMBF und EU geförderten Projekten entwickelt und in Benchmark-Vorhaben getestet. Für ein Endlager im Salz liegen mit diesen Codes Werkzeuge vor, mit denen Gasbildung und Gastransport im Rahmen von Langzeitsicherheitsanalysen modelliert werden können.

Einfluß ionisierender Strahlung

Bei der Einlagerung von verlastem Abfall in Bohrlöchern in Steinsalzformationen ist mit der hohen Gamma-Strahlung eine Strahlenschädigung des umgebenden Salzes verbunden. Sicherheitsüberlegungen gingen bisher davon aus, daß es aufgrund der Radiolyse unter Umständen zu einer Produktion von gasförmigem Chlor und kolloidalem Sodium kommen kann und dadurch eine beträchtliche Energie gespeichert wird, die im Falle eines Laugenzutritts aufgrund der Rekombination spontan freigesetzt werden könnte. Die Ergebnisse internationaler als auch BMBF-gefördeter FuE-Arbeiten haben abschließend gezeigt, daß eine spontane Rückreaktion und damit eine die Sicherheit beeinträchtigende Energiefreisetzung ausgeschlossen werden kann.

Radionuklidmigration im Aquifer

Prozesse wie Sorption, Komplexierung und Redoxreaktionen können den Transport von Radionukliden entscheidend beeinflussen. Die Beschreibbarkeit der Sorption durch Oberflächenkomplexierung wurde durch Nachrechnen von Säulenversuchen mit gekoppelten Transport-Speziations-Codes überprüft. Die Sorption von U(VI), Eu(III) und Cm(III) an Quarz wurde unter Einsatz der zeitaufgelösten Laserfluoreszenz-Spektroskopie untersucht. Untersuchungen zur Wechselwirkung von Radionukliden mit Grundwasserkolloiden erfolgt mit der neu entwickelten Laserinduzierten Breakdown-Detektion. Diese Untersuchungen verbessern die Kenntnis zu den Reaktionsmechanismen der jeweils ablaufenden Einzelprozesse und sollen letztlich eine thermodynamisch fundierte Quantifizierung mobiler Aktiniden- oder Spaltprodukte spezies ermöglichen.

Natürliche Analoga

Die komplexen in der Natur ablaufenden Vorgänge können naturgemäß nur durch sehr vereinfachte Modelle beschrieben und durch Labor- oder Feldexperimente kann die Güte eines Modells nur bis zu einem gewissen Grad getestet werden. Für Prozesse, in denen sowohl räumliche Dimensionen als auch vor allem geologische Zeiträume von Relevanz sind, kann das Studium von natürlichen oder archäologischen Analoga wertvolle Hinweise geben. Natürliche Analoga können bei der Entwicklung von Modellen und

dem Nachweis deren Gültigkeit eingesetzt werden. Ferner können sie dazu beitragen, die Vollständigkeit und Relevanz der wesentlichen Prozesse, des konzeptionellen Modells sowie die Plausibilität und Realitätsnähe der Modellannahmen zu beurteilen.

Aufgrund der Bedeutung, die dem Studium natürlicher Analoga für die Langzeitsicherheitsanalyse zugemessen wird, wurde 1994 der Expertenkreis "Natürliche Analoga" etabliert, um die Verwendung von natürlichen Analoga für ein Endlager im Salinar zu diskutieren und Themen für zukünftige FuE-Arbeiten zu definieren. Als ein wichtiges Ergebnis der Diskussionen wurde zu den Bereichen "Barrierefunktion des Salzgebirges", "Rückhaltung von Radionukliden im Nah- und Fernbereich sowie im Deckgebirge" eine Zusammenstellung von möglichen natürlichen Analoga erarbeitet. Ausgehend von dieser Zusammenstellung sind mittlerweile eine Reihe von FuE-Projekten initiiert worden, die auch international Beachtung gefunden haben.

5.2.1.3 Anpassung und Weiterentwicklung der Kernmaterialüberwachung an die Bedingungen der Direkten Endlagerung

Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Kernmaterialüberwachung (Safeguards) werden sowohl im Rahmen des BMBF-Förderprogramms als auch im Rahmen des deutschen IAEA-Unterstützungsprogramms durchgeführt. Wesentliche Aufgaben sind:

- die Erstellung anlagenspezifischer Überwachungskonzepte,
- die Förderung besserer bzw. neuartiger Systeme und Instrumente mit dem Ziel, durch deren Vernetzung die IAEA-Inspektionen effizienter und effektiver zu machen.

Für alle in Deutschland betriebenen kerntechnischen Anlagen wurden eigene Überwachungskonzepte erstellt. Überwachungskonzepte werden gemeinsam von Betreibern, Wissenschaft sowie den Inspektoraten von IAEA und EURATOM erarbeitet und müssen auf die Belange der Betriebssicherheit und des Strahlenschutzes abgestimmt werden. Das Gebiet der Entsorgung mit den Teilbereichen Zwischenlagerung im Trockenlager, Konditionierung der Brennelemente und Direkte Endlagerung der Endlagerbehälter im Salzstock bildet seit einiger Zeit einen Schwerpunkt dieser Arbeiten.

Für die Direkte Endlagerung von abgebrannten Brennelementen wurde in Zusammenarbeit mit den beiden Inspektoraten von IAEA und EURATOM ein Referenz-Überwachungskonzept erstellt, das eine letzte Messung des Materials bei letztmaliger Zugänglichkeit in der Konditionierungsanlage vorsieht und sich im übrigen auf Methoden der Einschließung und Beobachtung bis an die Ein-/Ausgänge des Endlagerschachtes stützt. Zur Verfolgung einzelner Endlagergebinde wurden zwei Verfahren entwickelt, bei denen der Endlagerbehälter durch die Verifikation einer Schweißnaht identifiziert werden kann. Dabei wurden zwei Prototypen entwickelt, einer nutzt Laserstrahlen, der andere Ultraschallwellen.

Zu den in Deutschland entwickelten Instrumenten der letzten Jahre gehören insbesondere das opto-elektronische VACOSS-Siegel, das Hybrid-K-Kanten-Densitometer zur quantitativen Bestimmung von Plutonium in Lösungen, das Vielkamera-Videoüberwachungssystem MOS, die fälschungssichere Videobildleitung TRTL, die Auswertungsstation für verschiedenartige Videobilder MORE, das digitalisierte Kamera-Modul DCM-14 und das miniaturisierte Vielkanal-Analysator-Modul MCA-166. Eine Datenvernetzung zwischen elektronischem VACOSS-Siegel und MOS-Vielkamerasystem machte es beispielsweise möglich, daß umfangreiche Kernmaterialtransporte mit einem Minimum an Inspektorenpräsenz durchgeführt werden können.

5.2.2 Untertägige Entsorgung chemotoxischer Abfälle

5.2.2.1 Weiterentwicklung von Untertagedeponiekonzeptionen unter Sicherheitsgesichtspunkten

Überlegungen zur Konzipierung untertägiger Deponien für die Ablagerung chemotoxischer Abfälle profitieren vom Vorlauf der FuE-Arbeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle, aber insbesondere auch von Erfahrungen aus dem Betrieb solcher Entsorgungseinrichtungen wie Herfa-Neurode oder von Erkenntnissen aus Pilotprojekten z.B. der Ruhrkohle AG zur Einbringung von Massenabfällen in untertägige Hohlräume /28/.

Das BMBF förderte erstmals FuE-Arbeiten zur Ablagerung chemotoxischer überwachungsbedürftiger Abfälle in untertägigen Deponien im Vorhaben „Experimental-

untersuchungen zur Ablagerung von Abfällen in Salzkavernen" der Niedersächsischen Gesellschaft zur Endablagerung von Sonderabfall mbH (NGS) /29/. Dieses zu 50% geförderte Verbundprojekt wurde unter Beteiligung der Gesellschaft für die Aufbereitung und Verwertung von Reststoffen mbH, der Preussag Metall und der Kavernen Bau- und Betriebs GmbH von 1989 bis 1992 durchgeführt. Im NGS-Vorhaben wird das spezielle Gebiet der Nutzung soltechnisch erstellter Kavernen zur Abfallablagerung behandelt. Dort werden prinzipielle Anforderungen an Deponiekavernen sowie an die zur Ablagerung kommenden Abfälle vorgeschlagen. Die speziellen Probleme der Förder- und Verfülltechnik wurden in Untersuchungen zur Rieselförderung und zur Dickstofftechnik im Rahmen dieses Vorhabens behandelt. Zur Rieselförderung wurden Pilotversuche unter Einsatz von 400 t Versuchsmaterial erfolgreich durchgeführt. Die Ablagerung in Kavernen wurde nach dem Jahr 1991 nicht in die Praxis umgesetzt, da keine zur Verfüllung anstehenden Kavernen bereitstanden und aufgrund der verfügbaren Hohlraumvolumina in stillgelegten Bergwerken die Neusolung von Deponiekavernen aus wirtschaftlichen Überlegungen ausschied.

Weitere Forschungsvorhaben auf dem Gebiet der untertägigen Entsorgung von Abfällen wurden auch ohne Beteiligung des BMFT/BMBF auf Länderebene durchgeführt. Beispielhaft sollen die vom Landesamt für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen (LWA-NRW) veranlaßte und von der Ruhruniversität Bochum und der Technischen Universität Berlin in Zusammenarbeit mit DMT und dem Hygiene-Institut des Ruhrgebietes bearbeiteten „Studie zur Eignung von Steinkohlebergwerken im rechtsrheinischen Ruhrkohlenbezirk zur Untertageverbringung von Abfall- und Reststoffen“ /30/ und das vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kunst (NMWK) geförderte Vorhaben „Entwicklung von Technologien zur Endlagerung chemisch-toxischer Abfälle“ /31/ erwähnt werden, das vom Institut für Tieflagerung der GSF durchgeführt wurde.

Im Rahmen der LWA-Studie sind u.a. Techniken zur Einbringung von Abfällen in Hohlräume des Steinkohlebergbaus untersucht worden. Sie bauen auf denjenigen auf, die sich im bergbautechnischen Einsatz bereits bewährt haben und folglich als ausgereift und beherrschbar angesehen werden können. Hydraulische Förderung in Rohrleitungen wird hinsichtlich der arbeitshygienischen und sicherheitstechnischen Aspekte günstig beurteilt, jedoch weisen auch pneumatische und mechanische Förderverfahren be-

stimmte Vorteile auf. Eine Festlegung auf eine definierte Fördermethode ist im Rahmen dieser Studie nicht erfolgt. Auch im Rahmen des NMWK-Vorhabens sind Aspekte der Förder- und Versatztechnik behandelt worden, da z.B. bei Ablagerung von in großen Mengen anfallenden Abfallarten modifizierte und z.T. noch nicht unter allen betrieblichen Randbedingungen ausgetestete Verfahren eingesetzt werden müssen.

Aufbauend auf diesen, ohne Beteiligung des BMBF durchgeführten Untersuchungen wurden in den Jahren 1991/92 in Form von Vorprojekten und systemanalytisch ausgerichteten Vorhaben offene Fragen identifiziert, die im Zusammenhang mit der untertägigen Entsorgung überwachungsbedürftiger Abfälle noch zu klären sind. Ein Teil der erkannten Probleme wird inzwischen im Rahmen von FuE-Vorhaben bearbeitet (siehe Kapitel 4.3.2). Einige wichtige Teilergebnisse wurden bereits erzielt:

Nahezu alle mengenmäßig bedeutsamen, nach TA Abfall untertägig abzulagernden Abfallarten sowie ausgewählte oberirdisch abzulagernde Abfallarten wurden hinsichtlich ihres chemisch-mineralogischen Stoffbestandes untersucht. Es wurden bedeutende Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung und, daraus resultierend, unterschiedliches Verhalten gleichartig zu deklarierender Abfälle (z.B. Filterstäube und Strahlmittelrückstände) verschiedener Erzeuger unter Ablagerungsbedingungen sowie leicht mobilisierbare Schwermetallanteile in oberirdisch abzulagernden Abfällen gefunden. Diese Ergebnisse lassen es geboten erscheinen, die in der TA Abfall (Anhang C und D) abgegebenen Entsorgungsempfehlungen für eine Reihe von Abfallarten zu revidieren.

Auf dem Gebiet der Einbringungstechnik wurde ein adaptiertes Dickstoff-Förderverfahren entwickelt, das die rohrgebundene Förderung von abfallhaltigen, untertägig sich verfestigenden Mischungen auf der Grundlage bergbaueigener Abfälle und Restlösungen des Salzbergbaus erlaubt. Die Verwendung dieser bergbaueigenen Abfälle und salzhaltigen Lösungen, die ansonsten in die Vorflut geleitet oder verpreßt würden, führt zu einer substantiellen Verminderung der Umweltbelastung. Die Dickstofftechnik erlaubt die Einbindung von schadstoffbelasteten Festmaterialien, die unbehandelt nicht für eine untertägige Entsorgung in Betracht kämen. Exemplarisch wurde die Einsatzmöglichkeit selbst mit ausgesprochen heterogenen Abfällen wie Shredder-Leichtfraktionen nach-

gewiesen, einer Abfallart, die mengenmäßig und von den verfügbaren Entsorgungsoptionen her problematisch ist.

Die Entsorgung flüssiger Abfälle durch Tiefversenkung in Speicherhorizonte wurde in der DDR bis Ende der 80er Jahre praktiziert. Abwässer der kaliproduzierenden und der chemischen Industrie werden in Deutschland noch heute mit dieser Methode entsorgt. Der Stand der untertägigen Entsorgung flüssiger Abfälle wurde recherchiert und dokumentiert und ein fortentwickeltes Bewertungsinstrumentarium zur Beurteilung der Sicherheit solcher Versenkeinrichtungen entwickelt.

Die Bewertung des von untertägigen Entsorgungseinrichtungen ausgehenden, langfristig latenten Gefährdungspotentials erfordert geeignete Bewertungsmaßstäbe und -kriterien auf der Grundlage ökotoxikologischer oder toxikologischer Methoden. Erste Ansätze zur Erarbeitung der Grundlagen für die Beurteilung unterschiedlicher Entsorgungseinrichtungen wurden entwickelt, die auch eine vergleichende Beurteilung des Sicherheitspotentials von oberirdischer und untertägiger Entsorgung ermöglichen sollten.

Die Konzeption von Untertagedeponien im Salinar sieht nach Abschluß der Betriebsphase den qualifizierten Verschluß aller Verbindungen zwischen Ablagerungsbereich und Biosphäre vor. Der Verschluß bzw. Komponenten von Verschlußsystemen müssen als langzeitsichere geotechnische Barrieren ausgeführt werden, die eine dauerhaft trockene Ablagerung der Abfälle sicherstellen. Derartige Bauwerke wurden bisher weder als Streckenverschlüsse noch als Schachtverschlüsse realisiert. Dem Verschluß der Schächte kommt besondere Bedeutung zu, da er die entscheidende Barriere gegen den Zutritt von Wässern aus dem grundwasserführenden Deckgebirgsbereich oder gegen den etwaigen Austritt evtl. kontaminierte Lösungen aus dem Ablagerungsbereich darstellt. Ein Vorprojekt zur Entwicklung von Konzepten und zur Versuchsdefinition für langzeitstabile Schachtverschlüsse wurde ausgearbeitet. Das BMBF beteiligt sich an dem auf diesem Vorprojekt aufbauenden Forschungsvorhaben der Kali und Salz GmbH, in dem im Maßstab 1:1 ein Schachtverschluß konzipiert, geplant, gebaut und über einen Zeitraum von mehreren Jahren experimentell geprüft und untersucht wird, der den genannten Anforderungen genügen soll.

5.2.2.2 Verbesserung von Instrumentarien für die Sicherheitsbewertung von Untertagedeponien

Auch für Untertagedeponien muß ein Langzeitsicherheitsnachweis geführt werden. Die Methode und die Vorgehensweisen sind vergleichbar mit denen, die zum Nachweis der Langzeitsicherheit bei Endlagern für radioaktive Abfälle angewendet werden.

Bereits im erwähnten NMWK-Vorhaben wurden Ansätze zur Sicherheitsbeurteilung unterschiedlicher Endlagersysteme mit der Zielsetzung diskutiert, diejenigen Gebiete zu identifizieren, die durch künftige FuE-Tätigkeit eingehender bearbeitet werden sollten. Im NGS-Vorhaben wurde für das untertägige Deponiesystem „Kaverne im Salzgestein“ eine Vorstudie zum Langzeitsicherheitsnachweis durchgeführt, in der das konzeptionelle Modell für das Deponiesystem erörtert, die zu berücksichtigenden Prozesse und Effekte beschrieben und der Datenbedarf in Form eines Leistungskatalogs festgelegt wurden. Aufbauend auf dieser Vorstudie wurde im Rahmen eines BMBF-geförderten Vorhabens in Form eines speziellen Nahbereichsmodells das Instrumentarium für die Modellierung des Langzeitverhaltens für eine Deponiekaverne entwickelt. Es ermöglicht die Modellierung des Langzeitverhaltens von sich vertikal über Höhen von mehreren 100 Metern erstreckenden Hohlräumen im Salinar unter Berücksichtigung der wesentlichen für die Schadstoffmobilisierung und -ausbreitung relevanten physikalisch-chemischen Prozesse. Dieses Instrumentarium kann im Rahmen der Sicherheitsbeurteilung künftiger Deponiekavernenprojekte oder im Zuge der Erarbeitung von Konzepten zur Verwahrung nicht mehr nutzbarer Speicherkavernen eingesetzt werden.

