

# **Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bei der Endla- gerung radioaktiver Abfälle (2007 – 2010)**

**Förderkonzept des  
Bundesministerium für Wirtschaft  
und Technologie**

Dezember 2007

# **Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (2007 – 2010)**

herausgegeben von

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie  
Referat III B 3

und

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe  
Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE)

Dezember 2007

Im vorliegenden Förderkonzept werden die Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle dargestellt. Diese Zusammenstellung ist eine Fortschreibung und Aktualisierung des Förderkonzepts „Forschungsförderung zur Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen (1997 – 2001)“ - gemeinsam vom BMBF, Referat 414 und dem Projektträger Entsorgung im April 1998 herausgegeben - und des Förderkonzepts „Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (2002 – 2006)“ – gemeinsam vom BMWi, Referat III B 3, und dem Projektträger Wassertechnologie und Entsorgung im November 2001 herausgegeben.

Das vorliegende Förderkonzept ist Arbeitsgrundlage des BMWi und Basis für Beratungen durch Sachverständige. Es dient ferner dazu Forschungsstellen zu informieren, die an der Bearbeitung von FuE-Themen mitwirken wollen.

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung .....	1
2. FuE-Arbeiten zur Endlagerung im Wirtsgestein Steinsalz .....	2
2.1. Bisherige Arbeiten und Kenntnisstand.....	2
2.2. Laufende Arbeiten und Perspektive.....	10
3. FuE-Arbeiten zur Endlagerung im Wirtsgestein Tonstein / Ton.....	20
3.1. Bisherige Arbeiten und Kenntnisstand.....	20
3.2. Laufende Arbeiten und Perspektive.....	23
4. FuE-Arbeiten zur Endlagerung im Wirtsgestein Granit (kristalline Gesteine) .....	25
4.1. Bisherige Arbeiten und Kenntnisstand.....	25
4.2. Laufende Arbeiten und Perspektive.....	27
5. FuE-Schwerpunkte und FuE-Themen .....	29
5.1. A Endlagerkonzepte und Endlagerteilbereiche .....	31
5.2. B Daten und Instrumente für die Sicherheitsanalyse .....	32
5.3. C Kernmaterialüberwachung .....	34
6. Literatur .....	36
Anhang 1 Verzeichnis laufender Forschungsvorhaben (ELA und KMÜ)* .....	38
Anhang 2 Verzeichnis abgeschlossener Forschungsvorhaben (ELA und KMÜ)* ...	44
Anhang 3 Verzeichnis laufender Forschungsvorhaben (UTD und AB)* .....	65
Anhang 4 Verzeichnis abgeschlossener Forschungsvorhaben (UTD und AB)* .....	71
Anhang 5 Verzeichnis verwendeter Abkürzungen .....	81

\*)

ELA: Endlagerung radioaktiver Abfälle

KMÜ: Kernmaterialüberwachung

UTD: Untertagedeponierung gefährlicher Abfälle

AB: Altbergbau



## 1. Einleitung

Das vorliegende Förderkonzept ist die Basis für die Förderung der anwendungsbezogenen Grundlagenforschung des Bundes auf dem Gebiet der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Es schreibt die im April 1998 und im November 2001 veröffentlichten Förderkonzepte zur Endlagerung radioaktiver Abfälle fort und aktualisiert die in Betracht kommenden Forschungs- und Entwicklungsthemen. Es berücksichtigt in seiner Ausrichtung die Ergebnisse der langjährigen nationalen und internationalen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle sowie institutionell finanzierte FuE-Aktivitäten. Das Förderkonzept ist mit den in Deutschland maßgeblich auf diesem Gebiet arbeitenden Institutionen abgestimmt.

Anwendungsbezogene Grundlagenforschung im Sinne dieses Förderkonzepts ist „... Grundlagenforschung, die ausgeführt wird mit der Erwartung, dass sie langfristig eine breite Wissensgrundlage schafft, die als Ausgangsbasis für die Lösung erkannter oder erwarteter, bestehender oder künftiger Probleme oder Entwicklungen dient“ (in Anlehnung an das Frascati-Handbuch der OECDE, vgl. BMWi-Vordruck 0102/06.06).

Bisher waren Ziele der anwendungsbezogenen Grundlagenforschung:

- die Realisierung eines Endlagers für Wärme erzeugende, hochradioaktive Abfälle sowie abgebrannten Kernbrennstoff durch die Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik zu ermöglichen,
- die Schaffung und Weiterentwicklung wissenschaftlich-technischer Kompetenz und der Beitrag zu deren Erhalt im Bereich der nuklearen Entsorgung in Deutschland.

Alle bisher gewonnenen wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse bestätigen, dass die Realisierung eines Endlagers für Wärme entwickelnde Abfälle im Steinsalz möglich ist.

Diese grundlegenden Erkenntnisse untermauern die Machbarkeit der sicheren Endlagerung in einem konkreten Projekt. Darüber hinaus sollen die künftigen Forschungsarbeiten im Hinblick auf die überragende Bedeutung der Endlagersicherheit dazu beitragen:

- die Aussagesicherheit von Analysen zu verbessern,
- die Genauigkeit dazu benötigter Parameter zu erhöhen,
- Einzelfragestellungen zu behandeln mit dem Ziel, eine höhere Robustheit des Gesamtsystems zu erreichen,
- die Ergebnisse der rechnerischen Simulation komplexer Systeme durch Labor- und Feldversuche experimentell zu überprüfen,
- das Vorgehen bei der Erstellung des Safety Case auf Plausibilität und Systematik zu prüfen und ständig weiter zu entwickeln,
- den Stand der Wissenschaft praktisch anwendbar zu machen.

Die anwendungsbezogene Grundlagenforschung konzentriert sich daher im Hinblick auf eine zügige und zielstrebige Lösung der Endlagerfrage auf folgende Schwerpunkte:

- die Entwicklung von Sicherheitsnachweiskonzepten und die Schaffung der notwendigen Grundlagen für Systemanalysen, die konform mit den Anforderungen eines Planfeststellungsverfahrens sind,
- die Überführung der für die Errichtung, den Betrieb und den Verschluss eines Endlagers notwendigen technischen und sonstigen Lösungen in den Stand der Technik, einschließlich der Maßnahmen zur Kernmaterialüberwachung,
- die Förderung wissenschaftlich-technischer Kompetenz auf hohem Niveau.

Aufgrund der im Jahr 2000 von der Bundesregierung getroffenen Entscheidungen wurden in der Phase der Projektförderung von 2002 bis 2006 mit höchster Priorität FuE-Vorhaben zu alternativen Wirtsgesteinen gefördert. Etwa die Hälfte der Vorhaben und der eingesetzten Mittel hatten Bezug zu Endlagersystemen in Ton oder Tonstein. Arbeiten zu Salz, zu Systeme-

men im Kristallin und zu übergreifenden Themen, z. B. der Sicherheitsanalyse, machten zu jeweils etwa gleicher Zahl und mit gleichem Finanzumfang die andere Hälfte aus.

In der Phase von 2007 bis 2010 werden mit höchster Priorität FuE-Arbeiten zu noch nicht abgeschlossenen Fragestellungen der Endlagerung im Steinsalz durchgeführt. Parallel zu diesen Arbeiten soll der wissenschaftlich-technische Kenntnisstand zur Endlagerung Wärme entwickelnder Abfälle in Tonsteinen auf einen möglichst hohen Stand gebracht werden. Fragestellungen zur Endlagerung in kristallinen Gesteinen sollen nur ergänzend bearbeitet werden.

Die Mitarbeit in ausgewählten Projekten in europäischen Untertagelaboren, die auf die Verbesserung des für die Sicherheitsbewertung von Endlagerkonzepten notwendigen Systemverständnisses und den Test von technischem Equipment und Verfahren ausgerichtet ist, hat weiterhin hohen Stellenwert. Schwerpunkt sind Untersuchungen in Untertagelaboren in Tonstein. Arbeiten in Untertagelaboren in kristallinen Gesteinen (Granit) werden bezogen auf spezifische Fragestellungen fortgesetzt.

Diese veränderte Ausrichtung und Zielsetzung wird ein verstärktes Engagement der Forscher und die entsprechende Ausstattung der Forschungseinrichtungen mit Ressourcen (Personal und Mittel) erforderlich machen. Die Hochschulforschung und die Förderung wissenschaftlichen Nachwuchses haben besonderen Stellenwert.

In der Phase 2002 bis 2006 konnten 78 FuE-Vorhaben bewilligt werden, von denen 36 zwischenzeitlich abgeschlossen sind. 23 Vorhaben haben Laufzeiten bis in das Jahr 2008 und darüber hinaus. Vor diesem Hintergrund wird deutlich, welcher Arbeitsumfang in einer vierjährigen Phase des Förderkonzepts geleistet werden kann und welche Ergebnisse für die praktische Umsetzung in Endlagerprojekten verfügbar sein können, erfolgreichen Abschluss der FuE-Vorhaben vorausgesetzt.

Die Erkenntnisse stellen die belastbare Grundlage für den Einstieg in ein Genehmigungsverfahren dar. Mit dem Einstieg werden veränderte Schwerpunkte und Anforderungen zu einer Neuausrichtung der anwendungsbezogenen Grundlagenforschung entsprechend dem Fortschritt des Endlagerprojektes führen.

## **2. FuE-Arbeiten zur Endlagerung im Wirtsgestein Steinsalz**

Aufgrund der in den 1960er Jahren begonnenen FuE-Arbeiten zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle im Wirtsgestein Steinsalz liegt nach über 40 Jahren institutioneller und projektgeförderter Forschung ein hoher Kenntnisstand vor.

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse der durch BMBF (vormals BMFT) und BMWi (zwischenzeitig BMWA) finanzierten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für den Bereich Endlagerung radioaktiver Abfälle dargestellt. An einigen Stellen wird auf Arbeiten zur Kernmaterialüberwachung und die seit 1988 durch BMBF geförderten Arbeiten zur untertägigen Entsorgung chemotoxischer Abfälle verwiesen. Ausführlichere Informationen dazu enthält das Förderkonzept Entsorgung (1997-2001).

### **2.1. Bisherige Arbeiten und Kenntnisstand**

Bereits 1957 wurden in einem Bericht der Amerikanischen Akademie der Wissenschaften 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, ebenso in einem Gutachten der Bundesanstalt für

Bodenforschung, der Vorgängerorganisation der jetzigen Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Alle Untersuchungen führten zu dem Ergebnis, dass Steinsalz als Wirtsgestein für die Endlagerung von Wärme entwickelnden Abfällen grundsätzlich geeignet ist.

Die für die Endlagerung wichtigen Eigenschaften von Steinsalz sind dessen plastisches Verhalten, das insbesondere bei der Endlagerung Wärme entwickelnder Abfälle zu einem raschen Verschließen von Rissen und Hohlräumen führt, die im Vergleich zu anderen Endlagermedien hohe Wärmeleitfähigkeit und die nachgewiesene geringe Durchlässigkeit gegenüber Wasserzuflüssen von außen im geogenen, ungestörten Zustand. Dazu kommen die insbesondere in Deutschland vorhandenen Erfahrungen mit der Erstellung von Hohlräumen im Salz aus dem Gewinnungsbergbau auch in großer Tiefe.

In den 1980er Jahren erfolgten Überlegungen zu Alternativen für die damals präferierte Option, abgebrannte Brennelemente wieder aufzuarbeiten und später den hochaktiven Abfall endzulagern; offene und geschlossene Brennstoffzyklen wurden gegenübergestellt. Die Option abgebrannte Brennelemente direkt endzulagern wurde in Erwägung gezogen (s. a. KfK-3000) und ab 1985 im Rahmen von FuE-Aktivitäten untersucht. Wesentlicher Bestandteil dieser Aktivitäten, die 1995 beendet wurden, war das Forschungsprogramm **Direkte Endlagerung (s. A1, die Verweise A1-A6 und B1-B7 beziehen sich auf die Schwerpunktthemen des Abschnitts 5.)**, das die Entwicklung dieser Entsorgungsoption bis zur technischen Reife zum Ziel hatte. Es bestand aus vier Teilprojekten, die die Konditionierung des Brennstoffs und die Behälterentwicklung, Demonstrationsversuche, das konzeptuelle Design des Endlagersystems und Labortests sowie Untersuchungen zu Safeguards zum Gegenstand hatten.

Das technische Konzept, das bis heute Gültigkeit hat, geht von der Einlagerung großer selbstabschirmender Behälter (POLLUX-Behälter) in Strecken aus. Die Hauptkomponenten wurden in Großversuchen erprobt (Demonstrationsversuche Handhabungs- und Schachttransporttechnik für große und schwere Lasten, Demonstrationsversuch zum Verhalten des Versatzes und des Wirtsgesteins bei der Streckenlagerung). Im konzeptionellen Teil der Arbeiten wurden verschiedene Einlagerungsoptionen wie z. B. die gemeinsame Einlagerung von Wiederaufarbeitungsabfällen zusammen mit direkt endzulagernden Brennelementen betrachtet und dazu sicherheitsanalytische Studien durchgeführt. Die Technik der Direkten Endlagerung wurde ebenfalls für die abgebrannten Brennelemente aus den deutschen Hochtemperaturreaktoren entwickelt.

Neben der Entwicklung eines Safeguardskonzeptes für ein Endlager mit abgebrannten Brennelementen in Übereinstimmung mit IAEA-Anforderungen wurde die Frage der Rückholbarkeit bearbeitet. Eine Studie zur Rückholbarkeit hat gezeigt, dass es grundsätzlich möglich ist, die großen und schweren POLLUX-Behälter aus einem Endlager zurück zu holen, jedoch mit hohem technischem und finanziellem Aufwand.

Das Programm Direkte Endlagerung wurde im Dezember 1995 erfolgreich beendet. Die direkte Endlagerung erwies sich als praktikabel. Genehmigungsfähige Systeme zur Konditionierung und Handhabung im Endlager sind technisch realisierbar.

Als politische Entsprechung hierzu ist schon am 20. Juli 1994 das 7. Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes („Artikelgesetz“), mit dem der Vorrang der Wiederaufarbeitung vor der Direkten Endlagerung aufgehoben wurde, in Kraft getreten.

Nach der Entscheidung die Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente im Ausland zu beenden – festgeschrieben in der AtG-Novelle vom 27. April 2002 - ist die Direkte Endlagerung heute die einzige Entsorgungsoption.

Zu **Abfälle und Gebinde (technische Barrieren) (s. A2)** vgl. untenstehende Ausführungen zur geochemisch-technischen Barriere (B3) und zu technischen und geotechnischen Barrieren (B4).

Die gesamte **Handhabungstechnik (s. A3)** für die Einlagerung von hochaktiven Abfällen in Bohrlöchern wurde im Maßstab 1:1 entwickelt und erfolgreich erprobt. Diese umfasst Transportbehälter und Transportfahrzeug für die Förderung von hochradioaktiven Quellen nach unter Tage, die oben bereits erwähnte Schachttransporttechnik, die Einlagerungsmaschine sowie die Bohrlochabschirmung.

Die Untersuchungen zur **Bohr- und Einlagerungstechnik (s. A3)** wurden erfolgreich abgeschlossen. Hochaktive und Wärme entwickelnde mittelaktive Abfälle sollen entsprechend dem deutschen Endlagerkonzept in tiefen Bohrlöchern im Salz endgelagert werden. Da 300 bis 600 m tiefe Bohrlöcher mit Durchmessern von 600 mm und darüber nicht mit herkömmlichen Trockenbohrverfahren erstellt werden konnten, wurden sogenannte Schleusenbohrköpfe mit automatischer Richtungskorrektur und Ausbringung des Bohrkleins mittels Druckluft entwickelt. Diese neue Technik wurde im Forschungsbergwerk Asse erfolgreich erprobt. Nach der erfolgreichen Erstellung von zwei rund 180 m tiefen Bohrschächten von 3,5 m Durchmesser steht zudem eine Technik zur Erstellung von Großbohrlöchern zur Verfügung, in denen nicht Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle oder chemotoxische Abfälle als Masengut endgelagert werden könnten.