Aufbauend auf der LWA-Studie werden z.Zt. verbesserte methodische Ansätze und die unter realitätsnahen Bedingungen in Labor- oder in In-situ-Versuchen bestimmten Eingangsdaten zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Entsorgungseinrichtungen in Grubenräumen oder temporär offenen Abbauhohlräumen in nichtsalinaren Wirtsgesteinen erarbeitet. Diese unter Mitwirkung der Betreiber von Entsorgungsbergwerken durchgeführten Untersuchungen sind insbesondere auf die Bereitstellung einer breiten, gut abgesicherten Datenbasis zu hydrologischen und chemisch-mineralogischen Prozessen im Lauf der künftigen Entwicklung der Einrichtungen ausgerichtet. Rechenmo-

delle und Codes aus dem Bereich der Endlagerforschung werden auf die Eignung zur Modellierung der speziellen Verhältnisse der Entsorgungsanlagen geprüft und für spezielle Erfordernisse angepaßt oder weiter entwickelt. Bis zum Jahr 1998 sollen mit diesem weiterentwickelten Instrumentarium exemplarische Betrachtungen zum Verhalten zweier unterschiedlicher, nichtsalinarer Entsorgungsoptionen für chemotoxische Abfälle realisiert werden.

Überlegungen zur Einrichtung von Untertagedeponien oder untertägigen Verwertungsanlagen konzentrieren sich ausnahmslos auf die Nachnutzung von Feldesteilen in Gewinnungsbetrieben oder stillgelegter Salzbergwerke. Sowohl für Salzstöcke oder -kissen als auch für flachgelagerte Salinarvorkommen in den neuen Bundesländern laufen Untersuchungen an ausgewählten Standorten. Eine wichtige Fragestellung ist die Beurteilung der unter abbautechnischen und bergwirtschaftlichen Aspekten ausgeführten Grubenraumgestaltung hinsichtlich ihres langfristigen geomechanischen Verhaltens. Unterstützt durch BMBF-Fördermittel wurde auf der Basis von Laboruntersuchungen und abgestimmt auf die spezifischen geologischen Ausgangsbedingungen der flachen Lagerung ein Stoffgesetz entwickelt, welches das Verhalten von Steinsalz in den Bereichen des transienten und des linearen Kriechens differenziert beschreibt. Dieses kombinierte Stoffgesetz wurde in Rechenprogramme implementiert, und die Programme wurden anhand von In-situ-Messungen validiert. Mit den Programmen können geomechanische Prozesse mit nicht-konstantem Belastungsverlauf, wie das Auflaufen des Gebirges auf Verschlußbauwerke, realitätsnah berechnet und kritische Zustände von Trag- und Barriereelementen eines Grubengebäudes (Pfeiler, geologische Schutzzschichten) präziser als bisher prognostiziert werden.

Für den Fall der nicht bestimmungsgemäßen Entwicklung von Untertagedeponien kann ein Zutritt von Lösungen zu den abgelagerten Abfällen nicht ausgeschlossen werden. Daher wird intensiv an der geochemischen Modellierung der bei Wechselwirkung von Abfällen mit Fluiden ablaufenden Prozesse gearbeitet. Für geochemische Rechenprogramme, mit denen die Zusammensetzung der in Ablagerungsbereichen entstehenden hochsalinaren Lösungen und die langfristige Entwicklung des chemischen Milieus prognostiziert werden kann, wurde die Datenbasis für umweltrelevante Schwermetalle (Cd, Hg, Pb, Zn) geschaffen. Dazu mußte deren Lösungsverhalten in Salzlösungen erfaßt und

mußten Parameter zur Berechnung von Löslichkeiten bzw. Löslichkeitsgrenzen als Eingangsdaten für numerische geochemische Rechenprogramme ermittelt werden. Weitere Untersuchungsschwerpunkte im geochemischen Bereich sind Arbeiten zur Komplexierung und Sorption von umweltgefährdenden Elementen unter den spezifischen Verhältnissen der untertägigen Entsorgungseinrichtungen, die auf die Bereitstellung abgesicherter Daten für die Rechenprogramme zur Sicherheitsbewertung ausgerichtet sind.

5.3 Nutzung der bisherigen Ergebnisse

Der Beitrag der bisher vom BMBF geförderten Forschung und Entwicklung zum Stand von Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet der Entsorgung gefährlicher Abfälle stellt sich zusammengefaßt wie folgt dar:

- Steinsalz ist für die Endlagerung aller Arten radioaktiver, insbesondere wärmeentwickelnder Abfälle sowie für die untertägige Ablagerung von chemotoxischen Abfällen geeignet.
- Im ehemaligen Eisenerzbergwerk Konrad können nicht wärmeerzeugende radioaktive - auch α -haltige - Abfälle eingelagert werden.
- Wie Untersuchungen im schweizerischen Felslabor Grimsel zeigen, ist auch Granit eine geeignete Endlagerformation.
- Deutschland besitzt Vorkommen kristalliner Gesteine, die als Wirtsformation für potentielle Endlager bzw. Untertagedeponien untersuchungswürdig sind.
- Methoden und Techniken zur Erkundung von Standorten in verschiedenen geologischen Formationen (z.B. auch Granit) sind entwickelt worden.
- Die Voraussetzungen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für die technische und sicherheitsmäßige Auslegung von Endlagern und Untertagedeponien liegen vor.

- Der Entwicklungsstand des Instrumentariums zur Führung der notwendigen Langzeitsicherheitsnachweise ist weit fortgeschritten.
- Handhabungs- und Einlagerungstechniken für gefährliche Abfälle sind verfügbar und erprobt.
- Die endlagerspezifischen Arbeiten zur Direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente sowie die von der Industrie übernommene Entwicklung der Konditionierungstechnik und der Behälter sind abgeschlossen.
- Technische Einrichtungen und Systeme zum sicheren Abschluß von Bohrlöchern, Strecken und Schächten in Endlagern sind konzipiert.

Auf der Grundlage des heutigen Standes von Wissenschaft und Technik, zu dem die Ergebnisse der vom BMBF geförderten Forschung wesentlich beigetragen haben,

- befindet sich das geplante Endlager für nicht wärmeerzeugende radioaktive Abfälle am Standort „Konrad“ im Planfeststellungsverfahren,
- werden gegenwärtig Planungen für ein Endlager für alle Arten radioaktiver Abfälle in Salz incl. der entsprechenden Langzeitsicherheitsanalysen durchgeführt,
- wird der Salzstock Gorleben hinsichtlich seiner Eignung zur Aufnahme aller Arten radioaktiver Abfälle erkundet,
- konnte das Artikelgesetz /21/ am 28. Juli 1994 verkündet werden. Damit steht mit der Direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente ein zur Entsorgung mit Wiederaufarbeitung paralleler Entsorgungsweg zur Verfügung,
- werden die Untertagedeponien Herfa-Neurode, Heilbronn und Zielitz für chemotoxische Abfälle betrieben und weitere Anlagen zur untertägigen Entsorgung projektiert,
- wurden Beiträge zur Erstellung der TA Abfall auf der Basis von Erfahrungen bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle geliefert. Die TA Abfall bildet seitdem die Grundlage für die untertägige Ablagerung von chemotoxischen Abfällen im Salzgestein.

Weitere Forschung und Entwicklung ist jedoch notwendig, um den vorhandenen Wissensstand zu vertiefen, insbesondere um

- die Grundlagen für eine rechtzeitige Bereitstellung von sicheren Endlagern für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle stetig weiter zu verbessern,
- die bislang gegebenen Möglichkeiten der Charakterisierung Untertagedeponie-relevanter Abfälle hinsichtlich ihres Langzeitverhaltens fortzuentwickeln sowie die Einrichtung von Untertagedeponien zu unterstützen,
- Sicherheitsnachweise für Endlager und Untertagedeponien so umfassend, genau und nachprüfbar wie möglich führen zu können,
- wissenschaftliche und technische Konzepte zur untertägigen Entsorgung gefährlicher Abfälle weiterzuentwickeln.

6 REALISIERUNG DER FuE-VORSCHLÄGE ZUR ENTSORGUNG GEFÄHRLICHER ABFÄLLE IN TIEFEN GEOLOGISCHEN FORMATIONEN

6.1 Fachliche Prioritäten

Die Durchführung eines Forschungsprogramms wird nicht ausschließlich von fachlichen Prioritäten bestimmt. Zeitliche Erfordernisse, die Verfügbarkeit finanzieller oder personeller Ressourcen und auch politische Aufgaben, wie z.B. beim Aufbau einer Forschungslandschaft in den neuen Bundesländern nach der Wiedervereinigung, beeinflussen die Umsetzung zusätzlich. Es ist deshalb nicht realistisch zu erwarten, daß eine Programmdurchführung durch eine fachliche Aufgabenrangfolge vorab festzulegen ist.

Trotzdem ist es sinnvoll, die fachlichen Prioritäten eines Programms ausführlich darzulegen. Das verdeutlicht den programmatischen Ansatz und kann in Einzelfällen auch eine Entscheidungshilfe bei der Auftrags- bzw. Zuwendungsvergabe sein.

Der fachliche Rang einer Aufgabe im Förderkonzept „Entsorgung“ wird grundsätzlich bestimmt durch

1. ihre Bedeutung für die Definition oder Konkretisierung des Programms oder von Programm-Bereichen,
2. ihren Bezug zu den geltenden Entsorgungskonzepten,
3. den Grad ihrer Sicherheitsrelevanz.

Innerhalb dieser Kriterienbereiche ist der jeweils bereits vorliegende Wissensstand mitbestimmend, d.h. ein hoher Wissensstand vermindert die relative Dringlichkeit der Aufgabenbearbeitung.

Davon ausgehend ergibt sich für das vorliegende Förderkonzept, daß am Beginn der Rangordnung die Abfallcharakterisierung steht, die die Voraussetzung für notwendige Problemdefinitionen ist. Ein Bedarf dafür liegt aber vornehmlich bei den chemotoxischen Abfällen vor, und zwar wegen der Vielfalt der zu berücksichtigenden chemischen Formen. Die radioaktiven Abfälle sind seit langer Zeit gut charakterisiert. Die wenigen hier noch offenen Fragen sind in ihrer Bedeutung nachrangig.

In der nächsten Linie haben Untersuchungen zum Salz als der im deutschen Entsorgungskonzept vorgesehenen bzw. in der TA Abfall empfohlenen Wirtsformation Vorrang vor Arbeiten zu anderen Formationen wie Granit oder Ton.

Schließlich besitzen, angesichts einer mehrhundertjährigen Erfahrung im Bergbau, Aufgaben der Langzeitsicherheit derendlagerung im Salz eine höhere Bedeutung als die übrigen Forschungsaufgaben der Endlagersicherheit.

Die Langzeitsicherheitsaufgaben teilen sich in Fragen der technischen Realisierung eines langzeitsicheren Endlagers und der Schaffung des Instrumentariums für die zu führenden Sicherheitsnachweise. Beide Aufgabenfelder sind miteinander verknüpft: Die technische Auslegung bestimmt das notwendige Instrumentarium der Sicherheitsbewertung, und die damit gewonnenen Rechenergebnisse wirken auf die Auslegung zurück. Der Vorrang liegt hier bei der Fortentwicklung des Instrumentariums zur letztendlich eine Genehmigungsentscheidung bestimmenden Sicherheitsbewertung.

Vor diesem Hintergrund und angesichts des Standes des Wissens und der Technik, der sich einerseits - wie bereits erwähnt - aus mehreren hundert Jahren Bergbauerfahrung und zum anderen aus mittlerweile über dreißig Jahren Forschung zur Endlagerung radioaktiver Abfälle ergibt, werden die in Abschnitt 4.1.3 aufgelisteten fachlichen Bereiche des Programms folgendermaßen eingeordnet.

Rang 1:

- Szenarienweiterentwicklung (B1),
- Weiterentwicklung des vorliegenden Standes von mathematisch-physikalischen und chemischen Modellen, technisch-wissenschaftlichen Daten und Rechencodes (B6),
- Validierung dieser Verfahren (B7),
- Vorgänge im Endlagernahfeld (mit dem Gewicht auf der weiteren Aufklärung geochemischer Prozesse) (B3) und
- Verhalten von geotechnischen und geologischen Barrieren (B4 und B5).

Rang 2:

- Methoden und technische Verfahren zur Charakterisierung von geologischen Formationen (A4),
- Konzeptfindung für die Auslegung geotechnischer Barrieren (A5) und
- Analyse des Verhaltens der Wirtsgesteininformation (B2).

Rang 3:

- Weiterentwicklung der fachlichen Grundlagen für Sicherheitsanforderungen (A2),
- Weiterentwicklung von Handhabungs-, Einlagerungs- und Überwachungstechniken (A3) sowie
- Untersuchungen zur Abtrennung langlebiger radioaktiver Stoffe vom übrigen Abfall und deren Umwandlung in kurzlebige Radionuklide (A6).

Hierbei ist zu beachten, daß fließende Übergänge zwischen den Rangfolgen existieren können.

6.2 Zeitrahmen und Kosten

Das vorliegende Förderkonzept bezieht sich auf die Jahre 1997 bis 2001. Seine Ergebnisse stehen Behörden, Gutachtern und der Wirtschaft zur Unterstützung bei der Erledigung ihrer Aufgaben zur Verfügung. Das Förderkonzept wird jedoch unabhängig vom aktuellen Bedarf der Nutzergruppen in bezug auf konkrete Einzelfragestellungen durchgeführt. Insofern besteht keine Bindung an äußere Zeitpläne.

Trotzdem ist es sinnvoll, die Konzeptdurchführung, wo möglich, so zu gestalten, daß die für die Entsorgung Verantwortlichen von den Ergebnissen weitgehend profitieren können. Das gilt insbesondere mit Blick auf die Planung und Errichtung von Entsorgungsanlagen. Dabei steht auf dem Gebiet der radioaktiven Abfälle das geplante Endlager am Standort Gorleben im Vordergrund. Der Beginn des Planfeststellungsverfahrens, zu dem alle wesentlichen Kenntnisse vorliegen müssen, ist für 2005 vorgesehen.

Auch auf dem Gebiet der chemotoxischen Abfälle werden auf Initiative der zuständigen Landesbehörden oder Bergwerksbetreiber Planungen für die Errichtung von Untertage-

deponien, deren Betrieb oder den sicheren Verschluß von Hohlräumen in Angriff genommen. Auch dafür werden in der überwiegenden Zahl der Fälle FuE-Ergebnisse benötigt. Feste Zeitpläne liegen dazu aber auch hier nicht vor.

Es bleibt somit festzuhalten, daß angesichts der generellen Bedarfssituation auf Seiten der für die Entsorgung Verantwortlichen und bei Vorliegen der haushaltsmäßigen Randbedingungen auf Seiten des BMBF eine mit Blick auf die vorteilhafte Ergebnisnutzung zeitlich passende fachliche Durchführung des Förderkonzeptes zu erwarten ist.

In dem genannten Zeitraum stehen dem BMBF für die Programmdurchführung nach heutigem Finanzplanungsstand die in der folgenden Tabelle aufgeführten Mittel zur Verfügung. Diesen Mitteln hinzuzurechnen sind die institutionellen Aufwendungen von FZJ und FZK, die in Abstimmung mit dem Fachreferat im BMBF eingesetzt werden. Sie sind mit ca. 20 bis 25 Mio.DM pro Jahr zu veranschlagen. Zu diesen Ressourcen treten in begrenztem Umfang Mittel aus den Programmen der EU und der sonstigen internationalen Zusammenarbeit.

	Mio.DM				
	1997	1998	1999	2000	2001
Radioaktive Abfälle	17,9	18,1	19,5	22,4	22,6
Chemotoxische Abfälle	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3
Summe	27,2	27,4	28,8	31,7	31,9

Vorgesehene Finanzmittel (Projektförderung) 1997 und Haushaltsplanung 1998 ff (Stand Juli 1997) für die Endlagerung radioaktiver Abfälle und die untertägige Entsorgung chemotoxischer Abfälle

6.3 Durchführung der FuE-Arbeiten

Im Bereich der Förderung des BMBF wird die Bearbeitung der fachlichen Aufgaben durch den beliehenen Projektträger Entsorgung (PTE) unterstützt, der im Forschungszentrum Karlsruhe angesiedelt ist. Seine Aufgabe besteht im wesentlichen in

- der Mitgestaltung des Förderkonzeptes
- der Akquisition von Forschungsanträgen zur Durchführung des Förderkonzeptes
- der fachlich-administrativen Begleitung der laufenden Arbeiten
- der Mitwirkung bei der Bewertung der Ergebnisse
- der Information aller interessierten Stellen über den erzielten Wissensfortschritt.

Die Durchführung des Programms erfolgt unter Beratung insbesondere durch die späteren Nutzer der Ergebnisse und Experten. Dazu wurde Anfang 1991 beim BMBF der Sachverständigenkreis Endlagerung eingerichtet. Er berät den BMBF bei der fachlichen Gestaltung und Durchführung des Programms. Dazu zählen insbesondere die Fortschreibung des Konzeptes, die Prioritätensetzung und die Bewertung der erzielten Ergebnisse.

Förderprinzip ist grundsätzlich, bei der Vergabe der Mittel marktwirtschaftlich zu verfahren, d.h. die Auftragnehmer bzw. Zuwendungsempfänger in erster Linie nach der fachlichen Kompetenz und nach Kostengesichtspunkten auszuwählen. Das gilt auch für die Großforschungseinrichtungen, die nach der aktuellen Zentrenpolitik des BMBF bei der Drittmitteleinwerbung zu Vollkosten anzubieten und sich dem Markt zu stellen haben. Dazu ist ihnen zur Projektmittelakquisition über die institutionelle Finanzierung hinaus ein früher nicht vorhandener Freiraum verfügbar gemacht worden.

Die Finanzmittel des Bundes sind im Einzelplan 30 des Bundeshaushaltsplans, und zwar im Kapitel 30 07 (Energie- und Umweltforschung und -technik) veranschlagt. Die Finanzmittel werden, ausgehend von entsprechenden Anträgen, bei überwiegendem oder ausschließlichen Bundesinteresse aufgrund von Verträgen (Auftragsfinanzierung), sonst auf Grund von Bewilligungen (Zuwendungen mit Eigen- oder Drittmitteleinsatz) bereitgestellt.

Im Prinzip hat jede Forschungsstelle, die die fachlichen und administrativen Voraussetzungen bietet, die Möglichkeit, bei der Durchführung des Programms mitzuwirken. In der Praxis hat sich im Laufe von über dreißig Jahren Endlagerforschung ein relativ fester Kreis von Forschungsstellen bei der Projektförderung herausgebildet, dessen Kern die BGR, die Großforschungseinrichtungen FZJ und - in geringem Umfang - FZK sowie der Fachbereich Endlagersicherheitsforschung der GRS bilden. Um diesen Kern gruppieren sich Universitäten sowie andere Forschungseinrichtungen.

Dieser Kreis ist seit 1991 durch Forschungsstellen aus den neuen Bundesländern gewachsen, vorzugsweise Universitäten (z.B. TU BAF), Ingenieurbüros sowie mittlere und kleine Unternehmen der Wirtschaft.

7 UMSETZUNG VON FuE-ERGEBNISSEN UND BERICHTSWESEN

Die Ergebnisse der FuE-Vorhaben tragen dazu bei, daß

- Endlager- und Untertagedeponiekonzepte sicherheitstechnisch entwickelt bzw. weiterentwickelt oder optimiert werden können,
- eine Bewertung der Eignung von Endlager- bzw. Untertagedeponiesystemen und -standorten durch eine wissenschaftlich abgesicherte und öffentlich akzeptierte Vorgehensweise vorgenommen werden kann,
- sowohl für die Errichtung wie auch für den Betrieb von Endlagern bzw. Untertagedeponien geeignete rechtliche Grundlagen zur Verfügung stehen bzw. weiterentwickelt werden können.

Somit wird der Bund bei der Wahrnehmung seiner im gesetzlichen und politischen Rahmen festgelegten Aufgaben wesentlich unterstützt. Den zuständigen Behörden werden die Planung und Genehmigung sowie der Industrie der Bau und Betrieb von Endlagern bzw. Untertagedeponien entsprechend den im Einzelfall festzulegenden Regeln und Erkenntnissen ermöglicht.

Die Ergebnisse stellen somit wichtige Ergänzungen dar, um das Konzept der Bundesregierung zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in die Praxis umzusetzen. Dafür ist nach dem Atomgesetz das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) zuständig, welches sich dazu - ebenfalls nach dem Atomgesetz - eines Dritten bedient, nämlich der Deutschen Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE). BfS und DBE sind somit die wichtigste Zielgruppe für die Anwendung der Ergebnisse des FuE-Programms für den Bereich der Endlagerung radioaktiver Abfälle.

Die im April 1991 in Kraft getretene Technische Anleitung (TA) Abfall zum Abfallgesetz sieht die Ablagerung chemotoxischer Abfälle in Untertagedeponien im Salzgestein vor. Die im Oktober 1994 mit Zustimmung des Länderausschusses Bergbau freigegebenen Technischen Regeln für den Einsatz von bergbau fremden Abfällen als Versatz behandeln den Einsatz von - z.T. chemotoxischen - Abfällen im Rahmen bergbaulicher Versatzmaßnahmen. Auch hier werden durch die Ergebnisse der FuE-Vorhaben wichti-

ge Grundlagen zur Fortschreibung und Konkretisierung der in den gesetzlichen Regelwerken formulierten Anforderung geschaffen.

Neben der nationalen Bedeutung dieser FuE-Ergebnisse für BMU und BMBF sowie für atom-, abfall- und bergrechtliche Genehmigungsbehörden der Bundesländer sind internationale Gremien, wie die Kommission der Europäischen Union (KEU), die Nuclear Energy Agency (NEA) der OECD sowie die Internationale Atomenergiebehörde (IAEA) als Interessenten zu nennen.

Die Ergebnisse der Forschungsvorhaben werden auf Tagungen, Seminaren und Workshops präsentiert und mit Fachkollegen diskutiert. Sie werden somit zusätzlich abgesichert und stehen allen interessierten Stellen zur Verfügung. Die Ergebnisse werden in Form von Berichten dokumentiert. Wichtige Zwischen- und Abschlußberichte werden den späteren Nutzern sowie einer Reihe von Fachleuten zugeleitet. Zur Information aller Interessenten über geförderte Vorhaben und den Stand der Bearbeitung gibt der Projektträger halbjährliche Projektfortschrittsberichte heraus. Diese werden einem festen Verteilerkreis - bestehend aus Betreibern, Genehmigungsbehörden, Gutachtern und Beratungsgremien, Ministerien, Forschungsstellen etc. - zugesandt. Darüber hinaus können sonstige Interessenten die Projektfortschrittsberichte kostenlos beim Projektträger anfordern.

Neben den Projektfortschrittsberichten gibt der Projektträger in regelmäßigen Abständen Berichtslisten heraus, in denen neu erschienene Berichte über Ergebnisse von Arbeiten zur Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen aufgelistet sind. Diese Berichtslisten informieren zum einen über Zwischen- und Abschlußberichte von Vorhaben, die direkt vom BMBF gefördert werden bzw. wurden. Zum anderen sind auch Berichte der Großforschungseinrichtungen FZJ und FZK über anderweitig geförderte Vorhaben zur gleichen Thematik aufgeführt. Neben Berichten aus der Bundesrepublik Deutschland werden in diese Listen auch Berichte der EU, der OECD-NEA und der IAEO sowie ausgewählte Berichte aus Frankreich, Kanada, Schweden, der Schweiz und USA aufgenommen.

8 INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT

Die geordnete Entsorgung gefährlicher Abfälle und damit ihre umweltgerechte Entfernung aus der Biosphäre ist eine Aufgabe, der sich alle Nationen stellen müssen, vor allem die Industrienationen und Schwellenländer, die Hauptabfallverursacher sind.

Der Wunsch nach internationaler Kooperation liegt daher nahe. Sie wird auch auf dem Gebiet der untertägigen Entsorgung seit langer Zeit, insbesondere im Rahmen der Europäischen Gemeinschaften, der OECD-NEA und der IAEA, aber auch bilateral mit zahlreichen Ländern gepflegt.

Ihr Ziel ist

- Erfahrungen und Informationen über Entsorgungsfragen sowie Forschungserkenntnisse auszutauschen und so die nationale Wissensbasis zu verbreitern,
- die Annäherung unterschiedlicher Entsorgungskonzepte und Sicherheitsanforderungen zu fördern,
- zur Harmonisierung von Gesetzen und Vorschriften beizutragen und
- finanzielle Ressourcen durch gemeinsame Projekte wirtschaftlicher zu nutzen.

8.1 Europäische Union (EU)

In Anbetracht der großen Bedeutung, welche die nach dem Subsidiaritätsprinzip konzipierten Forschungsprogramme der Europäischen Union inzwischen für die nationalen deutschen Forschungsprogramme haben, werden sie im folgenden im Hinblick auf die Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen näher beschrieben.

Das gegenwärtig laufende 4. Rahmenprogramm (1994 - 1998) wurde 1994 mit einem Budget von 13,1 Mrd. ECU verabschiedet. Mit diesem Rahmenprogramm sollen alle Forschungsaktivitäten der Gemeinschaft in eine rechtlich und organisatorisch einheitliche Form gebracht werden. So enthält es spezifische Programme in 15 Technologiebereichen und 5 Programme für übergreifende Aktivitäten.

Alle nuklearen Arbeiten sind im spezifischen Programm „Sicherheit bei der Kernspaltung“ zusammengefaßt, das mit einem Finanzvolumen von 160 Mio. ECU ausgestattet ist. Das Programm umfaßt Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsprojekte in den folgenden vier Themenbereichen:

- (1) Erforschung neuer Sicherheits- und Abfallentsorgungskonzepte
(7 Mio. ECU)
- (2) Reaktorsicherheit bei schweren Unfällen (50 Mio. ECU)
- (3) Entsorgung und Endlagerung radioaktiver Abfälle sowie Stillegung
(45 MECU)
- (4) Auswirkungen der Strahlenexposition auf Mensch und Umwelt
(45 Mio. ECU)
- (5) Aufarbeitung von Vorfällen der Vergangenheit (13 Mio. ECU)

Die Arbeiten zur Aktinidenabtrennung und Transmutation werden als Teilprogramm im Themenbereich (1) geführt.

Eines der Hauptziele des Themas Entsorgung und Endlagerung radioaktiver Abfälle sowie Stillegung ist es, zu einer weiteren Integration der Bemühungen der Gemeinschaft und der Mitgliedstaaten beizutragen und die technische Grundlage und ein gemeinsames Verständnis der wissenschaftlichen Fragen der Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle zu entwickeln. Dies gilt besonders für abgebrannten Kernbrennstoff und ver-glasten hochaktiven Abfall (HAW). Das bessere Verständnis der Prozesse und Vorgänge in einem tiefen geologischen Endlager und seinem Umfeld sowie des möglichen Transports radioaktiver Substanzen in die Biosphäre soll zu einer besseren Einschätzung der Effizienz des Multibarrierenkonzepts und der Sicherheit des Endlagersystems insgesamt beitragen.

Die für das vorliegende Förderkonzept „Forschung und Entwicklung zur Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen“ wichtigen Themen aus dem Bereich der nuklearen Entsorgung (Themenbereich 3) finden sich in drei Unterprogrammen wieder. Im Unterprogramm 1 „Sicherheitsaspekte der Endlagerung“ wird ein Konsens zu möglichen Konzepten und zu methodischen Ansätzen zur Einschätzung der Langzeitsicherheit der Entsorgungssysteme entwickelt, werden Sicherheitsaspekte der Rückho-

lung von Abfällen geprüft und die Sicherheit der Endlagerung von abgebrannten Brennlementen eingeschätzt. Im Rahmen des Unterprogramm 2 „Unterirdische Forschungslabors“ werden die Durchführbarkeit von Endlagerkonzepten für verglaste hochaktive Abfälle, langlebige Abfälle und abgebrannte Brennlemente untersucht und nachgewiesen sowie Daten zum Verhalten der Komponenten von Endlagerbarrieren bereitgestellt. Arbeiten im Unterprogramm 3 „Forschung zu grundlegenden Phänomenen“ tragen zum besseren Verständnis der Phänomene bei, welche die Freisetzung von Radionukliden aus den Abfallgebinden und ihre Migration durch die verschiedenen aufeinanderfolgenden Barrieren bis in die zugängliche Umwelt bestimmen. Zur Beschreibung dieser Phänomene werden Modelle erarbeitet und die Validierung der Modelle durchgeführt.

Die Beteiligung deutscher Institutionen bzw. Experten an EU-Vorhaben zur Entsorgung und Endlagerung radioaktiver Abfälle sowie Stilllegung im Rahmen des 4. Rahmenprogramms ist erfolgreich. An ca. 60 % der bewilligten Vorhaben sind deutsche Institutionen beteiligt. Bei ca. 25 % aller bewilligten Vorhaben stellt Deutschland den Koordinator.

Auf dem Gebiet der Entsorgung von chemotoxischen Abfällen (hazardous waste) erfolgt die Förderung von FuE-Vorhaben durch die Europäische Kommission vor allem innerhalb der beiden spezifischen Programme „Industrielle- und Werkstofftechnologien“ bzw. „Umwelt und Klima“ des 4. Rahmenprogramms. Die wenigen Vorhaben sind in der Mehrzahl auf Fragen der Abfallbehandlung im Sinne einer Immobilisierung umweltgefährdender Bestandteile oder der Abfallwiederverwendung (recycling) ausgerichtet. Mit den konkreten Problemstellungen der Entsorgung in der Form der Ablagerung (disposal) gefährlicher Abfälle setzten sich bisher nur einige Vorhaben auseinander, deren Ansatzpunkt meist eine vergleichende Darstellung oder Beurteilung von Ablagerungstechniken für radioaktive und nichtradioaktive Abfälle war. Ein auf die speziellen Probleme der dauerhaften und langzeitsicheren oberirdischen oder untertägigen Ablagerung chemotoxischer Abfälle ausgerichtetes Programm oder eine in dieser Richtung gehende Forschungsinitiative existiert im Rahmen der EU nicht.

Zur Zeit wird das 5. Rahmenprogramm (1998 - 2002) vorbereitet, das nach derzeitiger Planung einen Finanzumfang von 14 Mrd. ECU haben wird. Auch im Rahmen dieses

Programms werden wieder FuE-Arbeiten zur Reaktorsicherheit und nuklearen Entsorgung gefördert. Detailprogramme liegen jedoch noch nicht vor.

8.2 OECD-NEA

Die OECD-NEA widmet sich im Bereich der Entsorgung insbesondere der weiteren Entwicklung von Methoden zum Langzeitsicherheitsnachweis für Endlager sowie der Bewertung von Endlagerkonzepten und Forschungsprogrammen der Mitgliedsländer. Dazu bietet sie den 23 Mitgliedstaaten ein Forum zum Austausch von Meinungen und Informationen und führt gemeinsam mit ihnen Studien zu wichtigen Fragen dieser Sicherheitsbewertungen durch. Sie regt darüber hinaus internationale FuE-Arbeiten auf diesem Gebiet an und koordiniert entsprechende Aktivitäten der Mitgliedsländer. Im Bereich der radioaktiven Abfälle wurde hierzu das RWMC (**R**adioactive **W**aste **M**anagement **C**ommittee) eingerichtet. Wichtige dauernde Arbeitsgruppen sind die SEDE (**S**ite **E**valuation and **D**esign of **E**xperiments for **R**adioactive **W**aste **D**isposal) und PAAG (**P**erformance **A**sessment **A**dvisory **G**roup)-Gruppe, die u.a. auch internationale Test- und Vergleichsrechnungen organisieren (Intraval, Geoval). Das jährliche Budget der OECD-NEA für die Aufgaben des Radioactive Waste Management betrug im Jahre 1996 4,63 Mio.FF, umgerechnet ca. 1,55 Mio.DM.

8.3 IAEO

Die Internationale Atomenergie Organisation (IAEO) in Wien beschäftigt sich im Bereich der Entsorgung entsprechend ihrem Auftrag nur mit radioaktiven Abfällen. Sie führt - mit Ausnahme der Meeresforschung durch das IAEO-Marine Environment Laboratory in Monaco - keine eigenen theoretischen oder experimentellen Forschungsarbeiten aus, sondern beschränkt sich auf die Sammlung und Verbreitung von Informationen, das Erarbeiten von internationalen Standards, Richtlinien und technischen Empfehlungen sowie auf die Unterstützung von Mitgliedsländern - vor allem der Schwellen- und Entwicklungsländer - bei der Aufstellung und Durchführung nationaler Entsorgungsprogramme.

Darüber hinaus veranstaltet sie, z.T. zusammen mit anderen internationalen Organisationen, Symposien und Seminare auf dem Gebiet der Entsorgung und Endlagerung.

In allen Fragen der Entsorgung wird die IAEA durch das "Waste Safety Standards Advisory Committee - (WASSAC)" beraten.

In den drei Unterprogrammen "Radioactive Waste Disposal", "Radiological and Environmental Aspects of Waste Management" und "Waste Management Planning and Infrastructure" werden die Entsorgungsfragen spezifischer angegangen mit Schwerpunkt auf der Erstellung von technischen Dokumenten und der Erarbeitung allgemeiner Sicherheits- und Qualitätssicherungsstandards. Schwerpunkte sind hierbei bisher Standortbewertung, Errichtung und Betrieb von Endlagern, vor allem für oberflächennahe Endlager von leicht- und mittelaktivem Abfall. Im Bereich der Endlagerung hochaktiver Abfälle will sich die IAEA zukünftig verstärkt der Frage der natürlichen Analoga sowie der Validierung geohydrologischer Transportmodelle widmen. Für das Gesamtgebiet der Entsorgung erarbeitet die IAEA unter dem Namen RADWASS ein umfassendes System von Standards, Kriterien und Richtlinien, das auch die Endlagerung in geologischen Formationen umfaßt.

Darüber hinaus unterhält die IAEA auf dem Gebiet der Entsorgung ein Beratungsprogramm für die Entwicklungsländer (WAMAP) und führt internationale technische Begutachtungs-Missionen zu nationalen Entsorgungsprogrammen durch (WATRP). Außerdem initiierte die IAEA das International Arctic Seas Assessment Project (IASAP), in dessen Rahmen die Notwendigkeit und Möglichkeit von Bergungsmaßnahmen für in die Arktische See eingebrachte radioaktive Abfälle untersucht wird.

Der IAEA stehen für die Arbeiten auf dem Gebiet des waste management jährlich ca. 13 Mio.DM (Soll 1996) zur Verfügung, die durch die Beiträge der Mitgliedstaaten aufgebracht werden. Darüber hinaus wird die Arbeit der IAEA von Deutschland durch die Entsendung von Experten in technische Arbeitskreise und die ständige Mitgliedschaft in den programmatischen Beratungsgremien unterstützt.