Grundlegende Kenntnisse über das Verhalten des **Wirtsgesteins (s. A4)** und der **Geochemisch-technischen Barrieren (s. B3)** wurden bereits vor oder während der Phase 1997 bis 2001 des Förderkonzepts gewonnen. So wurden Informationen zu im Nahfeld ablaufenden Prozessen bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Salz aus Versuchen erhalten, in denen die Einwirkung von Wärme und Strahlung auf Steinsalz mit elektrischen Erhitzern und Co-60-Quellen (Laugenmigrationstest) im Forschungsbergwerk Asse simuliert wurde. Bei den Erhitzerversuchen wurde eine so geringe Freisetzung von Feuchte in das Bohrloch festgestellt, dass eine Korrosion von Einlagerungsbehältern für hochaktiven Abfall nicht zu besorgen wäre. Die Freisetzung von Kristallwasser aus Steinsalz wurde erst oberhalb von 230°C beobachtet. Die für die Endlagerplanung konzeptuell vorgesehene Auslegungstemperatur von 200°C liegt deutlich darunter. Im Steinsalz schließen sich Hohlräume aufgrund der guten Kriecheigenschaften bei hohen Temperaturen sehr schnell. Im Laugenmigrationstest wurde eine nur geringe, auf die engere Umgebung beschränkte Veränderung der Kristallstruktur des Salzes durch Strahlung (z. B. Bildung von Farbzentren) unter den später im Endlager herrschenden Temperaturverhältnissen beobachtet.

Kenntnisse zu den **Wirtsgesteinseigenschaften (s. A4)** sind nicht nur im Hinblick auf die konzeptionelle Gestaltung eines Endlagers, in der sowohl die Endlagertechnik als auch das Barriersystem zu beachten ist, sondern auch im Hinblick auf die Sicherheit eines Endlagers (Barrierenintegrität) wichtig. Mineralogisch-petrographische und geochemische Untersuchungen sowie geochemische Modellierung trugen dazu bei, den festen, flüssigen und gasförmigen Stoffbestand der geologischen Barriere Steinsalz aufzuklären. Diese Informationen dienen zur Interpretation sowohl der Genese eines Evaporitkörpers als auch der Prozesse, die im Laufe geologischer Zeit abgelaufen sind und zu beobachtbaren Veränderungen geführt haben. Aus diesen können Schlüsse auf die zukünftige Entwicklung gezogen werden.

Durch die Kombination verschiedener experimenteller Methoden und Modelle zur Untersuchung an Lösungseinschlüssen, an den in Salzschieben 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 nachgewiesen werden, dass die für Endlagerung vorgesehenen Teile des Salzstocks Gorleben seit 250 Mio. Jahren gegenüber wässrigen Lösungen aus dem Deckgebirge und dem Nebengestein isoliert wa-

ren. Seit dieser Zeit also hat kein Fluidzutritt zu diesen Bereichen des Salzstocks stattgefunden; das Salz hat als natürliche, geologische Barriere gewirkt. Damit ist ein wesentlicher Beitrag zur Eignungsaussage geleistet. In jüngsten Untersuchungen wurde in einem BMBF-geförderten Vorhaben (Förderkennzeichen 02C0841) die geologische Stabilität der geologischen Barriere Steinsalz durch Untersuchungen des geogenen Gasinventars nochmals betätigt.

Auch das mechanische Verhalten der Salzformation, d. h. des Steinsalzes und der anderen darin vorkommenden Gesteine (z. B. Carnallit, Anhydrit, Salzton) spielt für die Vorhersage 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 chemisch-mineralogische 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.

Mit dem Verbundvorhaben BARIAN (Förderkennzeichen 02E9582 / 02E9592), dessen Phase II im Jahr 2004 endete, wurde das Barriereverhalten von Anhydrit bei großräumigen Spannungsumlagerungen eingehend und abschließend untersucht. Mit den Ergebnissen konnte ein wichtiger Beitrag zur sicherheitstechnischen Einschätzung des Anhydrits (sog. Anhydritszenario) erbracht werden.

Der aktuelle Stand, die Möglichkeiten und Grenzen vorhandener, aktueller Steinsalzstoffgesetze wurden in einem von BMBF geförderten, im Jahr 2006 abgeschlossenen Verbundvorhaben überprüft und bewertet. In einer zweiten Phase erfolgen 3D-Modellrechnungen zum mechanischen Langzeitverhalten eines realen Untertagebauwerkes.

Umfassende Arbeiten zum **Geotechnischen Barriersystem (s. A5)** eines Endlagers im Steinsalz sind in den vergangenen Jahrzehnten realisiert worden. Aus dem großmaßstäblichen TSS-Versuch (Thermische Simulation der Streckenlagerung), als ein Teil des Unterprogramms Demonstrationsversuche im Programm Direkte Endlagerung geplant, wurden wichtige Erkenntnisse zum Verhalten sowohl des Versatzmaterials Salzgrus als auch zum Wirtsgestein Steinsalz gewonnen. Im Jahr 2004 wurde mit diesem Vorhaben (auch **TSDE – Thermal Simulation of Drift Emplacement**, bzw. im 5. Forschungsrahmenprogramm der EC **BAMBUS II** genannt), der letzte großmaßstäbliche In-situ-Versuch aus einer Reihe von In-situ-Untersuchungen abgeschlossen, deren Ergebnisse bezüglich der Eignung des Wirtsgesteins Salz die Erwartungen im positiven Sinne übertroffen haben.

Aus wissenschaftlicher Sicht sind im Rahmen dieses Förderkonzepts noch einige gezielte In-situ-Untersuchungen und Demonstrationsvorhaben im Steinsalz unverzichtbar.

In der **Geologischen Barriere (s. B2)** (Fernfeld) beeinflussen Prozesse wie Sorption, Komplexierung, Redoxreaktionen und Verdünnung den Transport von Radionukliden entscheidend, falls es zu einer Freisetzung mobilisierter und aus dem Nahbereich des Endlagers transportierter Radionuklide kommen sollte. Die Beschreibbarkeit der Sorption durch Oberflächenkomplexierung wurde durch Nachrechnen von Säulenversuchen mit gekoppelten Transport-Speziations-Codes überprüft. Die Sorption ausgewählter Radionuklide (U, Eu, Cm) sowie analoger Lanthanide an Quarz wurde unter Einsatz der zeitaufgelösten Laserfluoreszenz-Spektroskopie untersucht. Untersuchungen zur Wechselwirkung von Radionukliden mit Grundwasserkolloiden erfolgten mit der neu entwickelten Laserinduzierten Breakdown-Detektion (LIBD) Spektroskopie. Diese Untersuchungen verbessern die Kenntnis zu den Reaktionsmechanismen der jeweils ablaufenden Einzelprozesse und werden im Rahmen

eines standortbezogenen Langzeitsicherheitsnachweises eine thermodynamisch fundierte Quantifizierung mobiler Actiniden- oder Spaltproduktspezies ermöglichen.

Um die Radionuklidenausbreitung im Rahmen sicherheitsanalytisch relevanter Szenarien beurteilen zu können, wurden seit 1995 Untersuchungen zum Migrationsverhalten in wasserführendem Deckgebirge im Rahmen eines Verbundvorhabens („Huminstoff-Verbund“) durchgeführt. Der Verbund hatte anfangs seine Arbeiten auf eine mit den Gorleben-Aquiferen vergleichbare Situation konzentriert. Zur Komplexierung von Radionukliden unter naturnahen Bedingungen in Gesteins-Huminstoff-Systemen mit Lösungen hoher Ionenstärke wurden wichtige Daten für die geochemische Modellierung ermittelt. Die grundlegenden Untersuchungen zum Komplexierungsverhalten von gezielt synthetisierten Huminstoff-Analoga haben wesentlich zu einer Verbesserung des Kenntnisstands der zugrunde liegenden Prozesse beigetragen. Der Schwerpunkt der Aktivitäten in der von 2002 bis 2006 währenden Phase verschob sich auf das System Ton - Huminstoff - Aquifer.

Ein weiteres wichtiges Teilgebiet zum Verständnis des langfristigen Verhaltens eines Endlagersystems und der Daten für sicherheitsanalytische Berechnungen befasst sich mit der **Geochemisch-technischen Barriere (s. B3)** des Endlagersystems. Dabei liegt ein Hauptaugenmerk auf der Geochemie der Actiniden und der für Prognoserechnungen erforderlichen thermodynamischen Datenbasis. Die grundlegenden Untersuchungen zu physikalisch-chemischen Eigenschaften der Actiniden erforderten die Entwicklung hochempfindlicher laserspektroskopischer Speziationmethoden. Die Speziation von U(VI) und Am(III) wurde mit der neuentwickelten Laserinduzierten Photoakustischen Spektroskopie (LIPAS) und die geochemisch wichtigsten Reaktionen von Cm(III) als Repräsentant für trivalente Actinide mit Hilfe der zeitaufgelösten Laser-Fluoreszenzspektroskopie (TRLFS) untersucht. Aus spektroskopischen und Löslichkeitsuntersuchungen sowie aus isopiestic Messungen konnten thermodynamische Daten für tri-, penta- und hexavalente Actinide bei 25°C bestimmt werden. Diese wurden zur Parametrisierung des Ion-Wechselwirkungsmodells (Pitzer-Gleichungen) für drei- und fünfwertige Actiniden verwendet. Damit ist für diese Ionen die Prognose homogener und heterogener Gleichgewichte in aquatischen Systemen im gesamten relevanten Konzentrationsbereich grundsätzlich möglich, auch wenn die Datenbasis speziell für vierwertige Actiniden noch verbesserungswürdig erscheint.

Bei der Einlagerung von verglastem Abfall in Bohrlöchern in Steinsalzformationen können durch hohe Gamma-Strahlungsdosen **Strahlenschäden** im umgebenden Steinsalz auftreten. Dabei entstehen gasförmiges Chlor und kolloidales Natrium. Bei der Rekombination kann spontan Energie freigesetzt werden. Obwohl auf diesem Gebiet hauptsächlich im Rahmen von EU-Rahmenprogrammen gearbeitet wurde, konnte in einem national durch BMBF geförderten FuE-Vorhaben gezeigt werden, dass die für ein Endlager ermittelte Strahlenschädigung für eine Langzeitauswirkung unbedenklich ist. Dem Problem kann ferner durch geeignete technische Maßnahmen begegnet werden.

**Gasbildung und Gastransport** sind Themen mit Relevanz für die Sicherheit bei der Endlagerung in dichten Gesteinen wie Steinsalz oder Tongestein und von Bedeutung für die FuE-Schwerpunkte **Geologische Barriere (s. B2)** und **Technische und geotechnische Barrieren (s. B4)**.

In einem Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle in Steinsalz können – die Anwesenheit von Feuchte vorausgesetzt – grundsätzlich durch Prozesse wie Radiolyse, Abbau organischer Stoffe und Metallkorrosion Gase entstehen. Diese Gase können direkte radiologische Konsequenzen haben, wenn eine Ausbreitung radioaktiver Gase über den Gaspfad aus dem Endlager heraus erfolgt. Sie können durch Gasdruckaufbau Einfluss auf die Integrität der geologischen Barriere sowie der geotechnischen und technischen Barrieren ausüben. Sie können auch den Transport von Lösungen (2-Phasenfluss) und weiteren Gasen und die Geochemie des Nahfelds beeinflussen. Im Rahmen von Langzeitsicherheitsanalysen sind diese Themenkomplexe zu berücksichtigen.

In Bezug auf Steinsalz konnten in den letzten Jahren deutliche Fortschritte auf den Themengebieten Gasbildung und Gastransport erzielt werden. Diese wurden auf einem Workshop im Jahr 2007 detaillierter im Themenkomplex Gasbildung, Beeinträchtigung der Integrität der Wirtsfornation und von Verschlussbauwerken, Transport von Gasen und Lösungen im Grubengebäude, Auswirkungen auf das chemische Milieu im Nahfeld sowie die Ausbreitung radioaktiver Gase über den Gaspfad diskutiert. Zusammenfassend lässt sich feststellen: Die grundlegenden Kenntnisse zu den Bildungsmechanismen und zum Gastransport sind vorhanden. Die Radiolyse führt zu Gasmengen, die im Vergleich zu den Mengen aus anderen Quellen vernachlässigbar sind. Die Radiolyse ist deshalb von untergeordneter Bedeutung für ein Endlager für Wärme erzeugende Abfälle. Auch der Abbau organischer Stoffe ist für HAW-Endlager im Steinsalz von nachrangiger Bedeutung.

Der dominante Prozess für die Gasentwicklung (Wasserstoffproduktion) ist die Behälterkorrosion. Anhand umfangreicher und detaillierter Korrosionsuntersuchungen an Behältermaterial liegen Kenntnisse zu Abtragungsraten vor, aus denen sich die Gasbildungsraten und damit Größenordnungen der gebildeten Gasmenge ableiten. Fragen zur Kinetik des Gesamtprozesses, der Gesamtwasserverfügbarkeit und die Wasserzutrittsrate sind insbesondere bei der Betrachtung von Szenarien, die nicht den Normalbetrieb betreffen, von Relevanz für die Sicherheitsanalyse.

Die bislang geltenden Vorstellungen zur Auswirkung des Gasdrucks, d. h. das Frac-Szenario und die Bildung einer Sekundärporosität, sind zu revidieren (jüngste Untersuchungen des Instituts für Gebirgsmechanik, Leipzig). So erfolgt Fracen mit Zerstörung der Kristallstruktur nur bei einem sehr schnellen Druckanstieg. Dieser ist in einem HAW-Endlager nicht zu besorgen. Weitere Untersuchungen weisen darauf hin, dass die Sekundärpermeabilität wesentlich ist. Diese Phänomene sind vergleichbar auch in Tongesteinen beobachtet worden.

Im Laufe des oben genannten Workshops ist auch klar geworden, dass noch Untersuchungsbedarf hinsichtlich Gasdruckaufbau und –wirkung auf die geotechnischen Barrieren sowie über die Reichweite der Gasausbreitung (d. h. innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs) und damit zu Aussagen zur sicherheitsanalytischen Belastbarkeit besteht. Die Migration von Gasen im Steinsalz ist noch nicht vollständig verstanden.

Zum Transport von Lösungen und Gasen in porösen Medien (2-Phasen-Strömung) liegen mathematische Beschreibungen vor und entsprechende Codes sind verfügbar. Die Beschreibung der 2-Phasen-Strömung in Salzgrus gestaltet sich schwierig, da die Ermittlung der konstitutionellen Beziehungen experimentell sehr aufwändig ist.

Der entstehende Radiokohlenstoff ist unter Endlagerbedingungen (hoher Dosisbeitrag zu Beginn der Nachbetriebsphase des Endlagers) relevant. Das Verhalten radioaktiver, insbesondere Radiokohlenstoff enthaltender Gase und ihre Wechselwirkungsprozesse sind wegen des nicht unerheblichen Beitrags zur Dosisbelastung der Biosphäre detaillierter und quantifizierend zu beschreiben.

Die Entwicklung von **Methoden und die numerische Simulation (s. B5)** mit Rechenprogrammen für Langzeitsicherheitsanalysen war eine wesentliche Aufgabe der Forschung zur Langzeitsicherheit von Endlagern. Die umfassende Grundlage dazu war das im Zeitraum 1977-1984 durchgeführte "Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung" (PSE). In erster Linie wurden Störfallereignisse in Einrichtungen der nuklearen Entsorgung einschließlich des Endlagers analysiert. Die wesentlichen Elemente dieser Analyse sind zugrunde gelegte Störfallszenarien (Ereignisabläufe), die Sicherheit des gesamten Endlagersystems bestimmende physikalische und chemische Prozesse sowie die erforderlichen Daten zur Quantifizierung der Vorgänge. Die im Rahmen von PSE entwickelten Methoden und Rechenprogramme sind, in bedeutend weiterentwickelter und verbesserter Fassung, wesentlicher Bestandteil

des heute verfügbaren sicherheitsanalytischen Instrumentariums.