8.4 Bilaterale Zusammenarbeit

8.4.1 Deutsch-französische Zusammenarbeit

In Frankreich sind die hauptsächlichen Träger der Endlagerforschung die Forschungseinrichtungen des CEA, die ANDRA und auf der geologischen Seite das BRGM. Zu diesen Institutionen bestehen auf dem Gebiet der Endlagerforschung schon länger Kontakte deutscher Forschungseinrichtungen im Rahmen von gemeinsamen EU-Projekten und bei der Bearbeitung von Einzelthemen.

Obwohl die verfolgten Konzepte zur Realisierung von Endlagern für radioaktive Abfälle auf deutscher und französischer Seite unterschiedlich sind sowohl hinsichtlich des Konzeptes als auch des jeweils erzielten Fortschritts, bestand doch auf vielen Teilgebieten der beiderseitige Wunsch nach einer Intensivierung dieser Kooperation. Dies führte im Mai 1991 zur Unterzeichnung einer Vereinbarung zwischen BMBF und CEA/ANDRA über „Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Behandlung und Endlagerung von radioaktiven Abfällen und abgebrannten Brennelementen sowie auf dem Gebiet der Stilllegung von Anlagen“. 1994 unterzeichneten das GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit (jetzt GRS-Abteilung Endlagersicherheitsforschung), das Forschungszentrum Jülich und das Forschungszentrum Karlsruhe bilaterale Zusammenarbeitsverträge mit CEA und ANDRA. In diesen Verträgen, die die Durchführung des 1991 geschlossenen Rahmenabkommens regeln, werden die FuE-Anstrengungen von Forschungseinrichtungen und der Industrie auf deutscher und französischer Seite zusammengeführt, indem wissenschaftlich-technische Themen gemeinsam bearbeitet werden. Die gemeinsam interessierenden Arbeitsfelder der Endlagerforschung werden durch ein auf deutscher und französischer Seite eingerichtetes wissenschaftliches Sekretariat detailliert und mit gemeinsamen Einzelprojekten ausgefüllt. Auf BMBF/CEA/ANDRA-Ebene wird die deutsch-französische Zusammenarbeit durch ein Koordinierungskomitee betreut. Im Mai 1996 wurde der Zusammenarbeitsvertrag um weitere 5 Jahre verlängert.

Die Formen der Zusammenarbeit reichen vom einfachen Informationsaustausch über gemeinsame Workshops bis hin zu gegenseitiger Beteiligung von Wissenschaftlern an Projekten der jeweils anderen Seite. Auf dem Gebiet der Stilllegung orientiert sich die

Zusammenarbeit an konkreten Stilllegungsprojekten in beiden Ländern und zielt auf einen Erfahrungsaustausch hin.

Die FuE-Arbeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle im Rahmen dieser Kooperation haben folgende Schwerpunkte:

- Methoden zur Standortwahl und -charakterisierung,
- Endlagerkonzepte und Auslegung von Endlagern,
- Bewertung der Nachbetriebsphase von geologischen Endlagern,
- gegenseitige Nutzung von Untertagelabors,
- Charakterisierung des Verhaltens von HAW und abgebrannten Brennelementen unter verschiedenen Endlagerbedingungen und
- Methoden der Sicherheitsbeurteilung.

Im Bereich der Aktinidenabtrennung und Transmutation wird ebenfalls eng zusammen-gearbeitet. Hervorzuheben sind hier besonders die gemeinsamen Untersuchungen zur Vernichtung von Plutonium und langlebigen minoren Aktiniden in schnellen Reaktoren im Rahmen des CAPRA-Programms.

Viele der im BMBF/CEA/ANDRA-Vertrag aufgeführten Themen werden in gemeinsa-men EU-Projekten innerhalb des 4. Rahmenprogramms bearbeitet.

8.4.2 Deutsch-amerikanische Zusammenarbeit

Die deutsch-amerikanische Zusammenarbeit stützte sich bis Mitte 1996 auf die Vereinbarung zwischen dem BMBF und der Atomenergiekommission der USA (jetzt US-DOE) über den technischen Austausch und die Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Behandlung und Beseitigung von radioaktiven Abfällen, die erstmals im Dezember 1974 in Kraft trat und zuletzt bis zum 30. Juni 1996 verlängert wurde. Eine weitere Verlängerung war vorbereitet, aber bis Ende 1996 noch nicht unterzeichnet, weil sich die Verhandlungen mit der amerikanischen Seiten über die Grundsatzfragen geistiges Eigentum und Patente zeitaufwendig gestalteten. Unter der o.g. Rahmenvereinbarung wurden 1981 und 1984 Projektabkommen zwischen dem BMBF und US-DOE abgeschlossen, die eine Zusammenarbeit im Laugenmigrationstest (Titel: HAW-

Zusammenarbeit im Laugenmigrationstest (Titel: HAW-Simulationsversuch mit Co-60-Quellen in der Schachtanlage Asse) und bei der HAW-Versuchseinlagerung (Titel: Versuchseinlagerung hochradioaktiver Abfallsimulate in der Schachtanlage Asse) regelten.

Der Laugenmigrationstest wurde erfolgreich abgeschlossen. Im Rahmen des zweiten Projektabkommens wurden in den USA 30 Versuchsquellen für die HAW-Versuchseinlagerung hergestellt, die jedoch aufgrund der Einstellung des Projektes zum 31.12.1992 nicht zum Einsatz kamen.

Mit Beendigung des HAW-Projektes waren und sind vorerst - abgesehen von Informationsaustausch u.ä. - keine weiteren gemeinsamen Experimente geplant.

Die Themen der jetzigen Zusammenarbeit zwischen BMBF und US-DOE sind

1. Spaltprodukt- sowie Aktinidenabtrennung und -umwandlung
2. Dekontaminierung und Beseitigung kerntechnischer Anlagen
3. Beschreibung geologischer Formationen
4. Endlagerung in geologischen Formationen
5. Umwelt- und Sicherheitsüberlegungen
6. Akzeptanzprobleme in der Öffentlichkeit.

Darüber hinaus ist das Institut für Nukleare Entsorgungstechnik des FZK Partner in einem Kooperationsvertrag mit dem Center for Radioactive Waste Management der Universität von New Mexico, der sich auf experimentelle und theoretische Arbeiten zum Verhalten von radioaktiven Abfällen unter Endlagerbedingungen und zum Transport von Radionukliden in geologischen Formationen erstreckt.

Die Zusammenarbeit wird seit Februar 1998 auf Basis eines umfassenderen Vertrages des BMBF mit dem US DOE fortgeführt, der sich auf Energieforschung insgesamt bezieht. Die darin festzulegenden Themen der nuklearen Entsorgung werden denen in der ausgelaufenen Vereinbarung entsprechen.

8.4.3 Deutsch-spanische Zusammenarbeit

Verantwortliche Institution für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle in Spanien ist die ENRESA (Empresa Nacional de Residuos Radioactivos).

Die wissenschaftlich-technische Kooperation auf dem Gebiet der Endlagerung findet innerhalb eines Rahmens statt, der durch ein generelles BMFT/BMBF-Abkommen zur wissenschaftlichen und technischen Kooperation von 1970 vorgegeben wird. Darüber hinaus wurde 1988 ein "Agreement for a Cooperation on the Sector Disposal of Radioactive Wastes" zwischen ENRESA und DBE (Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe) abgeschlossen. Diese Übereinkunft definiert die wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Salz. Sie wird von der DBE koordiniert.

Auf der Grundlage des DBE/ENRESA-Vertrages wurde 1989 ein "Performance-Contract" zwischen ENRESA und GSF geschlossen. Dieser Vertrag beinhaltete die technische Beratung der ENRESA durch die GSF im Hinblick auf die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Salzformationen. ENRESA war darüber hinaus innerhalb des 3. Rahmenprogramms der EU an den wissenschaftlichen Arbeiten zur Versuchseinlagerung hochradioaktiver Abfallsimulate im Salzbergwerk Asse (HAW-Projekt) beteiligt. Das Untersuchungsziel bestand dabei im wesentlichen in der Analyse der Steinsalztextur unter Mitwirkung einer flüssigen Phase und der durch den kombinierten Effekt der Gammastrahlung und der Wärme hervorgerufenen Veränderungen des Steinsalzgitters. Die Zusammenarbeit zwischen ENRESA und GSF (jetzt GRS Abteilung Endlagersicherheitsforschung) konzentriert sich im 4. Rahmenprogramm der EU in erster Linie auf das FEBEX-Experiment, in dessen Rahmen im schweizerischen Felslabor Grimsel ein Großversuch zur Streckenlagerung in Granitgestein durchgeführt wird. Außerdem ist die ENRESA sowie die Universitat Politecnica de Catalunya (UPC) an dem von der Europäischen Kommission geförderten Projekt „Backfill and Material Behaviour in Underground Salt Repositories“ (BAMBUS) beteiligt.

FZK schloß mit ENRESA im Jahr 1990 einen Zusammenarbeitsvertrag auf dem Gebiet der Direkten Endlagerung abgebrannten Brennstoffs ab. Diese Zusammenarbeit erstreckt sich auf die drei Bereiche der Korrosion von Behältermaterialien, der Auslauung von UO_2 -Brennstoff sowie der Systemanalyse des Gesamtsystems, Konditionie-

rung, Zwischenlagerung undendlagerung. Im Bereich der Behälterkorrosion und der Brennstoffauslaugung gab es innerhalb des 3. Rahmenprogramms und gibt es innerhalb des 4. Rahmenprogramms eine Reihe gemeinsamer EU-Projekte.

8.4.4 Deutsch-niederländische Zusammenarbeit

Kernpunkt der niederländischen Entsorgungs-FuE war das OPLA-Programm, ein unter dem Dach des niederländischen ILONA-Programms (Integrated National Research Programme - Nuclear Waste) angesiedeltes Forschungsprogramm zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzgestein. Das OPLA-Programm wurde Ende 1993 abgeschlossen. In dem sich anschließenden Programm standen die Rückholbarkeit endgelagerter Abfälle sowie die Konsequenzen einer Transmutation von langlebigen Radionukliden auf die geologische Endlagerung im Mittelpunkt.

Grundlage der deutsch-niederländischen Zusammenarbeit ist eine Vereinbarung des BMBF mit dem niederländischen Wirtschaftsministerium vom Jahre 1985 zur bilateralen FuE-Kooperation auf dem Gebiet der Entsorgung. Hauptträger der Zusammenarbeit waren auf niederländischer Seite das ECN (Energieonderzoek Centrum Nederland) und auf deutscher Seite die GSF (jetzt GRS Abteilung Endlagersicherheitsforschung).

Im Rahmen dieser Kooperation beteiligte sich ECN an den Projekten zur Versuchseinlagerung hochradioaktiver Abfallsimulate (HAW-Projekt) und den Arbeiten zur Entwicklung von Bohrlochverschlüssen (DEBORA - Development of Borehole Seals for High-Level Radioactive Waste), die beide von der EU im 3. Rahmenprogramm unterstützt wurden. Bei der geplanten Versuchseinlagerung im HAW-Projekt leistete die niederländische Seite erhebliche Beiträge zur Instrumentierung und Meßwerterfassung. Im begleitenden Laborprogramm lagen die Schwerpunkte auf dem Gebiet der Wechselwirkung von Strahlung mit dem Endlagermedium Steinsalz. Ferner wurden gemeinsame Untersuchungen zur Herstellung und zum geotechnischen Verhalten tiefer Bohrlöcher durchgeführt.

Auch im EU-Programm „Sicherheit bei der Kernspaltung“ (1994-1998) gibt es gemeinsame deutsch-niederländische FuE-Vorhaben. Zu nennen ist hier vor allem das

BAMBUS-Projekt, in dessen Rahmen das Verhalten von Salzgrus bei der Bohrloch- und Streckenlagerung untersucht wird.

8.4.5 Deutsch-schweizerische Zusammenarbeit

Gegenstand der seit 1982 bestehenden Kooperation ist die Durchführung gemeinsamer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur sicheren Endlagerung radioaktiver Abfälle im Granit im schweizerischen Felslabor Grimsel.

Auf der Basis der deutsch-schweizerischen Übereinkunft von 1982 wurde 1983 zwischen der NAGRA (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) auf schweizerischer Seite sowie der BGR und der GSF auf deutscher Seite die „Vereinbarung über die deutsch-schweizerische Zusammenarbeit im Felslabor Grimsel“ geschlossen. Die bestehende Vereinbarung umfaßt einen Zeitraum bis Mitte 1997. Eine Verlängerung der Vereinbarung und der bereits existierenden internationalen Kooperation wird vorbereitet.

Das Ziel der deutschen Beteiligung an den wissenschaftlich-technischen Untersuchungen im Felslabor Grimsel der NAGRA ist, zusätzlich zu den Untersuchungen im Salz sowie den schon abgeschlossenen FuE-Arbeiten im Sediment vorsorglich auch Kenntnisse über die Eignung weiterer geologischer Formationen zu erhalten bzw. zu vertiefen. Die gemeinsam im Felslabor Grimsel durchgeföhrten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten betreffen (1) die Auswahl, Erprobung und ggf. Weiterentwicklung von geeigneten Meßverfahren und Auswertemethoden (2), die Charakterisierung des Einlagerungsmediums Granit durch Erfassung endlagerrelevanter Daten sowie (3) die Umsetzung chemischer, physikalischer und geologischer Prozesse in mathematische Modelle und im Hinblick auf die langzeitliche Beurteilung eines Endlagers für radioaktive Abfälle im Kristallin. Im Rahmen der gemeinsamen Untersuchungen im Grimsel-Felslabor wurden bzw. werden Feldversuche durchgeführt, die sich im wesentlichen auf die Bearbeitung von geophysikalischen, hydrogeologischen, felshydraulischen, felsmechanischen und geochemischen Fragestellungen konzentrieren. Die Schwerpunkte der zukünftigen Kooperation werden auf dem Gebiet des Zweiphasenflusses, der Charakterisierung grö-

ßerer Gesteinspartien sowie geochemischer Untersuchungen unter Verwendung von Radiotraceren liegen.

Darüber hinaus hat das Institut für Nukleare Entsorgungstechnik des FZK einen Kooperationsvertrag mit dem Paul Scherrer Institut (PSI) abgeschlossen, der sich auf experimentelle und theoretische Arbeiten zum Verhalten von radioaktiven Abfällen unter Endlagerbedingungen und zum Transport von Radionukliden in geologischen Formationen erstreckt.

8.4.6 Deutsch-schwedische Zusammenarbeit

Seit 1990 errichtet die schwedische Gesellschaft SKB auf der Insel Äspö in der Nähe des Kernkraftwerks Oskarshamn ein untertägiges Forschungslabor in einer Hartgesteinssformation, die weitgehend dem Wirtsgestein an einem später zu errichtenden Endlager entspricht. Im HRL (Hard Rock Laboratory) wird mit internationaler Beteiligung ein breit angelegtes Forschungsprogramm durchgeführt, in dem (1) unterschiedliche Untersuchungsmethoden zur Charakterisierung des Gebirges vor dem Hintergrund ihrer Anwendbarkeit auf endlagerbezogene Problemstellungen in ihrer Qualität überprüft, (2) Möglichkeiten zur Anpassung der technischen Barrieren eines Endlagers an die lokalen Gesteinseigenschaften demonstriert sowie (3) Daten gesammelt und Kenntnisse vervollständigt werden, die für die mögliche Ausbreitung von Radionukliden und damit für die Sicherheit eines Endlagers in Granit und für das Vertrauen in die Qualität des Sicherheitsnachweises von Bedeutung sind.

Die 1995 zwischen BMBF und SKB unterzeichnete Vereinbarung stellt sicher, daß deutsche Wissenschaftler an den internationalen Programmen mitarbeiten und die erworbenen Kenntnisse über andere mögliche Endlagerformationen vertiefen. Ein wesentlicher Schwerpunkt der Kooperation ist dabei der internationale Erfahrungsaustausch zur Endlagerung in Hartgestein. An den Untersuchungen in Aspö sind BGR, GRS, FZK (INE) und die TU Clausthal beteiligt. Die Arbeiten sind konzentriert auf Untersuchungen zu den geochemischen Wechselwirkungen zwischen Radionukliden, Wirtsgestein und Grundwasser und die Erprobung sowie Weiterentwicklung der im Felslabor Grimsel entwickelten Meßmethoden unter den im HRL Äspö vorliegenden Bedingungen.