Eine der ersten Anwendungen der in PSE erarbeiteten Methodik war eine Systemanalyse für die Entsorgungskonzepte Wiederaufarbeitung und Direkte Endlagerung im Rahmen des FuE-Schwerpunktes Andere Entsorgungstechniken im Jahre 1984. Unter den damals zugrunde gelegten Annahmen für den nicht bestimmungsgemäßen Betrieb zeigten die Rechnungen, dass eine Nuklidfreisetzung weder aus dem Bereich der hochaktiven Wiederaufarbeitungsabfälle noch dem der endgelagerten Brennelemente stattfindet. Das aufgrund der hohen Temperatur erhöhte plastische Verhalten des Steinsalzes führt in beiden Fällen zu einem schnellen Verschließen der Hohlräume im Grubengebäude und verhindert das Vordringen von Salzlösungen in diese Bereiche.

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

Die Vorgehensweise bei den Langzeitsicherheitsanalysen war anfangs eine deterministische, das bedeutet Störfallereignisse wurden unterstellt und die Konsequenzen als feste Zahlenwerte errechnet. Die Frage nach der Eintrittswahrscheinlichkeit von Ereignissen oder nach der Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer bestimmten Kombination von Eingangsparametern für die Langzeitsicherheitsanalyse wurde nicht gestellt.

Wegen der langen Betrachtungszeiträume, wegen des unvollständigen Kenntnisstands zum System und aufgrund fehlender oder ungenauer Daten werden die Ergebnisse deterministischer Analysen immer mit Unsicherheiten behaftet sein. 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 sogenannten 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 diesem probabilistischen Ansatz kamen bei den durch die EU 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 berechnete Dosis hat.

Als deutsche Rechenprogramme, die den heutigen Stand des Wissens repräsentieren, sind das modular aufgebaute Programmpaket EMOS (**E**ndlager**M**odellierung von **S**zenarien) und der Code MARNIE zu nennen. Mit diesen Werkzeugen kann im Rahmen von Freisetzungsberechnungen der Dosisverlauf für sicherheitsrelevante Radionuklide bestimmt werden. Dabei werden basierend auf Szenarien die Ereignisabläufe in den Teilbereichen Wirtsgestein, Deckgebirge und Biosphäre rechentechnisch modelliert.

Das Programmsystem EMOS wird durch die Einbindung neu entwickelter bzw. überarbeiteter Module ständig weiter verbessert und erweitert.

Ein großer Fortschritt konnte mit der Entwicklung der Programme d<sup>3f</sup> und r<sup>3t</sup> erzielt werden, die in der Lage sind, für poröse Medien und dreidimensionale großräumige und komplex aufgebaute Modellgebiete Grundwasserbewegung und Radionuklidtransport dreidimensional

zu berechnen. Diese Programme sind die derzeit leistungsfähigsten Codes für die genannten Aufgaben. Nach umfassenden Testrechnungen werden diese Programmsysteme nun in einem Verbundvorhaben von vier Hochschulen und GRS hinsichtlich der expliziten Berücksichtigung von Klüften, der simultanen Berücksichtigung des Wärmetransports, der Berücksichtigung von freien Oberflächen, der Modellierung von Potentialströmungen und der Anpassung der Prä- und Postprozessoren erweitert. Das Anwendungsspektrum der beiden Rechenprogramme wird damit erheblich vergrößert.

Der internationale Status der Langzeitsicherheitsanalyse wurde 1991 durch das **Radioactive Waste Management Committee (RWMC)** der OECD-NEA in einer gemeinsamen Stellungnahme seiner Mitglieder bewertet. Das RWMC stellte bereits damals fest, dass 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 die Situation an Endlagerstandorten die technische Grundlage für eine Entscheidung darüber ermöglicht, ob bestimmte Endlager eine ausreichende Sicherheit für die gegenwärtigen und zukünftigen Generationen bieten.

Die **Qualifizierung von Modellen und die Reduzierung von Unsicherheiten (s. B6)** sind zwei wesentliche Punkte, die für die Bewertung der Aussagen und Ergebnisse von Modellrechnungen grundlegend sind.

Einen Beitrag zur Modellqualifizierung können die Ergebnisse aus Untersuchungen an natürlichen Analoga leisten. Die komplexen in der Natur ablaufenden Vorgänge können nur durch vereinfachte Modelle oder Teilmodelle beschrieben werden, die in Labor- oder in Feldexperimenten nachgestellt werden, in denen andere Randbedingungen (räumlich und zeitlich) als in natürlichen Systemen vorliegen. 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 für die Konstruktion von Modellen und für die Modellierung geben. 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 FuE-Aktivitäten initiiert worden, die auch international Beachtung gefunden haben. Für die Option Direkte Endlagerung von abgebrannten Brennelementen wurde als Teilprojekt des Programms Direkte Endlagerung ein Referenz-Überwachungskonzept für die **Kernmaterialüberwachung (s. C)** 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 den Endlagerschacht stützt. Dieses 1995 formulierte Konzept ist nach wie vor gültig.

Zum Zeitpunkt der Fertigstellung und Verbreitung des Förderkonzeptes für den Zeitraum von 1997 bis 2001 wurde für die künftigen FuE-Aktivitäten die folgende Schlussfolgerung gezogen: Weitere Forschung und Entwicklung ist notwendig, um den vorhandenen Wissensstand zu vertiefen, insbesondere um:

- die Grundlagen für eine rechtzeitige Bereitstellung von sicheren Endlagern für Wärme entwickelnde 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.

## **2.2. Laufende Arbeiten und Perspektive**

Wegen der bis zum Jahr 2005 reduzierten Haushaltsmittel und bedingt durch veränderte Randbedingungen - die Bundesregierung hatte 2000 eine Intensivierung der Arbeiten zu alternativen Wirtsgesteinen angestoßen - wurden die Arbeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle im Wirtsgestein Steinsalz systematisch eingeschränkt.

Derzeit durch BMWi geförderte und auf Steinsalz bezogene Projekte sind zum einen die wenigen, in die Integrierten Projekte ESDRED (Engineering Studies and Demonstration of Repository Designs) und NF-PRO (Understanding and Physical and Numerical Modelling of the Key Processes in the Near-field and their Coupling for Different Host Rocks and Repository Strategies) eingebundenen FuE-Vorhaben, die im 6. Forschungsrahmenprogramm der Europäischen Kommission kofinanziert werden. Zum anderen ist es ein nationales Projekt, das die Ermittlung von thermodynamischen Daten für Modellierungszwecke vorsieht.

Das deutsche Teilprojekt in ESDRED hat zum Ziel, die Machbarkeit der vertikalen Bohrloch-lagerung unzerschnittener bestrahlter Brennstäbe nachzuweisen und großmaßstäblich zu demonstrieren.

Die in NF-PRO bearbeiteten Steinsalz-relevanten Themen befassen sich zum einen mit den Auswirkungen der Auflockerungszone, zum anderen sind es Aktivitäten, mit denen die Nutzung der Ergebnisse des Projektes für Sicherheitsanalysen untersucht und bewertet werden soll.

Für die Sicherheitsbewertung untertägiger Entsorgungseinrichtungen im Wirtsgestein Steinsalz (sowohl Untertagedeponien als auch Endlager) wichtige FuE-Arbeiten werden über den Projektträger PTKA-WTE auch auf Grundlage und im Rahmen des Förderkonzeptes „Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen“ durch BMBF gefördert. So sind ein Großteil der Untersuchungen zu Konzeption, Bau und Erprobung von Verschlussbauwerken (Schacht- und Streckenverschlüsse), FuE-Vorhaben zur Verbesserung von geophysikalischen Verfahren zur Detektion von Inhomogenitäten sowie Arbeiten zur geochemischen Stabilität von Tonen / Bentoniten als Materialien für Verschlussbauwerke im hochsalinaren Milieu dort angesiedelt. Die grundsätzliche Übertragbarkeit dieser Konzepte auf die besonderen Anforderungen eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle ist gegeben.

Auf Grund des erreichten wissenschaftlichen Kenntnisstands zu Endlagersystemen im Wirtsgestein Steinsalz sind lediglich wenige Fragestellungen offen. Diese sollen durch die anwendungsbezogene Grundlagenforschung möglichst im Rahmen der Laufzeit dieses Förderkonzeptes bearbeitet und beantwortet werden. Darüber hinaus kommt Überlegungen und Aktivitäten zur Aufbereitung von FuE-Wissen in praktisch anwendbare und verfahrensfest belegbare Kenntnisse ein besonderes Augenmerk zu.

BMWi hat mehrere Aktivitäten veranlasst, die als wichtige Meilensteine auf dem Weg von der anwendungsbezogenen Grundlagenforschung hin zu einer standort- und anlagenbezogenen Forschung anzusehen sind.

Zum einen werden Monographien zur Endlagerforschung und zur Endlagertechnik bearbeitet, zum anderen erfolgt derzeit eine Bestandsaufnahme der Erkenntnisse aus abgeschlossenen FuE-Vorhaben. Schließlich sollen die im Rahmen dieses Förderkonzepts zu realisierenden systemanalytischen Arbeiten für Endlager in den Wirtsgesteinen Steinsalz und Tonstein Hinweise auf möglicherweise noch bestehende Lücken geben, die dann kurzfristig durch anwendungs- oder gegebenenfalls standortbezogene Grundlagenforschung zu schließen sind.

Von PTKA-WTE wurden die zu den Themen **Auflockerungszone**, **Radionuklidmigration** und **Modellierung der Radionuklidmigration** bislang durchgeführten FuE-Vorhaben gesichtet und bewertet. Externe Sachverständige haben den Teil 1 dieser Bestandsaufnahme geprüft und kommentiert. Die Schlussfolgerungen sind:

**Auflockerungszonen (ALZ)** können mittlerweile mit einer Reihe von zerstörenden und (weitgehend) zerstörungsfreien Methoden in Steinsalz, aber auch in den alternativen Wirtsgesteinen Tonstein und Granit detektiert und charakterisiert werden. Die vorliegenden Kenntnisse erlauben auch die Einbeziehung der ALZ in Sicherheitsanalysen, wobei das Prozessverständnis im Detail noch verbesserungsbedürftig ist.

In Bearbeitung befinden sich folgende Themen, zu denen noch zu klärende Fragestellungen existieren:

- der Prozess der zeitabhängigen Entwicklung und Rückbildung der hydraulischen Durchlässigkeit bzw. Permeabilität des Gesteins in der ALZ ist noch nicht vollumfänglich verstanden und wird derzeit auch international intensiv untersucht,
- die Entwicklung optimierter Konzepte von Verschlussystemen schließt weitere Überlegungen zum Umgang mit der ALZ, die z. B. ein Dichtelement umgibt, zwangsläufig ein.

Die Forschungsarbeiten zur **Radionuklidmigration** im Nahfeld eines Endlagers im Salinar können als weit fortgeschritten angesehen werden. Da sowohl Salzgestein als auch Salzgrus als Versatzmaterial Radionuklide praktisch nicht sorbieren, ist es von entscheidender Bedeutung, dass in einem Endlager im Steinsalz geologische Randbedingungen vorliegen, die das Eindringen von Wasser oder Salzlösungen ausschließen. Unter diesen Bedingungen wird keine Korrosion der Endlagerbehälter beobachtet. Für den Fall einer nicht bestimmungsgemäßen Entwicklung eines Endlagers im Salinar liegt ebenfalls ein umfassender Wissensstand zur Korrosion von Abfallprodukten und abgebrannten Brennelementen vor. Bezüglich einer möglichen Immobilisierung von Uran im Nahfeld zeigte sich, dass Hydroxylapatit als Zuschlagstoff im Versatz auch in Gegenwart hochsalinärer Lösungen mit Eisen aus Korrosionsprozessen eine Ausfällung von Uranylphosphaten bedingt, jedoch eine langfristige und vollständige Sorption des Urans nicht erfolgt. Weitere Untersuchungen geeigneter Zuschlagstoffe für die Rückhaltung schwer sorbierender anionischer Spezies zeigten bisher die prinzipielle Eignung von basischen Bleicarbonaten, Bleioxid, Kupferoxid und Eisenoxiden als Zuschlagstoffe. Ebenfalls wurden Dreischicht-Tonminerale durch Austausch der Zwischenschichtkationen durch organische Kationen auf ihre Eignung als Anionenadsorber untersucht. Die Langzeitstabilität unter endlagerrelevanten Bedingungen wird derzeit geprüft.

Ein weiterer Teil der Forschungsaktivitäten befasste sich mit dem Einfluss von Mikroorganismen, Huminstoffen und Kolloiden auf die Radionuklidmigration im Fernfeld und ist somit weitgehend unabhängig vom Wirtsgestein. Im Rahmen mikrobiologischer Arbeiten wurden bisher die Prozesse der Biosorption, der Bioakkumulation und der Biotransformation und die Speziation für ausgewählte Radionuklide in der Biomasse eingehender untersucht. Weitere

Arbeiten zur Wechselwirkung zwischen Mikroorganismen und Radionukliden durch Bioliganden, die komplexierende funktionelle Gruppen enthalten, befinden sich in der Durchführung. Neben Mikroorganismen sind hauptsächlich Huminstoffe sowie Kolloide maßgebliche Faktoren, welche die Transportprozesse von Radionukliden mit beeinflussen. Das Komplexierungsverhalten von Uran, Neptunium, Plutonium und Curium in Gegenwart von Huminsäure wurde eingehend untersucht, wobei sowohl aerobe als auch anaerobe Versuchsbedingungen berücksichtigt wurden. In weiteren Vorhaben wurden die grundlegenden Mechanismen der Fremd- und Eigenkolloidbildung von Radionukliden für die geochemischen Randbedingungen des Fernfeldes bearbeitet. Die Kolloidbildung im Nahfeld in Wechselwirkung mit Korrosionsprodukten des Behälters, der verglasten Abfälle und der Brennelemente ist noch zu untersuchen. Aktuell wird noch Forschungsbedarf zur Bildung von Sekundärphasen und deren retardierender Einfluss auf die Radionuklidsorption in unmittelbarer Umgebung der Behälter gesehen. Die derzeit vorherrschende Beschreibung der Sorption durch  $K_D$ -Werte, die sich auf ein thermodynamisches Gleichgewicht beziehen, ist nur bedingt korrekt, da kinetische Effekte maßgeblich die huminsäuregetragene Radionuklidmigration bestimmen.

Für Modellrechnungen zum Verhalten der Radionuklide in aquatischen Systemen werden Speziations- und Löslichkeitsdaten benötigt. Die bereits vorliegenden nicht-standort-spezifischen thermodynamischen Daten zeigen erhebliche Inkonsistenzen im Hinblick auf Vollständigkeit für die relevanten Elemente, den Speziationen mit den zugehörigen Bildungskonstanten und den Variationsbereichen von Temperatur, Dichte, Druck und Ionenstärke. Häufig liegen thermodynamische Daten nur für Standardbedingungen vor, die nicht auf endlagerrelevante Bedingungen (höherer Temperaturbereich, höhere Ionenstärke salinärer Lösungen) extrapoliert werden können. Geochemische Modellrechnungen sind dadurch mit Unsicherheiten belastet und die Relevanz der Ergebnisse für natürliche Systeme ist fraglich.

Innerhalb internationaler Kooperationen in Untertagelaboratorien in der Schweiz (Tonstein, Granit), in Frankreich (Tonstein), in Belgien (plastischer Ton) und in Schweden (Granit) wird an der Thematik Radionuklidmigration im Nahfeld eines Endlagers in alternativen Wirtsgesteinen gearbeitet.

Zur **Radionuklidmigration** sind folgende Themenbereiche im Rahmen aktueller FuE-Vorhaben in Bearbeitung oder beinhalten noch offene, zu klärende Fragestellungen:

- Vervollständigung der Thermodynamischen Daten speziell für salinare Nahfeldbedingungen einschließlich der Erstellung einer Referenzdatenbasis,
- Bildung von Sekundärphasen in Folge von Behälter- und Abfallmatrixkorrosion und deren retardierender Einfluss auf die Radionuklidsorption,
- Rückhaltung gering sorbierender Radionuklide,
- Wechselwirkungsmechanismen von Mikroorganismen, Huminstoffen und Kolloiden mit Radionukliden im Nah- und Fernfeld des Endlagers und Modellierung der Radionuklidmigration.