9 LITERATUR

- /1/ Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz), in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl I S. 1565), geändert durch Artikel 4 des Gesetzes des Einsatzes von Steinkohle in der Verstromung und zur Änderung des Atomgesetzes und des Stromeinspeisungsgesetzes vom 19. Juli 1994, BGBl. I S. 1618
- /2/ Gesetz über die Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz - KrW-/AbfG) vom 27. September 1994, BGBl. I, S. 2705
- /3/ Verordnung zur Bestimmung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen (Bestimmungsverordnung besonders überwachungsbedürftige Abfälle BestbüAbfV) vom 10. September 1996, BGBl. I, S. 1366
- /4/ Brennecke, P., Hollmann, A., Radioaktive Abfälle, Anfall, Bestand 1995 und zukünftiges Aufkommen, Atomwirtschaft - Atomtechnik XLII/6 (1997), S. 401
- /5/ Hollmann, A., Anfall radioaktiver Abfälle in Deutschland - Abfallerhebung für das Jahr 1992, BfS-ET-20/94 (1994)
- /6/ Informationskreis Kernenergie, Kernenergie Grafik 8/96 (1996)
- /7/ Statistisches Bundesamt, Pressemitteilung vom 25. Januar 1996
- /8/ Gesamtfassung der 2. allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall) Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen vom 12. März 1991, GMBI. Nr. 8, (1991), S. 137
- /9/ Statistisches Bundesamt, Abfallbeseitigung im Produzierenden Gewerbe und in Krankenhäusern 1990, Fachserie 19, Reihe 1.2 (1994)
- /10/ Nuclear Energy Agency, Review of Safety Assessment Methods, OECD/NEA Paris (1991)
- /11/ Nuclear Energy Agency, Can Long-term Safety be evaluated?, OECD-IAEA Paris (1991)
- /12/ International Maritime Organization, Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter, London (1972)
- /13/ Fürer, G., Sonderabfälle untertage einlagern, Umwelt 19/9 (1989), S. 454
- /14/ Wasserhaushaltsgesetz (WHG). Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushaltes, 12. November 1996, BGBl. I S. 1695

- /15/ 4. Programm Energieforschung und Energietechnologie, Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, Bonn 1996
- /16/ Umweltforschungsprogramm der Bundesregierung, Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, Bonn 1997
- /17/ Bundesimmissionsschutzgesetz (BlmSchG). Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnlich Vorgänge, vom 15. März 1974 (BGBl. I S. 721, 1193) i.d.F. vom 14. Mai 1990 (BGBl. I S. 880) zul. geänd. am 18. April 1997 (BGBl. I S. 805)
- /18/ Bundesberggesetz (BBergG) vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310)
- /19/ Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen als Versatz unter Tage - Technische Regeln für den Einsatz von bergbau fremden Reststoffen/Abfällen als Versatz, Länderausschuss Bergbau AK Bergbauliche Hohlräume und Abfallentsorgung i.d.F. vom 11. Oktober 1994
- /20/ BT-Drucksache: „Umweltpolitik. Bericht der Bundesregierung zur Entsorgung der Kernkraftwerke und anderer kerntechnischer Einrichtungen“, Deutscher Bundestag, 11. Wahlperiode. Drucksache 11/1632 v. 13.01.1988, Sachgebiet 75
- /21/ Gesetz zur Sicherung des Einsatzes von Steinkohle in der Verstromung und zur Änderung des Atomgesetzes und des Strom einspeisungsgesetzes vom 19. Juli 1994, BGBl. I S. 1618
- /22/ National Academy of Sciences - National Research Council: „The Disposal of Radioactive Waste on Land“, Publication 519, Washington D.C. (1957)
- /23/ Deutsche Atomkommission: „Zweites Atomprogramm für die Bundesrepublik Deutschland 1963-1967“, Bonn (1963)
- /24/ Martini, H.J.: „Bericht zur Frage der Möglichkeiten der Endlagerung radioaktiver Abfälle im Untergrund“, unveröffentlichter Bericht der Bundesanstalt für Bodenforschung, Hannover (1963)
- /25/ Kockel, F., Krull, P.: Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Salzformationen, BGR-Bericht Arch.-Nr. 111089
- /26/ Bräuer, V., Reh, M., Schulz, P., Schuster, P., Sprado, K.-H.: Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsa-linaren Formationen, BGR-Bericht Arch.-Nr. 112642
- /27/ Storck, R.: Private Mitteilung. GSF - Institut für Tieflagerung (1993)

- /28/ Plate, M.: „Verwertung und Ablagerung von Reststoffen und Abfällen in den Bergwerken der Ruhrkohle AG”, Glückauf 127, 19/20 (1991), S. 911
- /29/ Niedersächsische Gesellschaft zur Endablagerung von Sonderabfall mbH (NGS): „Experimentaluntersuchungen zur Ablagerung von Abfällen in Salzkarvern. Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse”, NGS (1992)
- /30/ Landesamt für Wasser und Abfall NRW (Hrsg.): „Studie zur Eignung von Steinkohlebergwerken im rechtsrheinischen Ruhrkohlenbezirk zur Untertageverbringung von Abfall- und Reststoffen - Kurzfassung -”, LWA- Materialien Nr. 2/91 (1991)
- /31/ Brasser, T. et al.: „Die untertägige Ablagerung von Abfällen im Salzgestein” (Abschlußbericht zum Vorhaben „Entwicklung von Technologien zur Endlagerung chemisch-toxischer Abfälle”), GSF-Bericht 6/91 (1991)

10 TABELLE DER VERWENDETEN ABKÜRZUNGEN

AbfG	Abfallgesetz
ANDRA	Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs
AtG	Atomgesetz
AVR	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor, Hochtemperaturreaktor
BAF	Technische Universität Bergakademie Freiberg (Sachsen)
BBergG	Bundesberggesetz
BestBüAbV	Bestimmungsverordnung besonders überwachungsbedürftiger Abfälle
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
BlmSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BMBau	Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau
BMBF	Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (seit 12/1994)
BMFT	Bundesministerium für Forschung und Technologie (bis 11/1994)
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft
BRGM	Bureau de Recherche Géologique et Minière
BSH	Bundesamt für Seeschiffahrt und Hydrographie
CAPRA	Consommation accrue de Pu dans les Rapides, Pu-Vernichtung in schnellen Reaktoren
CDC	Control Data GmbH, Frankfurt/Hamburg
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique
COST	Coopération Européenne dans le domaine de la recherche scientifique et technique
DBE	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe, Peine
DBI	Deutsches Brennstoffinstitut, Freiberg
DEBORA	Development of Borehole Seals for High-Level Radioactive Waste
DMT	Deutsche Montan Technologie, Bochum
EG	Europäische Gemeinschaften
ENRESA	Empresa Nacional de Residuos Radioactivos
EU	Europäische Union
EWI	Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln

FEBEX	Full Scale Engineered Barriers Experiment in Crystalline Host Rock in Grimsel
FhG	Fraunhofer Gesellschaft
FLG	Felslabor Grimsel
FU	Freie Universität
FuE	Forschung und Entwicklung
FZJ	Forschungszentrum Jülich (seit 1997), siehe KFA
FZK	Forschungszentrum Karlsruhe (seit 1995), siehe KfK
FZR	Forschungszentrum Rossendorf
GEISHA	Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein
GFE	Großforschungseinrichtung
GNB	Gesellschaft für Nuklear-Behälter, Essen
GNS	Gesellschaft für Nuklear-Service, Essen
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Köln/Garching/Braunschweig
GSF	Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Neuherberg
HAW	high-active waste (hochaktiver Abfall)
HRL	Hard Rock Laboratory, Äspö, Schweden
HTR	Hochtemperaturreaktor
IAEO	International Atomic Energy Organisation
IASAP	International Arctic Seas Assessment Project
IFAG	Institut für Angewandte Geodäsie, Außenstelle Potsdam
IfE	Ingenieur- und Servicegesellschaft für Energie und Umwelt GmbH, Leipzig/Dresden
IfG	Institut für Gebirgsmechanik, Leipzig
IfT	Institut für Tieflagerung der GSF (bis 1995)
IMF	Institut für Materialforschung des FZK
INE	Institut für Nukleare Entsorgungstechnik des FZK
INR	Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik des FZK
IRS	Institut für Reaktorsicherheit des FZK
ISR	Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik des FZJ
ITC	Institut für Technische Chemie des FZK
IZFP-EADQ	Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren, Außenstelle für Akustische Diagnostik und Qualitätssicherung, Dresden
KBB	Kavernen Bau- und Betriebs-GmbH

KFA	Kernforschungsanlage Jülich (bis 1996), siehe FZJ
KfK	Kernforschungszentrum Karlsruhe (bis 1994), siehe FZK
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
K-UTEC	Kali Umwelttechnik, Sondershausen
LAW	low-active waste (schwachaktiver Abfall)
LWA-NRW	Landesanstalt für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen
LWR	Leichtwasserreaktor
MAW	medium-active waste (mittelaktiver Abfall)
MAW(Q)	wärmeerzeugender mittelaktiver Abfall
MTR	Materialtestreaktor
NAGRA	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
NGS	Niedersächsische Gesellschaft zur Endablagerung von Sonderabfall
NMWK	Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kunst
NUKEM	NUKEM, Alzenau
OECD-NEA	Organisation for Economic Cooperation and Development - Nuclear Energy Agency
PAAG	Performance Assessment Advisory Group
PACOMA	Performance Assessment of Confinements for Medium-Level and a-Contaminated Waste
PAGIS	Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste
PKS	Produktkontrollstelle des BfS im ISR des FZJ
PSE	Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung
PSF	Projekt Nukleare Sicherheitsforschung des FZK
PSI	Paul Scherrer Institut, Villingen, Schweiz
PTB	Physikalisch Technische Bundesanstalt, Braunschweig
PTE	Projektträger des BMBF für Entsorgung im FZK
RADWASS	Radioactive Waste Safety Standards
RWMC	Radioactive Waste Management Committee
SAM	Systemanalyse Mischkonzept
SEDE	Site Evaluation and Design of Experiments for Radioactive Waste Disposal
SKB	Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company
SKE	Sachverständigenkreis „Endlagerung“
TA	Technische Anleitung

THTR	Thorium Hochtemperaturreaktor
TN	Transnuklear
TRU	Transurane
TU	Technische Universität
UNI	Universität
US-DOE	Department of Energy, USA
UTD	Untertagedeponie
VIV	Vorausleistungsverordnung zum AtG
WAMAP	Waste Management Advisory Programme
WASSAC	Waste Safety Standards Advisory Committee
WATRP	Waste Management Assessment and Technical Review Programme
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

Anhang 1 zum Förderkonzept Entsorgung (1997 - 2001)

Liste der zukünftigen Forschungsthemen

Die folgenden Listen enthalten die wichtigsten FuE-Themen, deren Durchführung zur Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik vor allem auf dem Gebiet der Beurteilung der Langzeitsicherheit von Endlagern und Untertagedeponien in tiefen geologischen Formationen aus fachlich-wissenschaftlicher Sicht wünschenswert ist. Grundsätzlich gelten die FuE-Themen für alle Gesteinsformationen, sofern nicht besonders Salzgestein/Salzgebirge und Hartgestein (z.B. Granit) genannt sind. Im Anhang 1.1 sind Forschungsthemen für dieendlagerung radioaktiver Abfälle sowie zur Kernmaterialüberwachung aufgelistet, im Anhang 1.2 diejenigen für die untertägige Entsorgung chemotoxischer Abfälle. Eine große Anzahl der Themen ist allgemeiner Art und kann sowohl dem Bereich der radioaktiven als auch der chemotoxischen Abfälle zugeordnet werden, vor allem dann, wenn es sich um die Entwicklung von Methoden handelt. Sie erscheinen daher in beiden Kapiteln und sind durch **eckige Klammern** gekennzeichnet. In **Fettdruck** erscheinen Themen, deren Bearbeitung deutlich über das Jahr 2001 hinauslaufen wird.

Anhang 1.1 Forschungsthemen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle und Kernmaterialüberwachung

A WEITERENTWICKLUNG VON ENDLAGERKONZEPTIONEN UNTER SICHERHEITSGESICHTSPUNKTEN

A1 Abfallcharakterisierung und -klassifizierung

- A1.1-E Untersuchung des Einflusses des Gebirgsdruckes auf die Partikelbruchrate in einer Kugelschüttung von HTR-Brennelementen
- A1.2-E Entwicklung eines experimentell abgesicherten Korrosionsmodells für Partikelbeschichtungen bei HTR-Brennelementen

A2 Wissenschaftliche Grundlagen für Sicherheitsanforderungen

- A2.1-E Systemanalytische Ableitung von Sicherheitsanforderungen für die Auslegung von Endlagern unter besonderer Berücksichtigung geomechanischer, hydrogeologischer und geochemischer Systemeigenschaften
- [A2.2-E] Ableitung von Auslegungsanforderungen für einzelne Komponenten des Endlagersystems wie Versatz, Dammbauwerke und Schachtverschlüsse auf Basis einer Sicherheitsanalyse

A3 Weiterentwicklung von Einlagerungs-, Handhabungs- und Überwachungstechniken

- A3.1-E Entwicklung und Erprobung eines Lagerkonzeptes für unzerschnittene Brennelemente in Bohrlöchern
- A3.2-E Überlegungen und Untersuchungen zur Ertüchtigung des CASTOR MTR 2 und ggf. des CASTOR THTR als Endlagerbehälter

A4 Charakterisierung und Eigenschaften potentieller Wirtsgesteinsformationen

- [A4.1-E] Entwicklung von Untersuchungsmethoden zum Verhalten von geogenen Lösungen im Salzgebirge und Modellierung der Migration von Radionukliden unter Berücksichtigung geochemischer, geomechanischer und hydrogeologischer Randbedingungen

[A4.2-E] Entwicklung eines Instrumentariums zur zerstörungsfreien und weitreichenden Detektion und Charakterisierung inhomogener Bereiche im Wirtsgestein (z.B. Laugen, Klüfte)

[A4.3-E] Einsatz geostatistischer Methoden bei der Erkundung und Charakterisierung potentieller Wirtsgesteinsformationen

A5 Geotechnische Barrieren

[A5.1-E] Konzeption, Planung und Bau langzeitsicherer Abschlußbauwerke bzw. deren Komponenten für Bohrlöcher, Strecken und Schächte

A6 Abtrennung und Umwandlung von Aktiniden und langlebigen Spaltprodukten

- A6.1 Untersuchungen zur neutronenphysikalischen Kernauslegung und zu Sicherheitsaspekten von Leichtwasserreaktoren und Schnellen Reaktoren bei der Transmutation langlebiger Spaltprodukte und Aktiniden
- A6.2 Untersuchungen zum Potential und zu Sicherheitsaspekten Beschleuniger-getriebener unterkritischer Anordnungen zur Transmutation langlebiger Spaltprodukte und Aktiniden
- A6.3 Weiterentwicklung von Verfahren zur effizienten Abtrennung langlebiger Spaltprodukte und Aktiniden aus Wiederaufarbeitungsabfällen

B VERBESSERUNG VON INSTRUMENTARIEN FÜR DIE SICHERHEITSBEWERTUNG VON ENDLAGERN

B1 Szenarienentwicklung

[B1.1-E] Systematische Ableitung von Szenarien für die zukünftige Entwicklung von Endlagern in salinaren und in nicht salinaren Gesteinsformationen unter Berücksichtigung langzeitiger klimatischer und geologischer Entwicklungen sowie der Möglichkeit menschlicher Einwirkungen

B2 Verhalten der Wirtsgesteinsformation

- [B2.1-E] Untersuchung und Modellierung des thermomechanischen Verhaltens von Salzgesteinen unter Berücksichtigung von Bruch- oder Rißbildungen, auch unter dem Einfluß von Lösungen und Gasen
- [B2.2-E] Untersuchungen zur Hohlraumkonvergenz und Weiterentwicklung der Konvergenzmodelle für verfüllte und fluidgefüllte Hohlräume im Salzgestein
- B2.3-E **Untersuchung und Modellierung des geomechanischen, geochemischen und thermomechanischen Verhaltens von Hartgesteinen unter Berücksichtigung der Entstehung und Ausbreitung von Flüssigkeiten und Gasen**

B3 Chemische und physikalische Effekte im Nahfeld

- [B3.1-E] **Absicherung und Erweiterung der thermodynamischen Datenbasis für Aktiniden und Spaltprodukte unter Nahfeldbedingungen**
- [B3.2-E] **Untersuchung des chemischen Milieus und dessen zeitlicher Entwicklung im Hinblick auf Mobilisierung und Rückhaltung von Radionukliden sowie Modellierung der dabei ablaufenden Prozesse, insbesondere unter Berücksichtigung des Einflusses von Eisen und Versatzzuschlagstoffen (z.B. Apatit)**
- [B3.3-E] Untersuchung der Entstehung und Freisetzung, des Transports und des Verbleibs von Gasen und Entwicklung prozeßbeschreibender Modelle
- B3.4-E Korrosionsuntersuchungen an Abfallprodukten und abgebrannten Brennlementen (LWR-UO₂, LWR-MOX, MTR, HTR) in Anwesenheit von Behälter- und Hüllmaterialien zur Ermittlung von Freisetzungsraten für Radionuklide, Gasentwicklung, **Phasenumwandlungen und Bildung neuer Wirtsphasen für Radionuklide sowie Modellierung und Quantifizierung des Quellterms für sicherheitsanalytische Modelle**
- B3.5-E Auswahl und Untersuchung geeigneter Materialien zur Rückhaltung von Jod und Cäsium im Nahbereich eines Endlagers mit abgebrannten Brennlementen
- B3.6-E Überlegungen und Untersuchungen zur Verbringung von Tails-Uran und WAU in ehemalige Uranerzbergwerke
- B3.7-E Kritikalitätsbetrachtungen für bestrahlte Brennlemente aus Forschungsreaktoren und Brennlemente mit hohen Pu-Gehalten

B4 Verhalten von geotechnischen Barrieren

- [B4.1-E]** Ermittlung der Daten für die Modellierung des Langzeitverhaltens von Abschlußbauwerken bzw. deren Komponenten für Bohrlöcher, Strecken und Schächte insbesondere hinsichtlich der Lösungs- und Gasdurchlässigkeit und der Wechselwirkung mit mobilisierten Schadstoffen
- [B4.2-E]** Entwicklung und Erprobung von Verfahren zur Beurteilung des langfristigen Verhaltens von Auflockerungszonen sowie zur Verbesserung der Barrierewirkung des Gebirges im Bereich von Auflockerungs- und Störzonen
- B4.3-E** Untersuchung und Auswahl geeigneter Versatzstoffe für das **Salzkonzept und von Verfüll- und Puffermaterialien für Endlager im Hartgestein einschließlich Modellierung ihres Verhaltens gegenüber Gasen und Flüssigkeiten sowie ihres Sorptionsverhaltens für Radionuklide**