Die FuE-Aktivitäten mit Bezug zur **Modellierung der Radionuklidmigration** respektive der Transportmodellierung befassten und befassen sich mit der Entwicklung, der Weiterentwicklung, dem Test und dem Einsatz des erforderlichen programmtechnischen Instrumentariums. Dies betrifft insbesondere die Weiterentwicklung und den Test von EMOS (**E**ndlager**M**odellierung von **S**zenarien), einem Programmsystem mit dem die Langzeitsicherheit eines Endlagersystems bewertet werden kann – und seinen jeweiligen Modulen. EMOS kann für verschiedene Endlagertypen in Salz, Granit oder Tonformationen eingesetzt werden. Es existieren Module, die die Freisetzung von Schadstoffen aus dem Nahfeld (REPOS, LOPOS, GRAPOS, CLAYPOS und – für eine Variante der Untertagedeponie, die Deponiekaverne – KAKTOS), den Transport durch das Fernfeld (CHETLIN, CHETNIS, CHETMAD/-C, und TRAPIC) und die daraus folgende jährliche Strahlenexposition in der Biosphäre (EXCON und EXMAS) auf Grund verschiedener Expositionspfade beschreiben können. Die Entwicklung bzw. Weiterentwicklung und der Test bzw. Einsatz von EMOS im Rahmen von EU-Projekten

oder nationalen Projekten hat in den letzten Jahren zu einem weit fortgeschrittenen Werkzeug geführt, das zur Durchführung deterministischer und probabilistischer Sicherheitsanalysen für Endlager in Salz, Kristallin und Tongestein benutzt werden kann.

Dies betraf aber auch die Entwicklung des Dichteströmungsprogramms  $d^{3f}$  (**d**istributed **d**ensity **d**riven **f**low) und des Transportprogramms  $r^{3t}$  (radionuclides, reaction, retardation, and transport). Mit  $d^{3f}$  können Dichteströmungen, die z. B. auf Grund von Versalzung auftreten, modelliert werden.  $r^{3t}$  dient zur Modellierung des Transports von chemotoxischen bzw. radioaktiven Schadstoffen durch das Fernfeld eines Endlagers. Mit  $r^{3t}$  ist es prinzipiell möglich unter Einbeziehung des Strömungsprogramms  $d^{3f}$  Schadstofftransportrechnungen durchzuführen, wobei alle für eine Langzeitsicherheitsanalyse relevanten Wechselwirkungs- und Rückhalteeffekte für alle Zerfallsreihen und Spalt- und Aktivierungsprodukte berücksichtigt werden können. Um das Zusammenwirken von  $r^{3t}$  und EMOS zu vereinfachen, enthält  $r^{3t}$  eine Schnittstelle zu EMOS. Mit Hilfe dieser Schnittstelle können alle relevanten Nahfelddaten automatisch nach  $r^{3t}$  übernommen werden.  $d^{3f}$  und  $r^{3t}$  wurden mittlerweile an realen Problemen getestet. Mit den Modellen  $d^{3f}$  und  $r^{3t}$  wurden Rechenprogramme entwickelt, mit denen erstmals dreidimensionale Modellrechnungen für großräumige Gebiete ( $\text{km}^2$ -Bereich) ermöglicht wurden. Ferner konnten der Stand von Wissenschaft und Technik bzgl. der numerischen Mathematik und des Software Engineering vorangetrieben werden.

Für die Wirtsgesteinsformation Tonstein wurde ein entsprechendes Nahfeldmodul CLAYPOS entwickelt. Ferner wird das Programm  $r^{3t}$  an die speziellen Eigenschaften von Tonformationen angepasst und die Ankopplung des Geochemiecodes PHREEQC durchgeführt.

Die Koppelung des thermodynamischen Rechenprogramms CHEMAPP mit einem Nahbereichsmodell von EMOS – mit dem Ziel die Schadstoffausbreitung und die damit verbundenen Prozesse (Transport, Speziation, Phasengleichgewichte, Adsorption) gemeinsam zu berechnen – wird derzeit bearbeitet.

Im Rahmen der Projektförderung des BMBF an die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) wurde im Zusammenhang mit den Arbeiten im Felslabor Grimsel die Entwicklung, der Test und der Einsatz des Programmpakets ROCKFLOW-MM realisiert, mit dem Modellierungen zur Hydraulik (Sättigung und Entsättigung des Gebirges), Rechnungen zum Zweiphasenfluss und zum Tracer-Transport jedoch ohne radioaktiven Zerfall durchgeführt wurden. Dieses Programm war speziell für geklüftete Medien entwickelt worden. ROCKFLOW und ROCKFLOW-MM wurden von BGR auch im Rahmen der deutsch-schwedischen Kooperation im Hard Rock Laboratory (HRL) Äspö für Zweiphasenfluss-Modellierungen sowie zur Modellierung der TRUE-Experimente erfolgreich eingesetzt. Die Neuentwicklung MUFTE\_UG wurde im Rahmen des Projektes zur dreidimensionalen Modellierung von Zweiphasen-Mehrkomponentenströmungen in geklüftet/porösen Medien eingesetzt.

Zur **Modellierung der Radionuklidmigration** sind folgende Themenbereiche im Rahmen aktueller FuE-Vorhaben in Bearbeitung oder sind als wichtige Fragestellungen zu behandeln:

- Weiterentwicklung und Test von Softwaretools für die Modellierung des Mehrkomponententransports und gekoppelter Prozesse (Strömung, Transport und Geochemie), Test an realen Objekten,
- Qualifizierung der Daten/Datenbasen (thermodynamisch/geochemisch) für In-situ-Bedingungen,
- Ermittlung des Materialverhaltens von Puffer-Materialien und der thermischen, hydraulischen, mechanischen und chemischen Beanspruchung des Systems geotechnischer Barrieren, die durch das Zusammenwirken von THMC-Prozessen verursacht wird,
- Arbeiten zur Verbesserung des Verständnisses von Rückhalte- und Transportprozessen, unter anderem die belastbare Beschreibung von Rückhalteprozessen durch

thermodynamische Modelle (Oberflächenkomplexierungs-Modelle) oder die Notwendigkeit der Berücksichtigung kinetischer Ansätze bei der Beschreibung des kolloidgetragenen Radionuklidtransports,

- Test der Programme und Validierung der Modelle, die von zentraler Bedeutung sind (Arbeiten im Rahmen internationaler Benchmarks),
- Untersuchungen zum Upscaling durch das Studium natürlicher Analoga und die Modellierung von In-situ-Experimenten in den URL Grimsel, Äspö und Mont Terri.

Die Themen **Verschlussmaßnahmen, chemische und physikalische Prozesse im Nahfeld** und **Natürliche Analoga** wurden von PTKA-WTE im Teil 2 der Bestandsaufnahme bearbeitet. Die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen werden zwischen BMWi und PT diskutiert. Zu diesen Themen liegen bislang keine Stellungnahmen externer Sachverständiger vor. Die vorläufigen Schlussfolgerungen sind:

Der Kenntnisstand zu **Verschlussmaßnahmen** ist in allen für Deutschland in Betracht kommenden Wirtsgesteinen wie Salzgestein, Ton/Tongesteine und Granite aufgrund nationaler und internationaler Aktivitäten relativ weit fortgeschritten. Da in Deutschland gefährliche chemotoxische Abfälle unter Tage nahezu ausschließlich in Untertagedeponien im Salzgestein entsorgt werden und da das deutsche Konzept der Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle deren Entsorgung im Salz vorsieht, konzentrierten sich die meisten der bislang durchgeführten und derzeit bearbeiteten Vorhaben auf die Realisierung von Verschlussmaßnahmen im Salzgestein.

Das Thema Verschlussmaßnahmen für Entsorgungseinrichtungen in salinaren Wirtsgesteinen wird als Schwerpunktthema im Fördergebiet des BMBF zur Ablagerung gefährlicher Abfälle unter Tage in mehreren FuE-Vorhaben untersucht.

Die Ergebnisse dieser Vorhaben müssen vorliegen und bewertet werden, um Klarheit über erforderliche weitere Aktivitäten zu schaffen. Parallel sollten Überlegungen zur Anwendbarkeit der entwickelten Konzepte im Endlagerbereich angestellt werden.

Die Untersuchungen zu geotechnischen Verschlussmaßnahmen stehen in enger Beziehung zu den Untersuchungen zur Auflockerungszone im Salzgestein. Wie bereits oben zum Thema Auflockerungszone ausgeführt, wären weitere Untersuchungen zur Rückbildung (Verheilung) einer aufgelockerten Gesteinszone an realen Systemen wünschenswert gewesen, um eine noch größere und belastbarere Datenbasis für die Modellierung des Systems zu erhalten. Leider sind solche Untersuchungen nach heutigem Kenntnisstand nicht mehr realisierbar, da das einzige bekannte Objekt (Dammjoch im Forschungsbergwerk Asse) nicht mehr zugänglich ist.

Folglich wird die Notwendigkeit gesehen, durch Überarbeitung und Absicherung des modelltheoretischen Instrumentariums und durch sorgfältige Überprüfung und Nachrechnung definierter Labor- oder Technikumsversuche zu einem besseren Verständnis des Systems Verschlussbauwerk (einschl. Versatz) - Randzone - Wirtsgestein zu gelangen. Diese Arbeiten erscheinen mit überschaubarem Zeit- und Finanzaufwand realisierbar.

Dambauwerke in den Zugangsstrecken zwischen Schacht und Einlagerungsfeldern sind von entscheidender Bedeutung für die Langzeitsicherheit eines Endlagers. Dambauwerke sind technisch insofern anspruchsvoller als Schachtverschlüsse, als es Schwerkraft bedingt zu Setzungen des Materials kommen kann. Zudem weist das Strecken umgebende Gestein oft aufgrund einer höheren mechanischen Beanspruchung eine ausgeprägtere Auflockerungszone als das Gestein um Schächte auf.

Derzeit bearbeitete FuE-Vorhaben zu Dambauwerken für UTD und UTV werden eine Reihe noch offener Fragestellungen beantworten. Für ein HAW-Endlager sind die Adaption und

die Möglichkeit der Umsetzung bisheriger Konzepte zu prüfen. Die Vorgehensweise zum ingenieurtechnischen Sicherheitsnachweis für Dammbauwerke ist zu formulieren. Auch diese Arbeiten sollten in relativ kurzer Zeit realisierbar sein. Ob die Idee eines großmaßstäblichen In-situ-Dammbauversuchs wieder aufgenommen werden soll, ist unter Abwägung der aus einem solchen Versuch erwarteten, zusätzlichen Erkenntnisse zu entscheiden.

Die technische Realisierbarkeit von langzeitsicheren Schachtverschlüssen ist anhand einer Option nachgewiesen, die derzeit im Rahmen von Verwahrungsmaßnahmen für stillzulegende Gewinnungsbergwerke zur Anwendung kommt. Damit existiert ein Stand von Wissenschaft und Technik für dieses wichtige Barriereelement. Ob das zugrunde gelegte Konzept auf einen Schachtverschluss für ein Endlager für radioaktive Abfälle übertragbar oder sogar direkt anwendbar ist, bleibt zu prüfen. Dem Schachtverschluss kommt aus Sicht der Sicherheitsanalyse bei funktionstüchtigen weiteren Barrieren und bei einem zeitlich überschaubaren Funktionszeitraum von einigen hundert Jahren keine kritische Bedeutung zu. Zum derzeitigen Zeitpunkt ist das Erfordernis nach weiteren großmaßstäblichen Untersuchungen über die an universitären Forschungsstellen betriebene FuE hinaus auf diesem Gebiet nicht erkennbar.

In verschiedenen meist als Verbundvorhaben angelegten FuE-Projekten befassen sich Forschungsstellen derzeit mit einer weitergehenden Optimierung von Materialien (Magnesiaemente, Magnesiabindersysteme, selbstabdichtendem Salzversatz) und mit der Konzeption fortschrittlicher, redundant ausgelegter Verschlussysteme für Strecken und Schächte. Nach erfolgreichem Abschluss dieser Vorhaben bis zum Jahr 2009 wird in Deutschland eine sehr breit angelegte und gut abgesicherte Wissensbasis zu Verschlussmaßnahmen für untertägige Entsorgungseinrichtungen vorliegen, die in erster Linie auf die für die Untertagedeponierung, den Untertageversatz und die Endlagerung im Salzgestein relevanten Verhältnisse in Evaporitgesteinen anwendbar ist.

Die Langzeitsicherheitsanalyse stützt sich auf ein möglichst detailliertes Verständnis der **chemischen und physikalischen Prozesse im Nahfeld** eines Endlagers, um durch eine realitätsnahe Festlegung des Quellterms eine quantitative Aussage zum zeitlichen Ausbreitungsverhalten von Schadstoffen und deren Migration aus dem Nahfeld in das Fernfeld und bis zur Biosphäre zu ermöglichen.

Direkt endzulagernde Brennelemente werden in POLLUX-Behältern (Streckenlagerung) und verglaste HAW-Abfälle in Kokillen in Bohrlöchern endgelagert. Abfall und Behälter sind die jeweilige technische Barriere. Die zur Verfüllung eingesetzten Versatz- und Puffermaterialien sowie untertägige Dammsysteme bzw. Bohrlochverschlüsse sind die das Endlagernahfeld begrenzenden, geotechnischen Barrieren. Das Wirtsgestein und das sich darüber befindende Deckgebirge mit dem Aquifersystem stellen die geologischen Barrieren bis in das Fernfeld des Endlagers dar.

In diesem Barriersystem laufen die chemischen und physikalischen Prozesse ab, die für den Sicherheitsnachweis mit einem möglichst guten Prozessverständnis und auf Grundlage belastbarer Daten und Erkenntnisse abzubilden sind. Die wesentlichen für die Radionuklidmigration im Nah- und Fernfeld relevanten Themen wurden oben bereits angesprochen. Nachfolgend werden die im Nahfeld der Behältnisse ablaufenden Prozesse und die für die Sicherheitsanalyse noch zu leistenden Arbeiten kurz thematisiert.

**Behälterkorrosion:** Phänomenologisch wurden jahrzehntelange Untersuchungen zur Korrosion verschiedener Behältermaterialien insbesondere am Forschungszentrum Karlsruhe durchgeführt. Jüngste Ergebnisse sind im Bericht FZKA 6809 aus dem Jahr 2003 veröffentlicht. Aus den Kenntnissen zum Korrosionsmechanismus und zum Zeitverlauf des Korrosionsprozesses wurde für Sicherheitsanalysen eine konservativ festgelegte Behälterstandzeit abgeleitet. Bislang unberücksichtigt blieben die im Zusammenhang mit der Korrosion ste-

henden Fragen der Wirksamkeit der Korrosionsprodukte als chemische Barriere. Das Thema Gasentwicklung beim Korrosionsprozess unter Endlagerbedingungen ist Gegenstand laufender Forschungsarbeiten. Entscheidend ist das zugrunde liegende Konzept der Endlagerung abgebrannter Brennelemente – Streckenlagerung dickwandiger Eisenbehälter oder Bohrlochlagerung relativ dünnwandiger Kokillen – so auch ausgeführt in einer aktuellen RSK-Stellungnahme (Sicherheitstechnische Aspekte konzeptioneller Fragestellungen zur Endlagerung von bestrahlten Brennstäben mittels Kokillen in Bohrlochern anhand eines Vergleiches mit dem Konzept „Streckenlagerung von dickwandigen Behältern“ 31.03.2005 (380. RSK-Sitzung)).

Da diese Fragestellungen von Bedeutung für die Mobilisierung und Ausbreitung von Radionukliden aus dem Nahbereich des Endlagers heraus sind, sollten sie durch gezielte Untersuchungen geklärt werden.

**Kernbrennstoff-Korrosion:** Umfangreiche Korrosionsuntersuchungen an abgebrannten Brennstäben vor allem in salinaren korrosiven Medien wurden von den Forschungszentren Karlsruhe und Jülich durchgeführt. Radionuklidfreisetzungsraten infolge der Zerstörung des Zirkalloy-Hüllrohrs wurden ermittelt sowie die Prozesse Gasentwicklung, Phasenumwandlungen und -neubildungen untersucht. Das Verhalten des Kernbrennstoffs ist gut beschreibbar.

In Abhängigkeit von der in Betracht gezogenen Wirtsfornation sind chemisch unterschiedliche wässrige Medien (hoch saline Lösungen, Tonstein- und Granitwässer) und damit ein stark unterschiedliches Korrosionsverhalten zu berücksichtigen.

Offene Fragestellungen sind die Bildung von Sekundärphasen einschließlich deren Einfluss auf die Radionuklid-Mobilisierung (s. auch bei HAW-Glas). Zur Prüfung einer möglichen Endlagerung der wenigen noch vorhandenen Brennelemente aus Forschungsreaktoren in Deutschland sollen Informationen zur Matrixstabilität und zum Freisetzungsverhalten der enthaltenen, Dosis bestimmenden Radionuklide ermittelt werden, falls die Brennelemente wider Erwarten nicht nach USA entsorgt werden können.

**Stabilität von HAW-Glas:** Verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung bestehen in der Regel aus einer Borosilikatglasmatrix und zwischen 15 und 25 Gewichtsprozent Abfalloxiden. Neben Spaltprodukten und Actiniden sowie Spuren von nicht abgetrenntem Uran und Plutonium sind oxidische Verbindungen aus aufgelöstem Hüllmaterial und Prozesschemikalien in der Glasmatrix eingebunden.

Die Einbindung der radioaktiven Elemente in Borosilikatgläser bedingt nur eine geringe Beeinflussung der Strukturen der Glasmatrix. Eine Radionuklidfreisetzung kann durch die Anwesenheit von wässrigen Phasen (Grund- und Tiefenwässer in geologischen Formationen) bzw. von Wasserdampf an der noch heißen Glasoberfläche verursacht werden. Hierbei unterscheidet man Korrosionsprozesse der Glasmatrix und das selektive Herauslösen von Radionukliden infolge von Diffusionsvorgängen in der Feststoffmatrix, die nicht mit Auflösungs- oder Umwandlungsvorgängen des Abfallprodukts einhergehen. Beide Vorgänge können dazu führen, dass freigesetzte Radionuklide in direkt angrenzenden Gebieten wieder die Löslichkeitsgrenzen überschreiten (z. B. durch Abkühlung der Lösung bei größer werdender Distanz zur Glasmatrixoberfläche) und je nach den dort gegebenen geochemischen Bedingungen Sekundärphasen bilden. Sekundärphasen können auch aus den Korrosionsprodukten der Behältermatrix bzw. aus Glasmatrix- und Behälteranteilen entstehen. In diesen sich neu bildenden Feststoffphasen ist die Immobilisierung der Radionuklide sowohl durch Sorptionsprozesse an den Oberflächen als auch durch Einbindung in die entstehende Festphase möglich. Eine Reversibilität dieser Prozesse ist prinzipiell immer gegeben und entscheidend von den vorliegenden geochemischen Randbedingungen abhängig.

Sowohl bei Auflösungsvorgängen an der Kernbrennstoffmatrix als auch an der Glasmatrix sind weitere physikalisch-chemische Prozesse möglich. So kann der kolloidale Transport von Radionukliden hinsichtlich der Bildungsmechanismen und des quantitativen Anteils an Mobilisierungsprozessen im Nahfeld eines Endlagers noch eingehender untersucht werden.

**Nahfeldchemie:** Die chemisch-physikalische Situation im Nahfeld bestimmt entscheidend die Prozesse der Mobilisierung und Migration von Radionukliden aus dem Abfallinventar. Das sich im Nahfeld entwickelnde chemisch-physikalische Milieu wird mittels Rechenprogrammen prognostiziert. Die Thermodynamische Datenbasis für die geochemische Beschreibung des Milieus im Nahfeld ist noch lückenhaft und nicht belastbar, besonders für die hoch salinaren Lösungen. Die Kinetik bestimmter Prozesse ist erst in Ansätzen untersucht und quantifizierbar. Die Erarbeitung einer thermodynamischen Referenzdatenbank wurde 2006 als konzertierte Aktion von BMWi, BMBF und BMU/BfS durch gemeinsame Förderung eines Verbundvorhabens aufgenommen.

Ein Gesichtspunkt dabei ist, dass auch das Verständnis der an den Feststoffoberflächen im Nahbereich ablaufenden Prozesse noch verbessert werden kann. Das bezieht sich sowohl auf den Mechanismus einer Wechselwirkung von Radionukliden mit den oben angesprochenen Sekundärphasen aus korrodierenden Brennelement-Matrizes und HAW-Gläsern als auch auf eine Sorption an bei der Korrosion der Eisenbehälter entstehenden Sekundärprodukten, die eine bedeutende chemische Barriere für etwaig mobilisierte Radionuklide darstellen. Da diese Prozesse jedoch alle zu einer verlangsamten Mobilisierung und Migration aus dem Nahfeld heraus führen würden, resultiert ihre konservative Nichtberücksichtigung in einer Überschätzung von Konsequenzen bei einer numerischen Analyse und nicht in einer Unterschätzung. Sie sind zusätzliche, derzeit noch nicht realitätsnah abbildbare Barriere- und Sicherheitskomponenten und erhöhen die Endlagersicherheit vermutlich bedeutend.

Zur Nahfeldchemie sind Untersuchungen zur Wirkung reaktiver Zuschlagstoffe wie z. B. Hydroxylapatit zu Salzgrusversatz zu zählen. Aus ihnen konnten keine den Einsatz solcher Materialien zwingend erforderlichen Vorteile ermittelt werden. Dagegen wird die Beschreibung der chemischen Situation nochmals komplizierter. Weitere Arbeiten zu Versatzmaterialien mit chemisch reaktiven Zuschlagstoffen erscheinen daher verzichtbar.

Für Endlager im Salzgestein, Tonstein und Granit wurden Arbeiten zu Puffer- und Verschlussmaterialien wie Bentonit sowie zu modifizierten Bentoniten (Organotone) als Sorptionsbarriere für schwer sorbierbare Radionuklide durchgeführt.

**Natürliche Analoga:** Im Ausland wurde bereits früh erkannt, dass man Natürliche Analoga im Rahmen der Langzeit-Sicherheitsbewertung einsetzen könnte. 1993 wurde die Behandlung des Themas Natürliche Analoga durch BMFT angeregt und im Sachverständigenkreis Endlagerung diskutiert. Bis dahin hatte sich keine der im Endlagerbereich tätigen deutschen Institutionen an den internationalen Aktivitäten beteiligt oder zu dieser Thematik eigene Untersuchungen durchgeführt.

International war zum Thema Natürliche Analoga für Endlagerung im Salz nur wenig gearbeitet worden. Da die Initiatoren des Themas, SKB und NAGRA, damals beide die Endlagerung in kristallinem Gestein favorisierten, waren alle Arbeiten direkt oder indirekt auf geochemische Aspekte dieser Wirtsgesteinsformation ausgerichtet.

Der BMFT-Expertenkreis „Natürliche Analoga“ wurde eingerichtet und mit dem Mandat beauftragt, eine Empfehlung zu erarbeiten, wie die Thematik Natürliche Analoga für ein Endlager im Salz behandelt werden könnte und welche konkreten FuE-Arbeiten daraus resultieren.

Die Empfehlung, die damals Grundlage für die weitere Behandlung dieses Themas war, enthielt die tabellarische Zusammenstellung der Natürlichen Analoga für ein Endlager im Stein-

salz und war Basis für die FuE-Vorhaben, die ab 1995 initiiert wurden. Auf dem 6th EC-NAWG Workshop wurden die Vorhabensansätze vorgestellt; der PT war von diesem Zeitpunkt an in diesem internationalen Gremium vertreten. Über die deutschen Aktivitäten wurde kontinuierlich auf den EC-Workshops berichtet. Mit Ablauf des 5. Rahmenprogramms der EC wurden offiziell die Aktivitäten der NAWG eingestellt, eine lose Verbindung der internationalen Teilnehmer besteht nach wie vor. Zurzeit wird der Schlussbericht eines Thematischen Netzwerk-Projekts, das eine Zusammenfassung aller bisher durchgeführten internationalen Aktivitäten zum Ziel hat, erstellt.

Natürliches Analogon	Analogon für:
Elementverteilungen in Sekundärphasen an Korrosionsprodukten von basaltischen Gläsern im Steinsalz	<u>Nuklidrückhaltung im Nahbereich:</u> Elementanteile, die bei der Glasmatrix in Sekundärphasen zurückgehalten werden
Mitfällung natürlicher Elemente bei der Entstehung und Umbildung von Salzlagerstätten	<u>Nuklidrückhaltung im Nahbereich:</u> Rückhaltung von Radionukliden im Salzstock durch Einbau bei der Kristallisation von Salzen
Zonen im Steinsalz, durch die Lösungen geflossen sind	<u>Barrierefunktion des Salzgebirges:</u> Tatsache, dass verfüllte Hohlräume im Steinsalz langfristig die Eigenschaften des umgebenden Gebirges annehmen
Fluideinschlüsse im Steinsalzgebirge	<u>Barrierefunktion des Salzgebirges:</u> Tatsache der Dichtheit des Salzgebirges gegenüber Fluiden und Gasen über lange Zeiträume
Heutiger Zustand ehemals offener oder verfüllter historischer Hohlräume/Strecken in alten Salz-/Kalisalzbergwerken	<u>Barrierefunktion des Salzgebirges:</u> Konvergenz von Strecken und Kompaktion von Versatzmaterial über lange Zeiträume
Verheilung von Rissen und bruchhaften Verformungen im Salzgebirge	<u>Barrierefunktion des Salzgebirges:</u> Tektonisch/mechanisches Verhalten von Salzstöcken
Elementverteilung von U, Th und SEE durch quartäre, sandige Sedimente unter mitteleuropäischen Klimabedingungen	<u>Nuklidrückhaltung im Deckgebirge:</u> Wechselwirkung der Radionuklide mit den Sedimenten im Deckgebirge über einem Salzstock

Im Förderkonzept des BMFT „Forschungsförderung zur Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen (1997 – 2001)“, wurden natürliche Analoga explizit nur unter dem FuE-Schwerpunkt B7 Validierung von Modellen, Unsicherheitsanalyse im Forschungsthema B7.4-E, Untersuchung geochemischer und geomechanischer Prozesse in natürlichen Systemen als Analogon für die Schadstoffrückhaltung im Nahbereich eines Endlagers, benannt, d. h. speziell bezogen auf die Schadstoffrückhaltung im Nahbereich. Implizit enthalten war das Thema allerdings auch in den FuE-Schwerpunkten B4 Verhalten von geotechnischen Barrieren und B5 Verhalten von geologischen Barrieren.

Im fortgeschriebenen Förderkonzept des BMWi „Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (2002 – 2006)“ waren die FuE-Themen auf die Wirtsgesteine Ton bzw. Tonstein und Kristallin ausgerichtet. Explizit erwähnt sind Natürliche Analoga im FuE-Schwerpunkt B7 im Thema „Untersuchung geochemischer und geomechanischer Naturanaloga zum Nachweis des Langzeit-Barriereverhaltens von (Salz), Granit und Tongestein“. Von den in obiger Tabelle aufgeführten Themen wurde bislang die Ausbreitung von U und Th in tertiären Sedimenten bearbeitet. Ferner sind die Arbeiten zu Fluideinschlüssen im Salzgebirge zu erwähnen, die an der TU Clausthal durchgeführt wurden. Die Ergebnisse haben die langfristige Barriereintegrität des Wirtsgesteins Steinsalz bestätigt. Arbeiten zum Verhalten von Altversatz wurden begonnen, konnten in den 1990er Jahren aus finanziellen Gründen aber nicht weitergeführt werden.

Im Rahmen der Projektförderung wurden Arbeiten mit Bezug zu Themen der Zusammenfassung bei GRS-Braunschweig, TU-Clausthal und an der FU Berlin durchgeführt. Experimentelle Arbeiten, die zum Thema Natürliche Analoga zählen, aber nicht durch Projektförderung

finanziert wurden, wurden am INE des Forschungszentrums Karlsruhe u. a. in Kooperation mit der Universität Straßburg sowie bei der BGR realisiert.

Noch zu realisieren ist eine systematische und strukturierte Betrachtung, in welcher Weise welche natürlichen Analoga für die Aufstellung des Safety Case für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle im Steinsalz herangezogen werden können und sollten.

### **3. FuE-Arbeiten im Wirtsgestein Tonstein / Ton**

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

Aus Untersuchungen zur Frage der Eignung des 1976 stillgelegten Eisenerzbergwerks Konrad für die Endlagerung schwach- und mittelaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in den Jahren 1976 bis 1982 resultierten auch erste Kenntnisse zu den mächtigen Ton- und Mergelschichten des Deckgebirges über dem Erzlager.

Plastische Tone (Belgien) und Tonsteine (Frankreich, Schweiz) werden als potentiell Wirtsgestein für die Endlagerung Wärme entwickelnder, hochradioaktiver Abfälle in Betracht gezogen und untersucht. Plastische Tone wie der belgische Boom-Clay sind in Deutschland in geeigneter Teufenlage und Mächtigkeit nicht vorhanden. Daher ist Tonstein (indurated clay) die nach Meinung vieler Sachverständiger einzige in Betracht zu ziehende Wirtsgesteins-Alternative zu Steinsalz.

Im April 2007 wurde im BMWi die von der BGR realisierte Studie über die regionale Verbreitung von Tonsteinen als potentielle Wirtsgesteine für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland vorgestellt. Damit liegen über Salz-, Kristallin- und Tonstein-Vorkommen und somit alle in Deutschland für die Endlagerung in Betracht zu ziehenden Wirtsgesteinsformationen profunde geowissenschaftliche Erkenntnisse vor.

#### **3.1. Bisherige Arbeiten und Kenntnisstand**

Anwendungsorientierte Forschungsarbeiten wurden bisher überwiegend experimentell orientiert im Rahmen internationaler Kooperationen in Untertagelaboratorien in der Schweiz (Mont Terri), in Frankreich (Bure) und in Belgien (Mol) realisiert, da in Deutschland keine Möglichkeiten zur Durchführung von In-situ-Experimenten vorhanden sind. Der aus diesen Arbeiten resultierende Kenntnisstand unterscheidet sich hinsichtlich Breite der behandelten FuE-Themen und wissenschaftlichem Tiefgang der Arbeiten von dem Wissens- und Informationsstand zu dem in Deutschland langjährig intensiv untersuchten Wirtsgestein Steinsalz.

Konzeptorientierte FuE-Arbeiten für HAW-Endlager in Tonstein wurden und werden in Deutschland weiterhin mit den Vorhaben (GEIST, GENESIS, ERATO) gefördert. Dabei zeigt sich deutlich, dass belastbare Aussagen zur technischen Machbarkeit, zur Sicherheit und zur Wirtschaftlichkeit nur anhand formationsspezifischer Daten getroffen werden können.

Im Rahmen der internationalen In-situ-Experimente im Felslabor Mont Terri waren BGR und GRS an umfangreichen Untersuchungen zur Zusammensetzung des Porenwassers sowie zur Wasser- und Gasdurchlässigkeit des Opalinustons, zur Beschaffenheit der Auflockerungszone, zum Wärmeeinfluss der Endlagergebäude auf umgebenden Bentonit und angrenzendes Wirtsgestein sowie an geomechanischen, felsmechanischen und hydrogeologischen Modellierungen beteiligt.