B5 Verhalten von geologischen Barrieren

- [B5.1-E]** Untersuchungen zum Ausbreitungsverhalten von Radionukliden nach der Freisetzung aus dem Endlager insbesondere hinsichtlich der geochemischen Reaktionen Sorption, Kolloid- und Komplexbildung im Aquifersystem des Deckgebirges

B6 Methodenentwicklung und Rechenprogramme für Sicherheitsbewertungen

- [B6.1-E]** Weiterentwicklung und Aktualisierung der Methoden und Rechenprogramme für Langzeitsicherheitsanalysen auf der Grundlage modifizierter Entsorgungskonzepte und neuer Erkenntnisse aus FuE-Arbeiten unter Berücksichtigung der internationalen Entwicklungen
- [B6.2-E]** Entwicklung von Rechenmodellen zur Beschreibung der geomechanischen, hydrogeologischen und geochemischen Effekte in ihren Wechselwirkungen bei Lösungszutritten in Hohlräume im Salinar
- [B6.3-E]** Weiterentwicklung des Instrumentariums zur Simulation der Grundwasserbewegung in porösen und geklüfteten Medien und der damit zusammenhängenden Effekte

- [B6.4-E] Untersuchung und Modellierung des Migrationsverhaltens von Radionukliden unter den hydro-geochemischen Bedingungen im Wirtsgestein, in geotechnischen Barrieren und im Deckgebirge (gekoppelte Transportmodelle)**

B7 Validierung von Modellen, Unsicherheitsanalyse

- [B7.1-E] Anwendung existierender oder Entwicklung geeigneter Methoden und Verfahren für die Validierung von Modellen zur Beschreibung geomechanischer, hydrogeologischer und geochemischer Effekte im Nahbereich und im Wirtsgestein**
- [B7.2-E] Durchführung von Labor- und In-situ-Untersuchungen zur Validierung von Grundwasserströmungs- und Transportmodellen einschließlich der Prüfung der Übertragbarkeit der Aussagen von Laboruntersuchungen auf die realen Verhältnisse von Endlagern**
- [B7.3-E] Quantifizierung der Aussagesicherheit von Langzeitsicherheitsanalysen einschließlich der Beurteilung des notwendigen Abbaus von Unsicherheiten durch Erhöhung von Datendichte und -qualität**
- [B7.4-E] Untersuchung geochemischer und geomechanischer Prozesse in natürlichen Systemen als Analogon für die Schadstoffrückhaltung im Nahbereich eines Endlagers**
- [B7.5-E] Untersuchung chemisch/physikalischer sowie geologischer Prozesse in natürlichen Systemen hinsichtlich Aussagen zur langfristigen Barrierenwirksamkeit der Wirtsformation**
- [B7.6-E] Untersuchung chemisch/physikalischer Prozesse in natürlichen Systemen in Hinblick auf Schadstofftransport und -rückhaltung in der Geosphäre**

C ANPASSUNG UND WEITERENTWICKLUNG DER KERNMATERIALÜBERWACHUNG AN DIE BEDINGUNGEN DER DIREKTEN ENDLAGERUNG

C1 Erstellung und Anpassung von Überwachungskonzepten

- C1-1 Anpassung des für die direkte Endlagerung von LWR-Brennelementen entwickelten Safeguardskonzeptes an die speziellen Randbedingungen der Endlagerung von Brennelementen aus Forschungsreaktoren
- C1-2 Integration von Safeguardsmaßnahmen gemäß dem Protokoll INFCIRC/540 und Prüfung bzw. Weiterentwicklung neuer Überwachungsmethoden

C2 Neue Techniken

- C2-1 Entwicklung eines routinemäßig einsetzbaren Instruments zur fernbedienten Verifikation von Schweißnähten
- C2-2 Überprüfung des Einsatzes geophysikalischer Verfahren als potentielle Verifikationsmaßnahmen
- C2-3 Weiterentwicklung der Satellitenerkundung

C3 Aufnahme, Auswertung, Zusammenführung und Fernübertragung von Daten

- C3-1 Zusammenführung verschiedener digitaler Überwachungsinstrumente zu einem integrierten System
- C3-2 Weiterentwicklung der Datenfernübertragung

Anhang 1.2 Forschungsthemen zur untertägigen Entsorgung chemotoxischer Abfälle

A WEITERENTWICKLUNG VON UNTERTAGEDEPONIEKONZEPTIONEN UNTER SICHERHEITSGESICHTSPUNKTEN

A1 Abfallcharakterisierung und -klassifizierung

- A1.1-C Klassifizierung UTD-relevanter Abfälle anhand weiterentwickelter Kriterien auf der Grundlage des analytisch bestimmten Stoffbestands und Ableitung quantitativer Mindestanforderungen an die abgelagerten Verwahrformen

A2 Wissenschaftliche Grundlagen für Sicherheitsanforderungen

- A2.1-C Bereitstellung der wissenschaftlichen Voraussetzungen zur Festlegung von quantifizierten Schutzz Zielen und Eignungskriterien für untertägige Entsorgungseinrichtungen in nicht-salinaren Gesteinen
- [A2.2-C] Ableitung von Auslegungsanforderungen für einzelne Komponenten des UTD-Systems wie Versatz, Dammbauwerke, Kavernen- und Schachtverschlüsse auf Basis einer Sicherheitsanalyse
- A2.3-C Systemanalytische Untersuchung der Bedeutung verschiedener Abschlußbauwerke wie Strecken- und Schachtverschlüsse für UTD-Bereiche in ehemaligen oder betriebenen Gewinnungsbergwerken

A3 Weiterentwicklung von Einlagerungs-, Handhabungs- und Überwachungstechniken

- A3.1-C Weiterentwicklung und Verbesserung von Einbring- und Verfülltechniken für chemotoxische Abfälle unter Sicherheitsaspekten

A4 Charakterisierung und Eigenschaften potentieller Wirtsgesteinsformationen

- [A4.1-C] Entwicklung von Untersuchungsmethoden zum Verhalten von geogenen Lösungen im Wirtsgestein und Modellierung der Migration von Schadstoffen unter Berücksichtigung geochemischer, geomechanischer und hydrogeologischer Randbedingungen

[A4.2-C] Entwicklung eines Instrumentariums zur zerstörungsfreien und weitreichenden Detektion und Charakterisierung inhomogener Bereiche im Wirtsgestein (z.B. Laugennester, Klüfte)

[A4.3-C] Einsatz geostatistischer Methoden bei der Erkundung und Charakterisierung potentieller Wirtsgesteinsformationen

A5 Geotechnische Barrieren

[A5.1-C] Konzeption und Planung langzeitsicherer Abschlußbauwerke bzw. deren Komponenten für Strecken, Kavernen und Schächte

B VERBESSERUNG VON INSTRUMENTARIEN FÜR DIE SICHERHEITSBEWERTUNG VON UNTERTAGEDEPONIEN

B1 Szenarienentwicklung

[B1.1-C] Systematische Ableitung von Szenarien für die zukünftige Entwicklung untertägiger Entsorgungseinrichtungen in salinaren und nicht salinaren Gesteinsformationen unter Berücksichtigung langzeitiger klimatischer und geologischer Entwicklungen sowie der Möglichkeit menschlicher Einwirkungen

B2 Verhalten der Wirtsgesteinsformation

[B2.1-C] Untersuchung und Modellierung des geomechanischen Verhaltens von Salzgesteinen unter Berücksichtigung von Bruch- oder Rißbildungen, auch unter dem Einfluß von Lösungen und Gasen

[B2.2-C] Untersuchungen zur Hohlräumkonvergenz und Weiterentwicklung der Konvergenzmodelle für verfüllte und fluidgefüllte Hohlräume im Salzgestein

B2.3-C **Untersuchung und Modellierung des geomechanischen und geochemischen Verhaltens nichtsalinärer Wirtsgesteine unter Berücksichtigung der Entstehung und Ausbreitung von Flüssigkeiten und Gasen**

B3 Chemische und physikalische Effekte im Nahfeld

- [B3.1-C] Absicherung und Erweiterung der thermodynamischen Datenbasis für UTD-relevante chemotoxische Schadstoffe unter Nahfeldbedingungen**
- [B3.2-C] Untersuchungen des chemischen Milieus und dessen zeitliche Entwicklung im Hinblick auf Mobilisierung und Rückhaltung von Schadstoffen aus chemotoxischen Abfällen sowie Modellierung der dabei ablaufenden Prozesse**
- [B3.3-C] Untersuchung der Entstehung und Freisetzung, des Transports und des Verbleibs von Gasen und Entwicklung prozeßbeschreibender Modelle**

B4 Verhalten von geotechnischen Barrieren

- [B4.1-C] Ermittlung der Daten für die Modellierung des Langzeitverhaltens von Abschlußbauwerken bzw. deren Komponenten für Strecken, Kavernen und Schächte insbesondere hinsichtlich der Lösungs- und Gasdurchlässigkeit und der Wechselwirkung mit mobilisierten Schadstoffen**
- [B4.2-C] Entwicklung und Erprobung von Verfahren zur Beurteilung des langfristigen Verhaltens von Auflockerungszonen sowie zur Verbesserung der Barrierewirkung des Gebirges im Bereich von Auflockerungs- und Störzonen**

B5 Verhalten von geologischen Barrieren

- [B5.1-C] Untersuchungen zum Ausbreitungsverhalten chemotoxischer Schadstoffe nach der Freisetzung aus der untertägigen Entsorgungseinrichtung insbesondere hinsichtlich der geochemischen Reaktionen Sorption und Kolloidbildung im Aquifersystem des Deckgebirges**

B6 Methodenentwicklung und Rechenprogramme für Sicherheitsbewertungen

- [B6.1-C] Weiterentwicklung und Aktualisierung der Methoden und Rechenprogramme für Langzeitsicherheitsanalysen auf der Grundlage modifizierter Entsorgungskonzepte und neuer Erkenntnisse aus FuE-Arbeiten unter Berücksichtigung der internationalen Entwicklungen**
- [B6.2-C] Entwicklung von Rechenmodellen zur Beschreibung der geomechanischen, hydrogeologischen und geochemischen Effekte in ihren Wechselwirkungen bei Lösungszutritten in Hohlräume im Salinar**
- [B6.3-C] Weiterentwicklung des Instrumentariums zur Simulation der Grundwasserbewegung in porösen und geklüfteten Medien und der damit zusammenhängenden Effekte**
- [B6.4-C] Untersuchung und Modellierung des Migrationsverhaltens chemotoxischer Schadstoffe unter den hydro-geochemischen Bedingungen im Wirtsgestein, in geotechnischen Barrieren und im Deckgebirge (gekoppelte Transportmodelle)**

B7 Validierung von Modellen, Unsicherheitsanalyse

- [B7.1-C] Anwendung existierender oder Entwicklung geeigneter Methoden und Verfahren für die Validierung von Modellen zur Beschreibung geomechanischer, hydrogeologischer und geochemischer Effekte im Nahbereich und im Wirtsgestein**
- [B7.2-C] Durchführung von Labor- und In-situ-Untersuchungen zur Validierung von Grundwasserströmungs- und Transportmodellen einschließlich der Prüfung der Übertragbarkeit der Aussagen von Laboruntersuchungen auf die realen Verhältnisse von Untertagedeponien**
- [B7.3-C] Quantifizierung der Aussagesicherheit von Langzeitsicherheitsanalysen einschließlich der Beurteilung des notwendigen Abbaus von Unsicherheiten durch Erhöhung von Datendichte und -qualität**
- [B7.4-C] Untersuchung geochemischer und geomechanischer Prozesse in natürlichen Systemen als Analogon für die Schadstoffrückhaltung im Nahbereich einer UTD**

- [B7.5-C] Untersuchung chemisch/physikalischer sowie geologischer Prozesse in natürlichen Systemen hinsichtlich Aussagen zur langfristigen Barrierenwirksamkeit der Wirtsformation**
- [B7.6-C] Untersuchung chemisch/physikalischer Prozesse in natürlichen Systemen in Hinblick auf Schadstofftransport und -rückhaltung in der Geosphäre**

Anhang 2 zum Förderkonzept Entsorgung (1997 - 2001)

Verzeichnis abgeschlossener Fördervorhaben

In den folgenden beiden Listen sind abgeschlossene Fördervorhaben zusammenge stellt, die ab 1980 vom BMBF auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle und Kernmaterialüberwachung und ab 1991 auf dem Gebiet der untertägigen Entsorgung chemotoxischer Abfälle gefördert worden sind (Stand 30.06.1997). Der größte Teil aller Vorhaben, die bis Ende 1995 im Rahmen des FuE-Programms Direkte Endlagerung durchgeführt wurden, sind im Anhang 2.1 unter A3 „Weiterentwicklung von Einlagerungs-, Handhabungs- und Überwachungstechniken“ zusammengefaßt.

Die Gliederung der Anhänge A2.1 und A2.2 in einzelne Themenbereiche erfolgt analog zu den Kapiteln 4.2 und 4.3. Bei den Angaben zu den einzelnen Vorhaben handelt es sich um Förderkennzeichen, Laufzeit, bearbeitende Institution und Thema.

Anhang 2.1 Abgeschlossene Fördervorhaben zur Endlagerung radioaktiver Abfälle und Kernmaterialüberwachung

A WEITERENTWICKLUNG VON ENDLAGERKONZEPTIONEN UNTER SICHERHEITSGESICHTSPUNKTEN

A1 Abfallcharakterisierung und -klassifizierung

KWA 5215/7 04/86 bis 06/88	Siemens	Untersuchungsprogramm zum Verhalten abgebrannter Brennelemente bei starken mechanischen Einwirkungen
KWA 5601/4 01/86 bis 12/89	BAM	Weiterentwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens zur Qualitätskontrolle von zementierten LAW- und MAW-Abfällen
KWA 5602/5 04/86 bis 06/88	Battelle	Untersuchungen zum Fraktionierungsverhalten und zur Aerosolbildung beim Absturz von Gebinden mit hochradioaktivem Abfall im Endlager
KWA 5902/7 10/89 bis 05/90	Battelle	Untersuchung von Arbeiten auf dem Gebiet Gebindeabsturz und Aerosolfreisetzung im Endlager
02 E 8080/4 06/90 bis 02/91	Battelle	Theoretische Voruntersuchung und Bewertung des Wissensstandes zum Bruchverhalten und zur Aktivitätsfreisetzung von HTR-BE im Hinblick auf Störfälle mit Gebindeabsturz im Endlager
02 E 8231/9 10/90 bis 12/93	IfE Leipzig	Bestimmung von Leitnukliden und Produkteigenschaften endzlagernder radioaktiver Abfälle
02 E 8411/7 10/90 bis 12/93	Battelle	Zerstörungsfreie Feststellung von Füllstand, freien Flüssigkeiten und Gasen in Abfallgebinden mit nicht-nuklearen Prüfmethoden

A2 Wissenschaftliche Grundlagen für Sicherheitsanforderungen

02 E 8442 04/92 bis 06/95	NOELL	Untersuchungen zur Aussagefähigkeit von Prüfkriterien an nichtmetallischen Beschichtungen für Anlagen und Behälter zur Entsorgung radioaktiver Stoffe
02 E 8684 01/94 bis 05/96	DBE	FuE-Arbeiten zu Sicherheitsbetrachtungen für ein hypothetisches Endlager im tiefen geologischen Untergrund im kristallinen Gestein
02 E 8694 10/94 bis 09/95	Stoller	Stand von Forschung und Entwicklung Rußlands und den anderen GUS-Staaten auf dem Gebiet der Endlagerung wärmeerzeugender radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen

A3 Weiterentwicklung von Einlagerungs-, Handhabungs- und Überwachungstechniken

KWA 2030/5 07/79 bis 08/80	KfK	Vergleich der verschiedenen Entsorgungsalternativen und Beurteilung ihrer Realisierbarkeit
KWA 3207/8 10/82 bis 12/84	Förderges. EWI	Wirtschaftlichkeitsvergleich Anderer Entsorgungstechniken

KWA 3301/0 01/83 bis 12/84	GUW	Repräsentative Emissionsdatensätze und Strahlenbelastung für Versorgungseinrichtungen im nuklearen Brennstoffkreislauf
KWA 3302/0 03/83 bis 06/84	TN	Untersuchung zum Transport von Endlagergebinden im Rahmen der Anderen Entsorgungstechniken
KWA 3310/7 08/83 bis 06/84	TN	Sicherheitsanalyse des Transportes konditionierter Brennelemente auf der Schiene im Rahmen des Projektes Andere Entsorgungstechniken
KWA 3602/2 07/86 bis 12/90	DBE	Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente. Demonstrationsversuch Thermische Simulation der Streckenlagerung - Phase II: Planung und Errichtung des Versuchsortes
KWA 3603/3 07/86 bis 12/90	BGR	Geotechnische und großnumerische Untersuchungen zur Direkten Endlagerung von Brennelementen Geotechnische und großnumerische Untersuchungen zur Direkten Endlagerung von Brennelementen
KWA 3604/4 07/86 bis 12/89	DBE	Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente. Maschinentechnische Versuche - Phase II
KWA 3701/9 05/87 bis 03/90	DBE	Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente - Demonstrationsvergleich: Aktives Handhabungsexperiment mit Neutronenquellen
KWA 5101/8 01/81 bis 12/84	NUKEM	Andere Entsorgungstechniken für abgebrannten Brennstoff
KWA 5122/5 02/82 bis 12/82	GSF	Versuchseinlagerung hochradioaktiver Abfälle (HAW) im Salzbergwerk Asse
KWA 5131/2 09/81 bis 12/84	DBE	Anpassung u. Weiterentwicklung der Untersuchungen und Planungen z. Endlagerung von hochaktiven Abfällen durch die Direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente
KWA 5131/A/2 07/85 bis 05/86	DBE	Direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente - Phase I: Vorbereitende Arbeiten für die Demonstration und Konzeptplanung
KWA 5131/B/5 06/86 bis 12/89	DBE	Direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente. Planungsarbeiten für ein Endlager-Mischkonzept - Phase II: Systemanalyse Mischkonzept
KWA 5212/4 03/82 bis 11/82	Siemens	Arbeiten zur Charakterisierung abgebrannter Kernbrennstoffe
KWA 5219/0 05/82 bis 04/83	DORNIER	Sicherheitstechnische Unterschiede zwischen LWR- und SBR Brennstoffkreislauf
KWA 5220/0 04/82 bis 06/85	GSF	Versuchseinlagerung hochradioaktiver Abfälle in der Schachtanlage Asse - 1. Projektphase
KWA 5302/3 01/83 bis 06/89	KFA	Weiterentwicklung d. Bohrlochtechnologie f. die Endlagerung radioaktiver Abfälle im Salz am Beispiel von Feedklärschlamm, Brennelementhülsen u. HTR-Brennelementen
KWA 5302/B/6 10/89 bis 12/92	KFA	MAW- und HTR-BE-Versuchseinlagerung in Bohrlöchern
KWA 5702/2 01/87 bis 12/89	GSF	Arbeiten zur Direkten Endlagerung von Brennelementen