Untersuchungen zur Korrosion aktiver, verglaster Abfälle bei der Tieflagerung im Boom-Clay wurden innerhalb der internationalen Kooperation mit SCK-CEN im Untertagelabor in Mol (Belgien) durchgeführt. Die Gaserzeugung und -freisetzung in Folge der Glaskorrosion sowie die Gasausbreitung bzw. -sorption wurden untersucht. Zur Bestimmung der Radionuklidmigration analysierten die belgischen Partner den plastischen Ton, Veränderungen im Versatzmaterial und die Zusammensetzung der Formationswässer. Eingehendere Untersuchungen zum Einfluss weiterer Tonformationswässer des Opalinustons (Mont Terri) und des Callovo-Oxfordian-Tons (Bure) sind weit fortgeschritten.

**Wirtsgesteinseigenschaften (s. A4):** Es besteht noch Bedarf an der Erforschung der Veränderungen der organischen Bestandteile des Tongesteins bei thermischer Belastung. Für den Boom-Clay von Mol (Belgien) wurde ein organischer Anteil von 2 bis 5 Gewichtsprozent ermittelt, wobei 80 Prozent dieser Menge wasserunlöslich sind. Organische Anteile in vergleichbaren Größenordnungen sind in Tonstein ebenfalls vorhanden. Die thermische Belastung von Tonsteinproben führte einerseits zur Verdampfung organischer Verbindungen, andererseits aber auch zu chemischen Crackprozessen. Es wurde die Bildung von Phenolen und Furanen sowie von Fettsäuren und Ketonen beobachtet. Die Auswirkungen auf das mineralogische Gefüge des Tons sowie die Weiterreaktionen dieser Verbindungen und deren Einfluss auf die Radionuklidmigration sind noch nicht vollständig verstanden.

**Verschlussmaßnahmen (s. A5):** Für die Endlagerung radioaktiver Stoffe in Ton- und Granitformationen wird Bentonit als geotechnische Barriere im Nahfeld in Erwägung gezogen und in nationalen und internationalen Forschungsprogrammen untersucht. Weitere deutsche Forschungsaktivitäten wurden speziell zum Verhalten von Tonen/Bentoniten als mögliche Versatzmaterialien bzw. Materialien zur Konstruktion von Verschlussbauwerken auch im Steinsalz und Granit durchgeführt. Prinzipiell sind diese Ergebnisse, mit gewissen Einschränkungen, auch auf das Verhalten von Tonstein übertragbar. Diese Arbeiten erfolgten innerhalb der internationalen Zusammenarbeit mit der Schweiz in den URL Grimsel und mit Schweden im HRL Äspö im Hartgestein. Im Felslabor Grimsel beteiligten sich BGR und GRS an dem Demonstrationsversuch des Einlagerungskonzepts für hochaktive Abfälle (FEBEX I und II), an den Untersuchungen zur Gasentwicklung und Gasfreisetzung aus dem Tonversatz sowie an der Untersuchung des Gastransports durch technische Barrieren und angrenzendes Gestein (GMT). Ergänzend beteiligte sich GRS am schwedischen Experiment „Prototype Repository“ zur geoelektrischen Untersuchung der Aufsättigung von Bentonitbarrieren im HRL Äspö.

In einem aktuell durchgeführten Experiment zu selbstdichtenden Barrieren (SB-Experiment) untersucht die GRS, ob sich die Permeabilitäten von Ton/Mineral-Gemischen so optimieren lassen, dass der sich in einem abgeschlossenen Endlagerbereich einstellende Gasdruck bei kontrollierter Abströmung der Gase über das Verschlussystem stets kleiner als der Gaseintrittsdruck im Gebirge bleibt, so dass im Gebirge keine unkontrollierten Risse generiert werden. Für die Optimierung der Verschlusskörper für Endlager werden im Labor das Aufsättigungsverhalten, die sich einstellenden Quelldrücke sowie die Gas- und Wasserpermeabilitäten von verschiedenen Ton/Mineral-Gemischen ermittelt. Im Technikum werden die geplanten In-situ-Einbautechniken und die Messtechnik überprüft. Im Untertagelabor Mont Terri werden in einem Versuchsfeld die In-situ erreichbaren Einbaudichten, Wassersättigungen in Wechselwirkung mit dem umgebenden Gebirge, die resultierenden Quelldrücke sowie die Ein- und Zweiphasenflussparameter und die Gasdurchbruchdrücke bestimmt.

Neben diesen internationalen Arbeiten wurden weitere nationale Vorhaben auch über BMWi und BMBF im Bereich der Endlagerung radioaktiver Abfälle und der untertägigen Deponierung gefährlicher Abfälle speziell im Hinblick auf das Ton-/Bentonitverhalten gefördert. Für Langzeitsicherheitsanalysen müssen mögliche Veränderungen des Mineralphasenbestandes der Bentonite und damit ihrer Dichtwirkung infolge der Wechselwirkungen mit aus dem Gebirge zutretenden Lösungen bzw. je nach Endlagerkonzept auch mit Betonkorrosionslösungen quantifiziert werden. Aus diesem Grund werden aktuell von der GRS Langzeitversuche durchgeführt, in denen die Entwicklung der Lösungszusammensetzung und des Phasenbestandes auf dem Reaktionspfad bis zum thermodynamischen Gleichgewicht betrachtet sowie die Veränderung der hydraulischen Eigenschaften der reagierenden Bentonite mittels Quelldruckversuchen bestimmt werden. Aus der Gegenüberstellung der chemischen Umsetzungsprozesse und der veränderten hydraulischen Eigenschaften der umgewandelten Materialien lassen sich Aussagen über das Langzeitverhalten der untersuchten Materialien ableiten. In Verbindung mit geochemischer und Transportmodellierung mit dem gekoppelten

Gleichgewichts-Transport-Codes EMOS-ChemApp soll für die sicherheitsrelevanten Zeitabschnitte das Materialverhalten nachvollziehbar belegt werden.

Insgesamt existieren bereits Kenntnisse zur Entwicklung des Quelldrucks, der geochemischen Langzeitstabilität und der technischen Anwendung von Ton/Bentonit sowohl im salinaren Milieu als auch für geochemische Randbedingungen (verschiedene Salinitäten von Wässern) im Tonstein und in kristallinen Gesteinen. Es wird als sinnvoll angesehen, FuE-Arbeiten zu Verschlussmaßnahmen im Tonstein verstärkt zu bearbeiten, um bei Bedarf für ein Endlagerkonzept für Wärme entwickelnde Abfälle in Tonstein eine verbesserte wissenschaftliche Grundlage zu haben.

In erster Linie wird es um konzeptionelle Fragen zu Versatz- und Verschlussmaßnahmen im Streckenbereich eines solchen Endlagers gehen, die durch die erforderlichen Ausbaumaßnahmen in Tonsteinen neuartige methodische Ansätze erfordern. Besonderes Augenmerk wird auch dem Zeitverhalten und den THMC-Eigenschaften von Puffer- und Versatzmaterialien gewidmet werden müssen, damit der für die Langzeitsicherheit entscheidende Wiederaufsättigungsprozess und eine etwaig ablaufende Schadstoffausbreitung durch Diffusion verlässlich beschrieben werden können. Arbeiten zu diesen Themen wurden bereits in der Phase 2002-2006 der Projektförderung aufgenommen (z. B. Förderkennzeichen 02E9813).

**Radionuklidmigration (s. B3/B4):** Aufbauend auf Verbundprojekten zur Radionuklidmigration im Fernfeld eines Endlagers im Salinar wurden im Jahr 2003 erste nationale, tonbezogene Arbeiten, an denen die Forschungszentren Karlsruhe und Rossendorf, das Institut für Interdisziplinäre Isotopenforschung – Leipzig, die Universitäten Mainz, Saarbrücken, Heidelberg und Potsdam sowie die Technische Universität München beteiligt waren, begonnen. Der Schwerpunkt der Forschungsarbeiten im Verbundprojekt „Migration von Actiniden im System Ton, Huminstoff, Aquifer“, welches im Zeitrahmen 2002 bis 2006 des Förderkonzepts des BMWi gefördert wurde, liegt in der Beschreibung der Wechselwirkung von Actiniden mit Kaolinit als Referenzmaterial unter dem Einfluss von unterschiedlichen Huminsäuren und von „Natural Organic Matter (NOM)“. Kaolinit wurde als einfachstes Tonmineral ausgewählt, um durch Ermittlung der systematischen Grundlagen die Tools für eine zukünftige Behandlung von komplexeren Tongesteinen als Wirtsgestein bzw. als geologische Barriere bereitstellen zu können.

Schwerpunktmäßig wurde bisher das Wechselwirkungsverhalten der Actiniden U, Np, Pu, Am und Cm, auch für unterschiedliche Speziationen, untersucht. Darüber hinaus wurden auch Konkurrenzprozesse durch Elemente wie Eisen, Calcium und Magnesium sowie die zu den dreiwertigen Actiniden analogen Lanthaniden (Gd, Eu, Tb) in die Untersuchungen einbezogen. Parallel und ergänzend zu den experimentellen Untersuchungen wurden theoretische Berechnungen durchgeführt, um die Wechselwirkungen verschiedener Actinidenelemente mit Carboxylgruppen, der für die Metallionenkomplexierung wichtigsten funktionellen Gruppen von Huminstoffen, sowie mit Hydroxylgruppen erklären und vorausberechnen zu können. Diese Einbindung theoretischer Untersuchungsmethoden hat sich als durchaus erfolgreich erwiesen und soll auch in der Fortführung der Vorhaben beibehalten werden.

Die vorliegenden Ergebnisse liefern die Grundlage, auf der die Untersuchungen mit weitergehenden Fragestellungen zur Actiniden-Migration aufbauen können. Schwerpunkt der Fortführung der Arbeiten ist die Anwendung des erarbeiteten Know-how auf die Untersuchung der Wechselwirkung der Actiniden im natürlichen Tongestein unter Berücksichtigung von Huminstoffen und von Tonorganika. Mit den vorhandenen Methoden soll es zukünftig möglich sein, unbekannte Tonsteine hinsichtlich ihrer geochemischen Parameter vergleichend einzuordnen und die Parameter einzuschätzen, die die Actinidenspeziation und -migration dominieren. Ermittelte Kenngrößen werden zu einer Erweiterung der für die Langzeitsicherheitsprognose benötigten thermodynamischen und kinetischen Datenbasis beitragen. Die

Forschungsarbeiten sollen durch Mitwirkung der GRS enger an die Langzeitsicherheitsforschung angebunden werden.

### 3.2. Laufende Arbeiten und Perspektive

Mit der von BGR im Auftrag des BMWi erarbeiteten Studie über die Verbreitung von Tongesteinen als potenzielle Wirtsgesteine für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland wird das Wissen zu regionalen Wirtsgesteinsvorkommen ergänzt. Das Screening der Regionen in Deutschland erfolgte anhand international anerkannter und im Jahr 2002 vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) zusammengestellter, wirtsgesteinsunabhängiger Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und ergänzender BGR-Kriterien. Als Ergebnis zeigt die Studie die Regionen mit den diese Anforderungen erfüllenden Tonsteinvorkommen ohne einen Bezug auf Standorte zu nehmen.

Deutsche Forschungsstellen arbeiten seit Mitte der 1990er Jahre in internationalen FuE-Projekten zur Endlagerung in Tonstein. Die Mitarbeit erfolgt in Untersuchungsprogrammen im schweizerischen Untertagelabor in Mont Terri und im französischen URL in Bure. Die Arbeiten befassen sich mit Fragestellungen aus den Gebieten Geochemie, Hydrologie, diffusiver Transport, Gebirgsmechanik, geotechnische Barrieren (EBS – Engineered Barrier Systems), Auflockerungszone, Wirtsgesteinseigenschaften (vor allem die Permeabilität) sowie gekoppelte Prozesse und umfassen unter anderem:

- In-situ- und Labor-Experimente zur Untersuchungen der Erzeugung, Freisetzung und Ausbreitung von Fluiden im Tonstein und in den Versatzmaterialien,
- die Ermittlung von Gesteinsparametern, die zur Beschreibung des Materialverhaltens erforderlich sind,
- die Entwicklung von Modellen zur Modellierung von gekoppelten THM(C)-Prozessen,
- die Weiterentwicklung der Methoden zur Messung der thermischen und hydraulischen Effekte auf das Wirtsgestein,
- Untersuchungen zur Ausbreitung von Radionukliden,
- Untersuchungen an aufgelockerten Gesteinszonen (ALZ),
- Mitarbeit an FuE-Arbeiten zu Verschlussmaßnahmen.

Der aus diesen Arbeiten resultierende in Deutschland vorliegende Kenntnisstand ist hinsichtlich der Breite der behandelten FuE-Themen und dem wissenschaftlichem Tiefgang der Arbeiten geringer als der Wissens- und Informationsstand zu dem in Deutschland langjährig intensiv untersuchten Wirtsgestein Steinsalz. Die aus Untersuchungen an Ton und Tonsteinen in internationalen Projekten erzielten und künftig erzielbaren Erkenntnisse sind zur Absicherung und Überprüfung der Untersuchungsergebnisse an deutschen Tonsteinen nutzbar. Zudem besteht für deutsche Forschungseinrichtungen nur in ausländischen Untertagelabors in Ton und Tonstein die Möglichkeit Expertise und spezifische Kenntnisse aus In-situ-Arbeiten zu gewinnen.

In Vorhaben die sich mit den sicherheitstechnischen Konsequenzen einer Einlagerung von Wärme entwickelnden Abfällen auf ein Endlager in Deutschland in Ton befassen (GENESIS und TEE), wurden die Auswirkungen auf den Einlagerungsnahbereich und das Wirtsgestein untersucht. Die Ergebnisse lassen unter anderem die besondere Bedeutung der Verfüllmaterialien in unmittelbarer Behälternahe hinsichtlich des Wärmetransportes zum Wirtsgestein erkennen sowie unterschiedliche Potentiale von Wirtsgesteinen aus unterschiedlichen Regionen zur Wärmeaufnahme und Wärmeableitung. In einem weiteren Vorhaben (TemTon) wird der langfristige Temperatureinfluss auf die Eigenschaften des Tonsteins derzeit untersucht.

Im Rahmen des Förderkonzepts des BMWi sollen die für die Sicherheitsanalyse von Endlagern in Tonsteinen erforderlichen, grundlegenden Kenntnisse erarbeitet werden. In der abgeschlossenen Phase des Förderkonzepts wurde bereits eine Reihe von FuE-Vorhaben initiiert, die sich mit wichtigen, für die Sicherheitsbewertung relevanten Prozessen und Eigenschaften von Tonen oder Tonsteinen befassen. Ihre Ergebnisse sind abzuwarten und auszuwerten, ehe Entscheidungen über weitere Aktivitäten zu den spezifischen FuE-Themen getroffen werden.

In der vorliegenden Fassung des Förderkonzepts sind in der Regel in den FuE-Themen mit Fragestellungen, die für die Endlagerung im Steinsalz im Rahmen dringender restlicher Arbeiten zu behandeln sind, entsprechende Untersuchungen für die Endlagerung in Tonsteinen vorgesehen. Auf Gebieten, die diese Vorgehensweise erlauben, wird die Übertragung oder Anwendung vorhandenen Wissens oder vorhandener technischer und analytischer Methoden von Steinsalz-Systemen auf Tonstein-Systeme geprüft.

**Endlagerkonzepte (s. A1):** Als prioritäre Aktivität ist die Entwicklung generischer Konzepte für Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle in Tonstein zu realisieren.

**Wirtsgesteinseigenschaften (s. A4):** Gesteinsmaterial aus den von BGR identifizierten Regionen ist hinsichtlich seiner Endlager- und sicherheitsrelevanten Eigenschaften zu charakterisieren und mit den bekannten und gut untersuchten Gesteinen aus ausländischen URL zu vergleichen. Eine ebenfalls zum Forschungsschwerpunkt gehörende Aktivität sind Arbeiten zur **Auflockerungszone:** Die Untersuchungen zu Auflockerungszonen in Tonsteinen werden im Wesentlichen durch BGR und GRS in internationalen Projekten fortgesetzt.