KWA 5903/8 02/90 bis 12/92	GSF	Technisch-wissenschaftliche Betreuung u. geotechnisches Meßprogramm für MAW- und HTR-Versuchseinlagerung
KWA 8506/0 01/85 bis 12/90	GSF	Versuchseinlagerung hochradioaktiver Abfallsimulate in der Schachtanlage Asse - 2. Projektphase
KWA 8507/1 5/85 bis 12/88	GSF	Versuchseinlagerung hochradioaktiver Abfallsimulate in der Schachtanlage Asse - 2. Projektphase: Wissenschaftlich-Technischer Teil
KWA 8507/A/1 01/89 bis 12/93	GSF	Versuchseinlagerung hochradioaktiver Abfallsimulate in der Schachtanlage Asse - 3. Projektphase : Versuchsdurchführung
02 E 8131/1 01/91 bis 06/94	BGR	Geotechnische und großnumerische Untersuchungen zur Direkten Endlagerung von Brennelementen
02 E 8191/0 01/90 bis 03/95	DBE	Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente. Handhabungsversuche zur Streckenlagerung - Phase III
02 E 8201/4 01/90 bis 12/93	DBE	Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente - Systemanalyse Endlagerkonzepte
02 E 8211/2 01/90 bis 12/92	GSF	Arbeiten zur Direkten Endlagerung von Brennelementen
02 E 8221/0 01/90 bis 09/93	DBE	Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente. Simulation des Schachtransportes - Phase III
02 E 8472/7 01/91 bis 12/95	DBE	Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente. Demonstrationsversuch: Aktives Handhabungsexperiment mit Neutronenquellen

A4 Charakterisierung und Eigenschaften potentieller Wirtsgesteinsformationen

KWA 2010/9 01/80 bis 12/81	Battelle	Einsatz der Schallemissionsanalyse zur Überwachung von Salzstöcken während und nach der Einlagerung radioaktiver Abfälle
KWA 5113/8 01/81 bis 12/84	BGR	Erkundung unerschlossener Bereiche von Salzlagerstätten durch hochfrequente elektromagnetische Bohrlochmeßverfahren
KWA 5114/9 01/81 bis 12/84	Nied.Land.f. Bodenforsch.	Erkundung unerschlossener Bereiche von Salzlagerstätten durch hochfrequente elektromagnetische Bohrlochmeßverfahren
KWA 5115/0 01/81 bis 12/84	Prakla-Seismos	Erkundung unerschlossener Bereiche von Salzlagerstätten durch hochfrequente elektromagnetische Bohrlochmeßverfahren
KWA 5201/5 01/82 bis 12/84	BGR	Aufstellung und ingenieurgeologische Beschreibung von Kristallin-Vorkommen in der Bundesrepublik Deutschland
KWA 5209/2 05/82 bis 12/85	Battelle	Einsatz der Schallemissionsanalyse zur Überwachung von Teilbereichen eines Salzstocks während und nach der Einlagerung radioaktiver Abfälle - Stufe II
KWA 5209/A/2 07/87 bis 11/89	Battelle	Einsatz der Schallemissionsanalyse zur Überwachung von Teilbereichen eines Salzstocks während und nach der Einlagerung radioaktiver Abfälle - Stufe III

KWA 5303/4 01/83 bis 12/87	BGR	Gebirgsspannungen - Felslabor Grimsel: Weiterentwicklung von Überbohrversuchen zur Bestimmung der Gebirgsspannungen und von Bohrlochverformungsversuchen
KWA 5304/5 01/83 bis 12/87	BGR	Bohrlochkranzversuch - Felslabor Grimsel: Felshydraulische Untersuchungen zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit und des Strömungsmechanismus von Kluftwasser
KWA 5304/A/5 01/88 bis 12/90	BGR	Bohrlochkranzversuch - Felslabor Grimsel: Deutsch-schweizerische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Endlagerung
KWA 5305/6 01/83 bis 04/86	BGR	Hochfrequenzmessungen zur Ermittlung der Homogenität von kristallinen Gesteinskomplexen
KWA 5315/4 04/83 bis 12/90	GSF	Untersuchungsprogramm zur Erkundung ausgewählter Eigenschaften von kristallinen Felsformationen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle
KWA 5501/7 01/85 bis 12/88	BGR	Weiterentwicklung von Hochfrequenz-EMR-Meßverfahren zur untertägigen Vorauserkundung unerschlossener Salzlagerbereiche
KWA 5505/0 01/85 bis 12/87	DORNIER	Systemanalyse zu sicherheitstechnischen Aspekten von radioaktiven Abfällen im tiefsten Meeresboden
KWA 5606/9 07/86 bis 09/89	DBE	Weiterentwicklung von elektromagnetischen Reflexions-Meßverfahren (EMR) zur untertägigen Vorauserkundung unerschlossener Salzlagerbereiche
02 E 8110/4 07/90 bis 12/92	Battelle	Schallemissionsmessungen zur Verfolgung der Bildung von Auflockerungszonen und von größeren Rissen in Salzgestein
02 E 8141/0 01/91 bis 06/94	BGR	Deutsch-schweizerische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Endlagerung. Durchströmungseigenschaften von geklüftetem Fels (Bohrlochkranzversuch - Fracture System Flow Test)
02 E 8151/8 01/91 bis 04/94	GSF	Untersuchung physikalischer Prozesse und Parameter zum Fluid- und Gastransport im Nahbereich von Endlager in granitischen Formationen des Felslabors Grimsel - Phase 3
02 E 8151/A 05/94 bis 12/95	GRS Braunschweig	Untersuchung physikalischer Prozesse und Parameter zum Fluid- und Gastransport im Nahbereich von Endlager in granitischen Formationen des Felslabors Grimsel - Phase 4
02 E 8936 01/96 bis 12/96	GRS Braunschweig	Voruntersuchungen zur Gebirgscharakterisierung und Auswahl eines Versuchsfeldes für ein 2-Phasenfluß-Experiment im ÄSPÖ-Hartgesteinlabor

A5 Geotechnische Barrieren

KWA 5509/4 10/85 bis 05/86	DBE	Dammbau im Salzgebirge - Pilotdamm Phase I: Vorbereitende Arbeiten und Konzeptplanung
KWA 5603/A/6 07/86 bis 12/92	GSF	Dammbau im Salzgebirge - Untersuchungen und Erprobung eines Systems von Baukomponenten zur Entwicklung und Optimierung eines Dammbauwerkes

KWA 5604/7 07/86 bis 12/92	DBE	Dammbau im Salzgebirge - Untersuchungen und Erprobung eines Systems von Baukomponenten zur Optimierung eines Dammbauwerkes
KWA 5605/A/8 07/86 bis 12/92	BGR	Dammbau im Salzgebirge - Untersuchungen und Erprobung eines Systems von Baukomponenten zur Optimierung eines Dammbauwerkes

B VERBESSERUNG VON INSTRUMENTARIEN FÜR DIE SICHERHEITSBEWERTUNG VON ENDLAGERN

B1 Szenarienentwicklung

02 E 8563 01/93 bis 01/95	Stoller	Untersuchungen zur Szenarienmodellierung im Nahfeld eines wärmebeeinflußten Endlagerbereichs im Salzstein
------------------------------	---------	---

B2 Verhalten der Wirtsgesteinsformation

KWA 5103/0 01/81 bis 12/84	BGR	In-Situ Meßtechnik im Salz. Ermittlung des Spannungs-Deformationsverhaltens von Salzgebirge durch Messungen in der Umgebung von Grubenhohlräumen und Bestimmung des sekundären und des primären Spannungszustandes
KWA 5104/0 01/81 bis 12/84	BGR	Stoffgesetze und Daten für Salz
KWA 5105/1 07/81 bis 04/85	BGR	Untersuchung der thermomechanischen Eigenschaften radioaktiv bestrahlter Salzproben
KWA 5118/2 01/81 bis 12/82	Uni Hannover	Stoffgleichungen für Salze unter mechanischer, thermischer und radioaktiver Belastung sowie numerische Behandlung von Anfangs- und Randwertproblemen
KWA 5202/6 01/82 bis 04/86	BGR	Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Langzeitdeformationsverhalten von Steinsalz auf der Grundlage der wirksamen Deformationsmechanismen
KWA 5204/8 01/82 bis 12/84	BGR	In-Situ-Experimente zum Nachweis kritischer Spannungszustände (thermisch induzierte Rißbildung) - Teilprojekt Geophysik
KWA 5205/9 07/82 bis 06/85	BGR	Thermomechanische in-situ-Versuche zum Nachweis kritischer Spannungszustände (Rißbildung) - Teilprojekt Gebirgsmechanik
KWA 5301/2 01/83 bis 12/83	Uni Hannover	Stoffgleichungen für Salze unter mechanischer, thermischer und radioaktiver Belastungen sowie numerische Behandlung von Anfangs- und Randwertproblemen
KWA 5502/8 01/85 bis 12/87	BGR	Geotechnisches Verhalten verschiedener Salzgesteine
KWA 5503/9 01/85 bis 06/88	BGR	In-Situ-Heizversuche zum Nachweis kritischer Spannungszustände (thermisch induzierte Rißbildung)
KWA 5802/0 03/88 bis 12/90	BGR	Wissenschaftliche Grundlagen der Erkundung und Berechenbarkeit des Endlagerbergwerks

02 E 8161/6 01/91 bis 12/91	IfG Leipzig	Überprüfung vorhandener Modellvorstellungen zum Konvergenzverhalten und zur Standsicherheit komplexer Grubengebäude im Salzgestein. Ermittlung notwendiger Ergänzender Daten - Phase I
02 E 8241/A 01/92 bis 03/95	IfG Leipzig	Gebirgsmechanisches Verhalten von Anhydrit und Salzton
02 E 8311/0 07/91 bis 06/93	IfAG	Flächenhafte Erfassung der vertikalen Deckgebirgsbewegungen in untertägigen Hohlräumen im Salzgebirge
02 E 8391 01/91 bis 12/96	BGR	Entwicklung von Methoden zur Erkundung dynamischen Gebirgseigenschaften in der Umgebung von untertägigen Hohlräumen
02 E 8421 01/91 bis 02/95	BGR	Untersuchungen thermophysikalischer und elektrischer Eigenschaften von Salzgesteinen
02 E 8452 04/92 bis 06/95	GSF	Geotechnische Untersuchung im Salinar zur Ermittlung des gebirgsmechanischen Verhaltens von Anhydrit und Salzton (Nachbetriebsphase)
02 E 8542/0 01/93 bis 12/94	BGR	Thermomechanisches Verhalten von Salzgesteinen

B3 Chemische und physikalische Effekte im Nahfeld

KWA 5116/0 01/81 bis 12/83	GSF	Laugenmigrationstest in der Schachtanlage Asse
KWA 5124/7 07/81 bis 08/83	Siemens	Auslaugversuche an unbestrahlten und bestrahlten Kernbrennstoffen in Salzlauge
KWA 5124/A/7 09/83 bis 06/86	Siemens	Langzeitauslaugung bestrahlter Kernbrennstoffe in Salzlauge und Einfluß von Eisen auf die Elementmobilisierung
KWA 5312/1 02/83 bis 01/85	TU München	Bestimmung der Löslichkeiten und des chemischen Verhaltens der Np-, Pu- und Am-Komplexe in Salzlösungen
KWA 5313/2 02/83 bis 01/85	FU Berlin	Untersuchung der Mobilität von Plutonium und Americium aus MAW-Produkten bei Endlagerung im Salz
KWA 5314/3 09/83 bis 12/86	TH Darmstadt	Löslichkeit von Technetium in konzentrierten Salzlösungen
KWA 5401/0 01/84 bis 12/86	GSF	HAW-Simulationsversuch mit Co-60-Quellen in der Schachtanlage Asse
KWA 5905/0 10/90 bis 03/92	DBI	Rückgewinnung von Bohrlocheinbauten und Steinsalzproben nach in-situ-Versuchen zur Sicherheitsanalyse bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Steinsalzformationen
KWA 5906/0 10/90 bis 05/92	IfE	Korrosions- und Auslaugverhalten metallischer Werkstoffe mit und ohne Beschichtung in einem Endlager - Vorphase
02 U 5715/0 02/85 bis 03/88	FU Berlin	Untersuchung der Mobilisierung ausgewählter Radionuklide und deren Sorptionsverhalten an natürlichen und technischen Barrieren unter MAW-Endlagerbedingungen
02 U 5725/9 02/85 bis 12/87	TU München	Geochemisches Verhalten von Aktinoiden und Tc im geologischen Milieu des Endlagerortes

02 U 5998/3 10/88 bis 09/91	FU Berlin	Elektrochemische Korrosionsuntersuchungen an bestrahlten und unbestrahlten Urandioxidpellets in konzentrierten Salzlösungen
02 E 8020/5 07/90 bis 12/93	TU Clausthal	Elektrochemische Untersuchungen der Korrosion von Werkstoffen in heißen Salzlauge
02 E 8030/3 08/90 bis 02/93	FU Berlin	Untersuchung der Verstärkung der Rückhaltung des Nahbereiches eines Endlagers in einem Salzdom gegenüber mehrwertigen Kationen durch Hydroxylapatit
02 E 8100/6 09/90 bis 10/91	Battelle	Untersuchungen zum Gefährdungspotential von Wasserstoff in einem Endlager für radioaktive Abfälle in Steinsalz während der Betriebsphase
02 E 8251 09/91 bis 08/95	Uni Düsseldorf	Lokale Korrosion metallischer Werkstoffe u. Gamma-Strahlenwirkung in Passiv-Schichten unter Endlagerbedingung.
02 E 8261 10/91 bis 04/95	FU Berlin	Radiochemische Korrosionsuntersuchungen an Titan und Titanlegierungen als Containerwerkstoffe in praxisrelevanten Salzlauge
02 E 8271/1 10/91 bis 03/95	FU Berlin	Elektrochemische Korrosionsuntersuchungen an unbestrahltem Urandioxid und simuliertem "spent fuel" in endlagerungsrelevanten Laugensystemen
02 E 8351/2 05/91 bis 09/92	GRS Köln	Gasbildung und Gastransport in einem salinaren Endlager bei unterstelltem Laugeneinbruch
02 E 8361/0 10/91 bis 06/92	TU BAF	Vergleich von geochemischen Rechenprogrammen und Erweiterung der thermodynamischen Datenbasis für die Modellierung von hochsalinaren Lösungen
02 E 8603/5 07/93 bis 01/94	Stoller	Literaturrecherche zu Strahleffekten im Steinsalz - Auswertung der russischen Literatur
02 E 8613 11/93 bis 10/96	TU BAF	Vergleich von geochemischen Rechenprogrammen und Erweiterung der thermodynamischen Datenbasis für die Modellierung von hochsalinaren Lösungen (Phase II)
02 E 8633/0 10/93 bis 04/94	Stoller	Thermische und radiologische Geschichte des Wirtsgesteins in den Versuchen A1 u. A2 im Untertagemeßfeld des ERAM
02 E 8825 10/95 bis 06/96	GRS Braunschweig	Realistische Abschätzung der Strahlenschädigung von Steinsalz bei Einlagerung von HAW in Bohrlöchern

B4 Verhalten von geotechnischen Barrieren

02 U 5404/2 06/84 bis 12/86	Siemens	Konzept für die Ermittlung der Rückhaltefähigkeit von Versatzmaterialien und Abschlußbauwerken gegenüber gasförmigen Radionukliden
02 U 5836/5 01/87 bis 10/89	Siemens	Laborversuche zur Ermittlung des Rückhaltevermögens von Salz (Schüttungen unterschiedlicher Korngröße und Salzmischung) gegenüber ausgewählten Radionukliden und einigen ihrer gasförmigen chemischen Verbindungen
02 E 8040/1 07/90 bis 06/91	Uni Karlsruhe	Grundlagenuntersuchungen zu Salzaufwerk mit Kondurchmessern bis 65 mm in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte und des Spannungsniveaus