**Verschlussmaßnahmen (s. A5):** Nach Ansicht der in die Aktualisierung des Förderkonzepts eingebundenen Sachverständigen soll in internationalen Projekten von deutscher Seite weiter an der Konzeption, dem Bau und der Erprobung langzeitsicherer Abschlussbauwerke bzw. deren Komponenten in Tonstein mitgearbeitet werden. Ob darüber hinaus eine Beteiligung an internationalen Großprojekten erfolgen soll, ist fallweise und themenbezogen zu entscheiden.

**Radionuklidmigration (s. B3/B4):** Die Migration von Radionukliden erfolgt bei der Endlagerung in Ton oder Tonstein durch Diffusion. Die Verhältnisse im Nahfeld sind in einem Referenzkonzept zu umreißen, ehe gezielte experimentelle Untersuchungen aufgenommen werden. Aufgrund der hohen Ionenstärke der Porenwässer und da ein Ausbau der Endlagerhohlräume mit Betonen erfolgen muss, werden detaillierte Untersuchungen zur Auswirkung des physikochemischen Milieus auf die Radionuklidmobilisierung und -migration notwendig sein. Das Korrosionsverhalten der Gläser in tonhaltigen Matrices und der Quellterm sind für den Fall einer Endlagerung in Tonstein noch zu ermitteln.

Diese Arbeiten sollten nach der Entwicklung generischer Endlagerkonzepte für Tonstein aufgenommen werden. Internationale Kenntnisse und Erfahrungen sind dabei als Wissensbasis einzubeziehen. Deutsche Forschungsstellen befassen sich bereits mit Untersuchungen zur geologischen Barriere Tonstein in den URL Mont Terri und Bure.

**Modellierung der Radionuklidmigration (s. B5/B6):** Die Instrumente für numerische Ausbreitungsrechnungen sind für die Anwendbarkeit auf Tonsysteme zu ertüchtigen und weiter zu entwickeln.

**Orientierende Systemanalysen (s. B7)** für Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle in Tonsteinen sind zu realisieren um Defizite des sicherheitsanalytischen Instrumentariums zu erkennen und eine belastbare Grundlage für einen Sicherheitsnachweis zu belegen.

#### 4. FuE-Arbeiten im Wirtsgestein Granit (kristalline Gesteine)

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. Diese Arbeiten haben nicht nur dazu beigetragen das Verständnis über dieses Wirtsgestein zu erweitern, es sind auch eine Reihe von Methoden und Verfahren sowie Software-Werkzeuge (Programm ROCKFLOW) entwickelt und getestet worden. Diese werden auch für weitergehende Arbeiten außerhalb der Aktivitäten im Felslabor Grimsel angewendet.

Des Weiteren hatte die Bundesregierung angesichts der bald nach der Standortfestlegung einsetzenden politischen Diskussion über alternative Standorte zu Gorleben bei der BGR drei Studien zur Bewertung von Kristallin- und Salzstandorten in der Bundesrepublik Deutschland in Auftrag gegeben. Diese Studien lagen 1982/83 vor. Dabei konnten untersuchungswürdige potentielle Standortregionen 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 Kristallin) in den 1990er Jahren durch die BGR um entsprechende Informationen aus den Neuen Bundesländern ergänzt. Die Auswertung vorhandener geologischer Informationen schließt nun die in den Neuen Bundesländern gelegenen, untersuchungswürdigen Standortregionen mit Salz- und Kristallinvorkommen ein.

##### 4.1. Bisherige Arbeiten und Kenntnisstand

Deutsche Forschungsstellen sind seit mehr als zwei Jahrzehnten im Rahmen der Deutsch-schweizerischen Kooperation in die Untersuchungen im Felslabor Grimsel und seit Mitte der 1990er Jahre im Rahmen der deutsch-schwedischen Kooperation in die Arbeiten im HRL Äspö eingebunden.

Im Folgenden werden kurz die bisherigen Arbeiten und Ergebnisse vorgestellt, welche in den deutschen Projekten innerhalb dieser Kooperationen durchgeführt und erzielt wurden.

Die Ermittlung sicherheitsrelevanter geomechanischer und hydraulischer **Wirtsgesteinseigenschaften (s. A4)** stand im Fokus der Arbeiten zur Entwicklung und Erprobung von zerstörungsfreien seismischen In-situ-Methoden zur Beurteilung der Gebirgseigenschaften in der Umgebung untertägiger Hohlräume in kristallinen Gesteinen. In mehreren nationalen und internationalen Untertagelaboratorien (unter anderem im HRL Äspö) wurden in verschiedenen Wirtsgesteinen (Granit, Salz und Tonstein) refraktionsseismische Messungen zur Charakterisierung der Auflockerungszone erfolgreich durchgeführt. Die Ergebnisse stimmen gut mit Ergebnissen anderer Methoden überein. Die Erkundung erfolgt absolut zerstörungsfrei, da die seismischen Empfänger (Piezoelemente, Masse 2 und 10 g) am Gebirge angeklebt werden. Mit Hilfe der ermittelten seismischen Parameter (P- und S-Wellengeschwindigkeiten, Dämpfungsverhalten) kann die Auflockerungszone sehr gut charakterisiert werden. Darüber hinaus können Störungen und anomale Bereiche aufgrund abweichender Schalllaufzeiten und / oder Dämpfungseigenschaften erfasst werden.

Ziel eines weiteren Forschungsvorhabens (ASTER) war es, einen methodischen Ansatz zu entwickeln, der zu einem fundierten Standorterkundungs- und -auswahlprogramm führt, das auf die für die Belange der Endlagersicherheit wesentlichen Aspekte ausgerichtet ist. Die Besonderheit dieser Aufgabenstellung bestand darin, dass bereits in einer frühen Phase der Standorterkundung und Endlagerplanung die Frage nach dem tatsächlichen geowissenschaftlichen Informationsbedarf für eine Sicherheitsbewertung gestellt wird, den die weitere Standorterkundung decken soll. So wird - abweichend von der gängigen Praxis einer

möglichst umfassenden und damit aufwändigen Standortcharakterisierung - die Konzentration auf ein zielorientiertes Erkundungsprogramm ermöglicht.

Ein weiterer Schwerpunkt waren Untersuchungen zu spezifischen **Wirtsgesteinseigenschaften (s. A4)**, speziell zur Auswirkung mikrobieller Aktivität auf die Radionuklidmigration. Sulfat-reduzierende Bakterien (SRB) wurden im tiefen granitischen Aquifer-System des HRL Äspö nachgewiesen. Es gelang, einen neuen SRB-Stamm *Desulfovibrio äspöensis* zu isolieren. Grundlegende Prozesse der Wechselwirkung von Uran, Curium, Neptunium und Plutonium mit Zellen von *D. äspöensis* wurden untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die Zellen alle vier Actiniden aus der Angebotslösung entfernen. Die Menge an entferntem Actinid und die Art des Wechselwirkungsmechanismus variierten zwischen den unterschiedlichen Actiniden.

Die Untersuchungen mit Plutonium-242 zeigten, dass die Zellen in der Lage sind, aus einer Pu-Lösung, die Pu(VI) und Pu(IV)-Polymere enthält, Pu(VI) zu binden und dieses schnell zu reduzieren. Im Fall von Curium in der Oxidationsstufe III und bei niedrigen Metallkonzentrationen dominiert die Biosorption unter Bildung eines innersphärischen Oberflächenkomplexes wahrscheinlich an organischen Phosphatgruppen der Zellwandstruktur.

Untersuchungen zum **geotechnischen Barrierensystem (s. A5)** zielten auf ein Aufsättigungsmodell für Bentonit, das im Rahmen von Langzeitsicherheitsanalysen verwendet werden kann und daher so einfach wie möglich und dennoch aussagekräftig ist. Eine umfassende Diskussion der Bentonitmikrostruktur sowie der aufsättigungsrelevanten Prozesse bilden die Grundlage für stichhaltige konzeptuelle Modelle. Ein Vergleich dieser Grundlagen mit den z. Z. verwendeten Ansätzen weist auf Schwächen in den existierenden Modellen hin.

Als Ergebnis lässt sich feststellen, dass die Beschreibung der Mikrostruktur des Bentonits sowie die Zusammenstellung der bei Wasserzutritt ablaufenden Prozesse die Komplexität des Aufsättigungsvorgangs belegen. Neu entwickelte konzeptuelle Modelle basieren im Wesentlichen auf gut untersuchten, einfachen Gesetzmäßigkeiten. Die Relationen zwischen der Bentonittrockendichte und der Saugspannung sowie der Permeabilität im gesättigten Zustand konnten durch Kompilation von Literaturdaten aufgestellt werden und zeigen in beiden Fällen einen auffallend engen Zusammenhang. Weitere fehlende Größen lassen sich mit vergleichsweise geringem experimentellen Aufwand ermitteln. Die Umsetzung in ein numerisches Modell ist einfach. Begleitend durchgeführte Experimente liefern erstmals eine Datenbasis, die die Dynamik der Aufsättigung sowohl für die Aufsättigung durch flüssiges Wasser als auch für die Aufsättigung durch Wasserdampf in guter räumlicher und zeitlicher Auflösung beschreibt. Außerdem stehen nunmehr Daten über die Geschwindigkeit der Aufsättigung durch Dampf zur Verfügung. Die Überprüfung der parallel dazu entwickelten numerischen Codes mit Hilfe der neuen Datenbasis sowie den aus der Literatur bekannten Ergebnissen bestätigt die neuen Ansätze für Laborbedingungen. Außerdem wurde die hohe Relevanz der Dampfdiffusion bei der Aufsättigung des Bentonits demonstriert.

Im HRL Äspö waren Untersuchungen zur Mobilität Endlager relevanter Radionuklide in granitischen Endlagersystemen, vor allem von Actiniden, ein Schwerpunkt deutscher FuE-Aktivitäten. In zwei Vorhaben wurde das Isolationspotential der **geologischen Barriere (s. B2)** Granit und die Mobilität geogener Radionuklide während der geologischen Vergangenheit untersucht. Untersuchungen zur Uran- und Thoriummobilität in der geologischen Vergangenheit wurden im URL Äspö durchgeführt. In den untersuchten Gesteinen war durch Wechselwirkungen mit untertägigen Lösungen das Uran innerhalb der jüngeren geologischen Vergangenheit zumindest in Klüften mobil.

Am Beispiel der Granitoide von Äspö ist es gelungen, eine quantitative Beurteilung der Gesamt-Immobilisierungskapazität der geologischen Barriere Granit zu ermitteln. Insgesamt

bietet die geologische Barriere Granit ein großes chemisches Immobilisierungspotential für endlagerrelevante Elemente.

Diese Untersuchungen wurden auf Granite mit Mikroklüften aus dem HRL Äspö ausgedehnt, die auf ihre Rückhaltefähigkeit gegenüber Endlager relevanten Elementen (Co, Sr, Cs, Ba, Y, Nd, Sm, Yb, Th, U) untersucht wurden.

Ein weiterer Schwerpunkt war die **Entwicklung von Modellen (s. B5/B6)** zur Berechnung von **Zweiphasen-Strömungs- und Transportvorgängen** in wasserführendem, geklüftetem Fels und die Vertiefung der Kenntnisse zu den Zweiphasenfluss-Prozessen.

Die ermittelten Ergebnisse der experimentellen Arbeiten erweitern und vertiefen den Kenntnisstand auf dem Gebiet der Zweiphasen-Strömungs- und Transportvorgänge in der geotechnischen Barriere Bentonit sowie in einer gering durchlässigen geklüfteten wasserführenden Granitformation. Die experimentellen Daten ermöglichen insbesondere eine verbesserte Beschreibung der hydraulisch wirksamen Prozesse im geologischen Nahfeld von untertägigen Strecken. Mit dem weiterentwickelten Rechenprogramm ROCKFLOW/ROCKMECH können zukünftig dreidimensionale Berechnungen von Zweiphasen-Strömungs- und Transportvorgängen in wasserführenden geklüfteten Gesteinen durchgeführt werden.

In einem weiteren Projekt wurden dazu **Zweiphasenflussprozesse in Einzelklüften** und Klufnetzwerk-Gesteinsmatrix-Systemen untersucht und einer effizienten numerischen Simulation zugänglich gemacht. Das Verhalten der Zweiphasenströmungen in Klufnetzwerken konnte voll gekoppelt mit dem Verhalten in der Gesteinsmatrix in einer Simulationssoftware gerechnet werden. Dabei wurden modernste numerische Verfahren (gemischt dimensionale Finite Volumen Verfahren, unstrukturierte Gitter, Adaptivität, Mehrgitterverfahren, Parallelisierung) zu einer effizienten Einheit mit Preprocessing (Gebietsgenerierung nach geostatistischen Vorgaben, Gittergenerierung) und Postprocessing (Visualisierung) verbunden.

#### **4.2. Laufende Arbeiten und Perspektive**

Deutsche Forschungsstellen beteiligen sich an Untersuchungen im Felslabor Grimsel und an Arbeiten im HRL Äspö. Die Zusammenarbeit erfolgte in allen Experimentphasen des Felslabor Grimsel unter anderem im Rahmen der Projekte GMT, CRR und FEBEX II, das nun in das EC-Projekt NF-PRO eingebunden ist.

Im schwedischen HRL Äspö erfolgt die Beteiligung deutscher Forschungsstellen in den Projekten Prototype Repository, Temperature Buffer Test, Modellierung der Eigenschaften der Bentonitbarriere sowie in Projekten, die sich mit der Migration von Radionukliden befassen.

Diese Zusammenarbeit im internationalen Rahmen soll fortgesetzt werden, obwohl nach Ansicht vieler Sachverständiger die Endlagerung Wärme entwickelnder Abfälle in kristallinen Gesteinen eine aus konzeptioneller Sicht in Deutschland nicht präferierte Option darstellt. In kristallinen Gesteinen übernimmt die technische und nicht die geologische Barriere die Hauptlast zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit. Die FuE-Aktivitäten, an denen sich deutsche Forschungsstellen in ausländischen Untertagelabors in Granit beteiligen, sind daher Untersuchungen zu Versatz- und Puffermaterialien, Mess- und Charakterisierungsmethoden für Endlagerkomponenten wie Verschlüsse oder übergreifend angelegte Arbeiten zum Verhalten von Radionukliden in geklüfteten Geomatrizes, d. h. zur Radionuklidmigration und sind daher eigentlich nicht auf Wirtsgestein spezifische Fragestellungen ausgerichtet.

Diese Arbeiten sollen somit insbesondere Beiträge zum Schwerpunkt **Geotechnisches Barriersystem (s. A5)** liefern. Sie führen zu einer nachhaltigen Verbesserung des wissenschaftlichen Kenntnisstands und können unterstützend bei der Behandlung ähnlicher Systeme in den für Deutschland bevorzugt in Betracht zu ziehenden Wirtsgesteinen angewandt werden.

## 5. FuE-Schwerpunkte und FuE-Themen

Die im Folgenden aufgeführten FuE-Themen behandeln Forschungsthemen, die für die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in den Wirtsgesteinen Steinsalz und Tonstein von Bedeutung sind und die zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht als geklärt angesehen werden können. FuE-Themen mit Ausrichtung auf wirtsgesteinsspezifische Fragestellungen zu kristallinen Gesteinen sind nicht explizit enthalten. Die FuE-Arbeiten zur Endlagerung in kristallinen Gesteinen (Granit) betreffen die in Abschnitt 4. erläuterten Aktivitäten im Rahmen internationaler Zusammenarbeit.

Priorität bei den künftigen FuE-Arbeiten haben grundsätzlich Untersuchungen mit Bezug zum Wirtsgestein Steinsalz. Die noch erforderlichen wissenschaftlichen Arbeiten, die als Grundlage eines Sicherheitsberichts für ein Endlager im Steinsalz zu realisieren sind, müssen ziel- und ergebnisorientiert und mit hoher Präferenz durchgeführt werden. Bei vielen der FuE-Themen, in denen das Wirtsgestein Steinsalz aufgeführt ist, sind wegen des weit fortgeschrittenen Bearbeitungs- und Kenntnisstands lediglich Restarbeiten erforderlich.

FuE-Arbeiten zur Endlagerung im Tonstein werden mit geringerer Priorität als Arbeiten zum Steinsalz versehen.