02 E 8211/A 01/93 bis 12/95	GRS Braunschweig	Arbeiten zur Direkten Endlagerung von Brennelementen (Thermische Simulation der Streckenlagerung / TSS)
02 E 8231/A 07/94 bis 01/96	BGR	Geotechnische Untersuchungen im Rahmen des Demonstrationsversuchs Thermische Simulation der Streckenlagerung (TSS)
02 E 8291/8 07/91 bis 12/93	TU BAF	Untersuchungen zu Bohrlochverschlüssen und Verschlußmaterialien mit Dokumentation bisheriger Sorptionsergebnisse
02 E 8462 04/92 bis 12/95	TU BAF	Diffusions- und Permeabilitätsverhalten von Wasserstoff in Steinsalz und kompaktiertem Salzgrus
02 E 8492 04/92 bis 12/95	Battelle	Bestimmung des Diffusions- und Permeabilitätsverhaltens von Wasserstoff in Steinsalz und kompaktiertem Salzgrus
02 E 8552/8 01/93 bis 12/94	BGR	Untersuchungen zum Kompaktionsverhalten von Salzgrus als Versatzmaterial für Endlagerbergwerke im Salz unter besonderer Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen Gebirge und Versatz

B5 Verhalten von geologischen Barrieren

KWA 3111/3 07/81 bis 06/84	GSF	Sicherheitsstudie Entsorgung PSE II - Die Sorption von Radionukliden in oberflächennahen Böden der Bundesrepublik Deutschland
KWA 5701/1 01/87 bis 06/89	BAM	Untersuchung des Sorptionsmechanismus des Urans, Nikkels und Thoriums an Gesteinsoberflächen
KWA 5801/9 03/88 bis 12/90	BGR	Langzeitsicherheit der Barriere Salzstock
02 U 5695/A/9 07/87 bis 11/89	FU Berlin	Das Ausbreitungsverhalten von Technetium (Selen) in geochemisch unterschiedlichen Grundwasserleitern
02 U 5696/9 09/85 bis 06/87	FU Berlin	Bereitstellung gesicherter Sorptionsdaten für Technetium
02 U 5705/2 10/85 bis 12/88	TU Berlin	Untersuchung von Rückhalteeffekten im Barrierensystem Deckgebirge
02 U 5745/5 07/84 bis 09/87	TU Berlin	Erweiterung und Anwendung vorhandener Modellansätze zur Berechnung der Nuklidmigration in Unterschiedlichen Deckgebirgsformationen
02 U 5826/7 08/86 bis 07/89	TH Darmstadt	Untersuchungen zur Kolloidbildung in natürlichen Systemen und Einfluß der Kolloidbildung auf das Migrationsverhalten von Spurenelementen
02 U 5958/0 10/88 bis 03/92	TU München	Untersuchung der Übertragbarkeit von Labordaten (Löslichkeiten und Sorptionskoeffizienten) auf natürliche Verhältnisse am Beispiel von Gorleben-Aquifer-Systemen
02 U 5917/7 08/87 bis 12/88	TH Darmstadt	Literaturauswertung über Untersuchungen zum möglichen Einfluß von Mikroorganismen auf die Ausbreitung von Radionukliden aus Endlagern
02 E 8050/0 07/90 bis 06/93	FU Berlin	Sorptionsexperimente zur Beeinflussung der Radionuklidmigration durch mikrobielle Aktivitäten am Beispiel des Technetiums, Selens und Jods

02 E 8060/8 07/90 bis 06/93	TU Berlin	Untersuchungen zur Methodik von Sterilisationsverfahren sowie der mikrobiologischen Überwachung von Sorptionsexperimenten
02 E 8060/A 10/93 bis 04/96	TU Berlin	Einfluß der autochthonen Mikroflora auf die Sorption und Remobilisierung des Technetiums und Selens
02 E 8331/6 11/91 bis 10/94	TU München	Entwicklung und Interpretation von Methoden zur Altersdatierung und Charakterisierung von Grundwässern und darin enthaltenen DOC und DIC mit Hilfe von C-14-Messungen sowie ergänzenden Isotopenuntersuchungen
02 E 8341/4 08/91 bis 06/92	Schwandt	Erfassung und Bewertung der im Steinsalz-, Kali- und Kupferschieferbergbau am Bernburger Hauptsattel und in der Sangerhäuser Mulde aufgetretenen Salzlösungen und Wasservorkommen
02 E 8573 06/93 bis 02/95	IfE Dresden	Bestandsaufnahme und Bewertung des Datenmaterials von geochemischen Experimenten sowie Zusammenstellung in Form einer Datenbank zur Verwendung in der geochem. Modellierung
02 E 8583 06/93 bis 01/97	TU München	Untersuchung der Übertragbarkeit von Labordaten (Löslichkeiten und Sorptionskoeffizienten) auf natürliche Verhältnisse am Beispiel von Gorleben Aquifersystemen
02 E 8674 10/94 bis 12/95	GRS Köln	Teilnahme am EVEGAS Benchmark Projekt
02 E 8906 05/96 bis 04/97	FU Berlin	Einfluß der autochthonen Mikroflora auf die Sorption und die Remobilisierung des Technetiums und Selens an verschiedenen Sedimenten

B6 Methodenentwicklung und Rechenprogramme für Sicherheitsbewertungen

KWA 2070/8 04/80 bis 03/82	BGR	Entwicklung eines optimalen Finite Element Programms zur Berechnung thermomechanischer Vorgänge bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle
KWA 2090/4 07/80 bis 10/81	Control Data	Berechnung thermomechanischer Vorgänge im Salzgestein
KWA 5317/6 10/83 bis 12/84	BGR	ANSALT-Produktionssicherungssystem
KWA 5408/6 07/84 bis 03/90	GSF	Arbeiten zur Sicherheitsanalyse eines geologischen Endlagers. Untersuchung strömungsmechanischer und geochemischer Vorgänge sowie Weiterführung der Modellentwicklung
KWA 5409/7 07/84 bis 12/88	GSF	Aspekte der potentiellen Strahlenexposition der Bevölkerung aus Endlagern
KWA 5911/4 10/90 bis 12/91	IfE Leipzig	Modelle zur numerischen Simulation der Radionuklidabreitung bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle - 1. Arbeitsphase
02 U 5937/3 10/87 bis 09/90	Uni Hannover	Methodenentwicklung für Kluftwassersysteme

02 E 8019/5 02/90 bis 12/92	GSF	Potentielle Strahlenexposition der Bevölkerung und ihre Variabilität nach Austritt von Radionukliden aus Endlager in nutzbare Grundwässer
02 E 8320/7 10/90 bis 06/94	Control Data	Entwicklung des Programmsystems ANSALT II zur Berechnung dreidimensionaler thermomechanisch gekoppelter, nichtlinearer Aufgabenstellungen im Rahmen der Endlagerung von Abfallstoffen im Salzgestein
02 E 8401/9 02/91 bis 04/95	GRS Köln	Entwicklung und Umsetzung von Qualifizierungsstrategien für Rechencodes zum Nachweis der Langzeitsicherheit in der Endlagerung
02 E 8522 09/91 bis 12/95	GRS Braunschweig	Entwicklung eines eindimensionalen Nuklidausbreitungsprogramms des Freisetzungspfrogramms REPOS
02 E 8532 07/92 bis 12/95	GRS Braunschweig	Erarbeitung und Bewertung der wissenschaftlichen Grundlagen zur Sicherheitsanalyse eines Endlagers in der Nachbetriebsphase
02 E 8593/1 08/93 bis 01/94	IfE Leipzig	Manual und Testbericht zum Grundwassermmodell GEOFIM
02 E 8775 01/96 bis 03/96	GRS Braunschweig	Erarbeitung und Bewertung der wissenschaftlichen Grundlagen zur Sicherheitsanalyse eines Endlagers in der Nachbetriebsphase

B7 Validierung von Modellen, Unsicherheitsanalyse

KWA 5203/7 01/82 bis 12/84	BGR	Vergleich thermomechanischer Berechnungen mit thermomechanischen in-situ-Versuchen
KWA 5311/0 06/83 bis 06/88	GSF	Untersuchungen endlagerrelevanter Vorgänge während und nach der Flutung der Kalisalzbergwerkes Hope
KWA 8307/7 06/83 bis 09/88	KBB	Untersuchung relevanter Vorgänge während und nach der Flutung des Kalisalzbergwerkes Hope - Technische Durchführung
02 E 8121 02/91 bis 08/95	TU Clausthal	Der Stoffbestand mariner Evaporite als Kriterium für die Bewertung der Langzeitsicherheit von Schadstoff-Deponien in Salzvorkommen: Die Bromidverteilung in Carnallitgesteinen
02 E 8301/1 07/91 bis 06/94	BGR	Modelluntersuchungen zur Bewegung des Grundwassers bei vom Salzgehalt abhängiger Wasserdichte - Fallstudien und Modellvalidierung im Hinblick auf die Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle
02 E 8431/3 01/91 bis 12/93	BGR	Aussagegenauigkeit dreidimensionaler thermomechanischer Modellrechnungen im Salzgebirge (Aussagesicherheit)
02 E 8745 10/95 bis 01/97	Stoller	Auswertung von russischen Experimenten zum Nachweis der Stabilität von Salzstöcken nach der Freisetzung extremer Energiemengen im Steinsalzmassiv

C ANPASSUNG UND WEITERENTWICKLUNG DER KERNMATERIAL-ÜBERWACHUNG AN DIE BEDINGUNGEN DER DIREKTEN ENDLAGERUNG

C1 Erstellung und Anpassung von Überwachungskonzepten

KWA 3303/1 04/83 bis 03/85	KFA	Studie über Kernmaterialüberwachung bei der Direkten Endlagerung
KWA 3307/5 07/83 bis 12/83	NOELL	Untersuchung zur Überprüfung der Zugänglichkeit von abgebrannten Brennelementen
02 E 8371/9 01/91 bis 03/94	DBE	Untersuchung der Nichtrückholbarkeit von eingelagertem Kernmaterial
02 W 6174 02/94 bis 12/96	KFA	Nukleare Nichtverbreitung und Safeguards unter veränderten politischen und technischen Bedingungen

C2 Neue Techniken

02 E 8381 01/91 bis 06/94	BGR	Ortung und Überwachung von Brennelement-Behältern mit elektromagnetischen Reflexionsmessungen
------------------------------	-----	---

C3 Aufnahme, Auswertung, Zusammenführung und Fernübertragung von Daten

02 E 8735 01/95 bis 11/95	DBE	Untersuchung zur Verwendung von elektro-optischen Meßverfahren für Überwachungsmaßnahmen im Endlager
02 W 6194 02/94 bis 12/96	FZR	Miniaturisierter Vielkanalanaysator - Modul

Anhang 2.2 Abgeschlossene Fördervorhaben zur untertägigen Entsorgung chemotoxischer Abfälle

A WEITERENTWICKLUNG VON UNTERTAGEDEPONIEKONZEPTIONEN UNTER SICHERHEITSGESICHTSPUNKTEN

A1 Abfallcharakterisierung und -klassifizierung

02 C 0051 03/92 bis 05/95	GSF	Auswahl und Untersuchung untertagerelevanter Abfallarten
02 C 0284 01/95 bis 12/95	GRS Braunschweig	Erprobung und Anpassung ökotoxikologischer Methoden zur Bewertung UTD-relevanter Abfall-Eluate

A3 Weiterentwicklung von Einlagerungs-, Handhabungs- und Überwachungstechniken

02 WA 8937 07/89 bis 09/92	NGS	Experimentaluntersuchungen zur Ablagerung von Abfällen in Salzkavernen
02 C 0123 05/93 bis 01/96	Kali+Salz	Dickstoffverfahren zur langzeitsicheren Verbringung von chem./tox. Abfall-/Reststoffen mit bergbaueigenen Reststoffen als aushärtender Versatz in Hohlräume des Kalibergbaus bzw. zur Resthohlraumverfüllung
02 C 0183 10/93 bis 05/96	RWTH Aachen	Gegenüberstellung und vergleichende Bewertung unterschiedlicher Konzepte zur untertägigen Deponierung chem./tox. Abfälle
02 C 0214 01/94 bis 03/96	Uni Konstanz	Vergleich von oberirdischer und untertägiger Entsorgung umweltgefährdender Stoffe unter Berücksichtigung von Langzeiteffekten
02 C 0334 01/95 bis 01/96	K-UTEC	Entsorgung von Autoshredder-Leichtfraktion mit dem Dickstoffverfahren in untertägige Hohlräume des Kalibergbaus - Erarbeitung der Verfahrensgrundlagen -

A4 Charakterisierung und Eigenschaften potentieller Wirtsgesteinsformationen

02 C 0011 10/91 bis 07/95	TU BAF	Systemanalyse über die Nutzung untertägiger Hohlräume des Steinkohlen-, Erz-, Salz- und Kalkbergbaus zur umweltverträglichen Verbringung von Abfällen mit chem./tox. Inhaltsstoffen
02 C 0102 01/93 bis 01/95	Fraunhofer	Inverse Methoden der Schallemissionsanalyse zur quantitat. Bestimmung von Auflockerungszonen insbes. der Lage, der Orientierung und der Bruchfläche von Rissen im Wirtsgestein von UTD
02 C 0204 01/94 bis 12/95	GRS Braunschweig	Untersuchungen zur Auflockerungszone um Hohlräume im Steinsalzgebirge

A5 Geotechnische Barrieren

02 C 0234 03/94 bis 12/95	GSF	Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken - Vorprojekt -
------------------------------	-----	--

B VERBESSERUNG VON INSTRUMENTARIEN FÜR DIE SICHERHEITSBEWERTUNG VON UNTERTAGEDEPONIEN

B1 Szenarienentwicklung

02 C 0314 05/95 bis 06/96	TU BAF	Interdisziplinäre Untersuchungen zur Langzeitsicherheit einer UTD im Salinar unter dem Gesichtspunkt des Lösungszutritts - Präzisierung der Anforderungen für eine Modellierung -
02 C 0324 04/95 bis 06/96	K-UTEC	Interdisziplinäre Untersuchungen zur Langzeitsicherheit einer UTD unter dem Gesichtspunkt eines Lösungszutritts - Zusammenstellung und Bewertung von Beobachtungen in der Natur -
02 C 0344 08/95 bis 04/97	TU BAF	Flutungsphänomene als Fluidbarriere

B2 Verhalten der Wirtsgesteinsformation

02 C 0062 04/92 bis 03/95	IfG Leipzig	Untersuchungen zur Langzeitsicherheit von Endlagern für umweltgefährdende Abfälle in Salzformationen der flachen Lagerung im Zusammenhang mit dem Verformungs- und Bruchverhalten in und um Grubengebäude
02 C 0092 11/92 bis 11/96	TU Clausthal	Modellversuche an axial gelochten Steinsalz-Großbohrkernen im Hinblick auf die Überprüfung und Erweiterung theoretischer Prognosemodelle zum Sicherheitsnachweis von Untertagedeponien

B3 Chemische und physikalische Effekte im Nahfeld

02 C 0021 10/91 bis 07/95	TU Berlin	Untersuchung des Langzeitverhaltens in situ-verfestigter Abfallstoffe in untertägigen Hohlräumen
02 C 0031 10/91 bis 06/95	TU Clausthal	Untersuchungen zum Langzeitverhalten chem. immobiliert. Abfall- und Reststoffe in untertägigen Hohlräumen
02 C 0072 10/92 bis 11/95	GRS Braunschweig	Exemplarische Untersuchungen von Wechselwirkungsreaktionen chem./tox. Abfälle mit hochsalinaren Lösungen
02 C 0082 11/92 bis 12/95	TU Braunschweig	Der Einfluß des interaktiven Verhaltens von Gebirge und Deponat auf die geotechnische Sicherheitsbeurteilung unterirdischer Entsorgungsanlagen
02 C 0163 07/93 bis 12/95	GRS Braunschweig	Gaserzeugung und -freisetzung in Abfällen und deren Ausbreitung im umgebenden Gebirge
02 C 0173 07/93 bis 12/95	GRS Braunschweig	Charakterisierung von mineralisierten Tiefengrundwässern in nichtsalinaren Festgesteinen - Untersuchung von Wechselwirkungsreaktionen mit Abfällen bei der immisionsneutralen Ablagerung

02 C 0435 01/96 bis 06/96	GRS Braunschweig	Charakterisierung von mineralisierten Tiefengrundwässern in nichtsalinaren Festgesteinen - Untersuchungen von Wechselwirkungsreaktionen mit Abfällen bei der immisionsneutralen Ablagerung
02 C 0445 01/96 bis 06/96	GRS Braunschweig	Gaserzeugung und -freisetzung in Abfällen und deren Ausbreitung im umgebenden Gebirge

B4 Verhalten von geotechnischen Barrieren

02 C 0304 12/94 bis 03/97	TU Clausthal	Entwicklung und Erprobung von kontrollierbaren Verfahren zur Verbesserung der Barrierenwirkung des nicht-salinaren Wirtsgesteins oder Deckgebirges im Bereich von Auflockerungs- und Störzonen
------------------------------	--------------	--

B6 Methodenentwicklung und Rechenprogramme für Sicherheitsbewertungen

02 C 0153 07/93 bis 12/95	GRS Braunschweig	Entwicklung eines Nahbereichsmodells für Langzeitsicherheitsanalysen von Salzkavernen mit chem./tox. Abfällen
02 C 0254 10/94 bis 12/95	GRS Braunschweig	Entwicklung eines schnellen Programms zur Modellierung von Grundwasserströmungen mit variabler Dichte
02 C 0455 01/96 bis 06/96	GRS Braunschweig	Entwicklung eines Nahbereichsmodells für Langzeitsicherheitsanalysen von Salzkavernen mit chem./tox. Abfällen