Arbeiten zu spezifischen Komponenten von Endlagern in kristallinen Gesteinen (z. B. geotechnischen Barrieren) sollen aufgrund der genannten grundsätzlichen konzeptionellen Bedingungen mit geringster Priorität durchgeführt werden. Der Umfang wird durch die oben angesprochenen Randbedingungen begrenzt.

In diesem Förderkonzept wird nicht mehr angegeben, welche Institution schwerpunktmäßig für die Bearbeitung eines FuE-Themas verantwortlich zeichnet und damit implizit wie die Bearbeitung finanziert wird. Die mit Mitteln aus der institutionellen Förderung der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), des Forschungszentrums Jülich (FZJ), des Forschungszentrums Karlsruhe (FZK) und des Forschungszentrums Dresden-Rossendorf (FZR) finanzierten Untersuchungen sind sehr eng mit den von BMWi über den Projektträger bei DBE Technology, GRS, Universitäten oder sonstigen Forschungseinrichtungen projektfinanzierten Arbeiten verbunden. Zunehmend wird aufgrund rückläufiger oder stagnierender Institutshaushalte eine zusätzliche Projektförderung dieser Einrichtungen erforderlich. In vielen Fällen ist eine ausschließliche Zuordnung einer FuE-Thematik zu einer bearbeitenden Forschungsstelle auch deshalb nicht mehr möglich, weil die komplexe Problemstellung die gemeinsame Bearbeitung durch verschiedene Einrichtungen im Rahmen von Verbundvorhaben erfordert. Solche Verbundvorhaben, in welche die jeweiligen Partner ihre spezifischen Kenntnisse und Erfahrungen einbringen, erlauben die Bearbeitung sehr komplexer Fragestellungen in kurzen Zeiträumen. Aufgrund der positiven Erfahrungen hinsichtlich Effizienz und Mitteleinsatz und wegen der fachlichen Erfordernisse zur interdisziplinären Zusammenarbeit wird diese Option künftig noch stärker eingesetzt werden.

In Anlehnung an die bisher veröffentlichten Förderkonzepte gliedern sich die Themen in folgende Themenbereiche:

- A Endlagerkonzepte und Endlagerteilbereiche**
- B Daten und Instrumente für die Sicherheitsanalyse**
- C Kernmaterialüberwachung**

Da in Deutschland keine Untertagelabors in Tonstein oder kristallinen Gesteinen (Granit) existieren, können In-situ-Untersuchungen nur im Ausland durchgeführt werden.

**Ton/Tonstein:** Mont Terri/Schweiz, URL Mol/Belgien, Tournemire/Frankreich,  
MeuseHaute Marne/Frankreich (Bure)

**Granit:** Felslabor Grimsel/Schweiz, HRL Äspö/Schweden

Die Untertagelabors in Tonstein und kristallinem Gestein, die am ehesten für deutsche Verhältnisse repräsentativ sind, sind durch Unterstreichung kenntlich gemacht.

## **5.1. A Endlagerkonzepte und Endlagerteilbereiche**

### A1 Endlagerkonzepte

- Optimierung der Endlagerkonzepte für Wärme entwickelnde Abfälle in Steinsalz
- Entwicklung generischer Endlagerkonzepte für Wärme entwickelnde Abfälle in Tonstein
- Gegenüberstellung und Bewertung generischer Endlagerkonzepte anhand wissenschaftlich-technischer, sicherheitsanalytischer und sozialwissenschaftlicher Aspekte
- Weiterentwicklung des konzeptuellen Sicherheitsnachweises

### A2 Abfälle und Gebinde (technische Barrieren)

- Weiterentwicklung von Fixierungsmatrizes
- Bewertung der Relevanz chemotoxischer Abfallbestandteile für die Langzeitsicherheit

### A3 Endlagertechnik

- Entwicklung und Erprobung eines Einlagerungskonzeptes für unzerschnittene Brennstäbe in Bohrlöchern insbesondere im Steinsalz
- Prüfung der Übertragbarkeit der Einlagerungs-, Handhabungs- und Überwachungstechnik von Steinsalz auf Tonstein und kristalline Gesteine
- Entwicklung, Optimierung und Erprobung von Verfahren für die Überwachung von Endlagern während der Betriebsphase

### A4 Wirtsgesteinseigenschaften

- Erhebung, Beschreibung und Beurteilung der Endlager relevanten Eigenschaften von Steinsalz und Tonsteinen insbesondere hinsichtlich des Schädigungs- und Verheilungsverhaltens sowie im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit
- Erhebung, Beschreibung und Beurteilung der Endlager relevanten Eigenschaften von Steinsalz und Tonsteinen hinsichtlich mikrobieller Effekte
- Entwicklung und Verbesserung geophysikalischer Verfahren zur zerstörungsfreien Wirtsgesteinserkundung mit größerer Reichweite, insbesondere zur Detektion und Charakterisierung inhomogener Bereiche in Steinsalz und Tonstein
- Überprüfung und Entwicklung von analytischen Methoden zur Charakterisierung von Inhomogenitäten und Übertragbarkeit effektiver Parameter auf größere Bereiche (Upscaling)

### A5 Geotechnisches Barrierensystem

- Konzeption, Bau und Erprobung langzeitsicherer Abschlussbauwerke bzw. deren Komponenten für Endlager im Steinsalz
- Mitwirkung an Konzeption, Bau und Erprobung langzeitsicherer Abschlussbauwerke bzw. deren Komponenten in Tonstein
- Entwicklung von Konzepten für Verschlussysteme im Bereich der Kontakt- und Auflockerungszone mit Nachweis der Barrierewirkung
- Ingenieurtechnischer Nachweis der Langzeit-Barrierewirkung des geotechnischen Barrierensystems

- Untersuchung und Auswahl geeigneter Verfüll- und Puffermaterialien für Endlager in Steinsalz und Tonstein, insbesondere hinsichtlich des Verhaltens gegenüber Gasen und Flüssigkeiten sowie ihres Sorptionsverhaltens
- Auswahl und Untersuchung geeigneter Materialien zur Rückhaltung von nicht oder kaum sorbierenden ggf. Dosis bestimmenden Radionukliden im Nahbereich eines Endlagers

#### A6 Abtrennung und Umwandlung (P+T)

- Untersuchungen zur Auswirkung von P+T-Szenarien auf die Endlagerkonzepte
- Entwicklung von Verfahren zur Pu-Entsorgung
- Weiterentwicklung von Technologien zur Abtrennung und anschließenden Umwandlung von Plutonium und Actiniden sowie Bewertung des Transmutations- und Sicherheitspotenzials des Gesamtsystems „P+T“

### **5.2. B Daten und Instrumente für die Sicherheitsanalyse**

#### B1 Szenarientwicklung

- Zusammenstellung und Bewertung von FEP's (features, events, processes) für Endlager in den Wirtsgesteinen Steinsalz und Tonstein
- Systematische Herleitung, Klassifizierung und Bewertung von Szenarien für die zukünftige Entwicklung von Endlagern in Steinsalz und Tonstein

#### B2 Geologische Barriere

- Untersuchung und Modellierung des geomechanischen, geochemischen und thermohydromechanischen Verhaltens von Steinsalz und Tonsteinen
- Untersuchungen zur Beeinträchtigung des Isolationspotenzials der geologischen Barriere durch geogene und technogene Einwirkungen, auch unter Berücksichtigung der Entstehung und Ausbreitung von Gasen
- Untersuchungen und Modellierung der Radionuklidrückhaltung unter Berücksichtigung von chemischen und mikrobiologischen Prozessen

#### B3 Geochemisch-technische Barriere

- Untersuchung der chemischen, physikalischen und mikrobiologischen Effekte und Prozesse im Nahfeld mit Auswirkung auf die Mobilität von Radionukliden und Entwicklung von Modellen zur Beschreibung der ablaufenden Prozesse in Steinsalz und Tonstein
- Absicherung und Erweiterung der thermodynamischen Datenbasis für Actiniden und Spaltprodukte unter Nahfeldbedingungen

#### B4 Technische und geotechnische Barrieren

- Untersuchung der Entstehung, der Freisetzung, des Transports und des Verbleibs von Gasen und Entwicklung Prozess beschreibender Modelle
- Auswirkungen von Gasentwicklung auf die Funktion von Versatzmaterialien, Puffermaterialien und Verschlussbauwerken
- Untersuchungen zur Wechselwirkung von verglasten Abfällen mit Tonstein und Puffermaterialien und Entwicklung Prozess beschreibender Modelle

- Modellierung und Quantifizierung des Radionuklid-Quellterms anhand von Korrosionsuntersuchungen an Abfallprodukten und abgebrannten Brennelementen (UO<sub>2</sub>, MOX, MTR, HTR)
- Modellierung des Langzeitverhaltens von Abschlussbauwerken bzw. deren Komponenten

#### B5 Methoden und numerische Simulation

- Weiterentwicklung und Aktualisierung der Methoden und Rechenprogramme für Langzeitsicherheitsanalysen, insbesondere auf der Grundlage definierter Szenarien, modifizierter Entsorgungskonzepte und neuer Erkenntnisse aus FuE-Arbeiten unter Berücksichtigung der internationalen Entwicklung
- Verbesserung Prozess beschreibender Modelle, insbesondere durch Entwicklung gekoppelter Modelle

#### B6 Qualifizierung von Modellen und Reduzierung von Unsicherheiten

- Anwendung existierender oder Entwicklung neuer Methoden und Verfahren für die Qualifizierung von Modellen zur Beschreibung thermischer, geomechanischer, hydraulischer und geochemischer Prozesse (THMC-Kopplung)
- Qualifizierung von Grundwasserströmungs- und Transportmodellen durch Labor- und In-situ-Untersuchungen
- Überprüfung der Übertragbarkeit der Aussagen von Laboruntersuchungen auf Techniks- und reale Systeme
- Verbesserung der Aussagesicherheit von Langzeitsicherheitsanalysen
- Entwicklung von Methoden zum Abbau von Unsicherheiten
- Untersuchung relevanter Prozesse bzw. relevanter Indikatoren in natürlichen oder historisch-anthropogenen Systemen, die zur Erhöhung des Vertrauens in das Prozessverständnis oder die Simulationsergebnisse beitragen

#### B7 Systemanalysen

- Weiterentwicklung der Systemanalyse für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle im Steinsalz
- Orientierende Systemanalyse für Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle in Tonsteinen

### 5.3. C Kernmaterialüberwachung

Die besondere Struktur und Problematik der internationalen Kernmaterialüberwachung erfordert zur Durchführung von notwendigen Forschungs- und Entwicklungsprogrammen eine Einteilung in konzeptionelle, technisch-methodische und politisch-institutionelle Bereiche. Die Erfahrungen der Vergangenheit haben gezeigt, dass alle diese Aspekte für eine erfolgreiche Anwendung bei den Kernmaterialkontrollen zusammengeführt und behandelt werden müssen. Weiterhin ist wichtig, diese FuE-Projekte in Forschungsnetzwerke einzubetten, die über diese vielfältige Kompetenz verfügen. Beispiele hierfür gibt es im Unterstützungsprogramm der Bundesregierung für die IAEQ. Der Einsatz der entwickelten Techniken, Methoden und Politiken bei der IAEQ oder bei EURATOM erfordert eine multinationale Kooperation bei den unterschiedlichen FuE-Aktivitäten. Folgende spezifischen Programmpunkte sollten in den nächsten Jahren behandelt werden.

#### C1 Konzeptionelle Aspekte

- **Weiterentwicklung des Zusatzprotokolls**  
Durch das Zusatzprotokoll hat sich eine Wandlung der IAEQ-Safeguards-Kultur ergeben. Insbesondere bedarf der staatspezifische Ansatz (State-Level Approach) einer Weiterentwicklung.
- **Safeguards für die Endlagerung abgebrannter Brennelemente**  
Die Endlagerung wie auch die Langzeit-Zwischenlagerung abgebrannter Brennelemente stellen eine langfristige Aufgabenstellung dar. Safeguards müssen an die jeweiligen technischen und institutionellen Gegebenheiten angepasst werden. Dies gilt auch für die Diskussionen im internationalen Umfeld.
- **Neue Inspektionsregime**  
Mit Hilfe der Spieltheorie müssen neue Inspektionsregime entwickelt werden, die die IAEQ in die Lage versetzen, ihren Inspektionsaufwand zielgerecht auf Problemfälle zu konzentrieren.
- **Berücksichtigung von Audit-Prinzipien in Safeguardsansätzen**  
In Zusammenarbeit mit EURATOM und unter Beachtung der Belange der IAEQ sind Safeguardsmodelle zu entwickeln und zu bewerten, die ganzheitlich betriebliche Sicherheit und physischen Schutz angemessen berücksichtigen.
- **Neue Safeguards-Konzepte für den nuklearen Brennstoffkreislauf**  
Die Verbesserung der Effektivität und Effizienz der Safeguards bedarf einer permanenten Überprüfung und Anpassung der Safeguards-Konzepte im nuklearen Brennstoffkreislauf.

#### C2 Technisch-methodische Aspekte

- **Überwachung mittels Fernerkundung**  
Sowohl im Routineeinsatz als auch bei der Entdeckung undeklarer nuklearer Materialien und Aktivitäten spielt die Satellitenüberwachung eine zunehmend größere Rolle. Die Einsatz- und Anwendungsmöglichkeiten sowie Auswertetools müssen weiterentwickelt werden.
- **Umweltbeobachtung**  
Durch Verbesserungen von Probenahmen und Analysen können die Aussagen aus der Umweltbeobachtung für Safeguards zur Entdeckung undeklarer Aktivitäten und Materialien präzisiert werden.
- **Geophysikalische Messverfahren**  
Für die Endlagerung abgebrannter Brennelemente wird der Einsatz geophysikalischer Messverfahren diskutiert. Mögliche geeignete Systeme müssen für die Safeguardsanwendung getestet und ggf. angepasst werden.
- **Neue Verifikationstechniken**  
Durch Analyse und Bewertung anderer Verifikationsregime sollen Methoden und Techniken identifiziert werden, die bei der nuklearen Überwachung zur Anwendung kommen könnten.
- **Neue elektronische Überwachungssysteme und Datenfernübertragung**  
Der ständig wachsende Datenanfall aus digitalen Systemen erfordert die Entwicklung geeigneter Methoden des Datenmanagements, der Datenverschlüsselung und der Datenfernübertragung.

- **Weiterentwicklung digitaler Kamera- und Siegelssysteme und Einrichtung für eine Fernabfrage**  
Es zeichnet sich ab, dass zur Reduzierung von Inspektionsaufwand integrierte Systeme mit elektronischen Siegeln und Kamerasystemen verstärkt zum Einsatz kommen. Hier sind auch Anlagenbetreiber in die Entwicklungen einzubinden, da solche Systeme ohne Inspektorpräsenz betrieben werden sollen, und da die Betreiber eigene Systemanforderungen geltend machen.
- **Informationsanalyse und Informationsverarbeitung für Safeguards**  
Recherche und Informationsanalyse sind spätestens mit dem Zusatzprotokoll zu einem wesentlichen Bestandteil von Safeguardskonzepten geworden, insbesondere mit Bezug auf den staatspezifischen Ansatz (State-Level Approach). Es müssen geeignete Verfahren und Vorgehensweisen entwickelt werden, um die Prozesse bei der Recherche, Analyse und Bewertung von Safeguards relevanten Informationen, z. B. im Open Source Bereich, zu vereinfachen.

### C3 Politisch-institutionelle Aspekte

- **Proliferationsresistenz**  
Bei Nuklearanlagen der neuen Generation müssen bereits beim Entwurf internationale Safeguards und Elemente der Proliferationsresistenz berücksichtigt werden.
- **Multinationale Anlagen**  
Die Multinationalisierung von Anlagen des nuklearen Brennstoffkreislaufs, insbesondere Anreicherung und Wiederaufarbeitung, kann der Nonproliferation dienen und den Einsatz von Safeguards vereinfachen.
- **Fissile Material Production Cut-off Treaty (FMCT)**  
Überlegungen zur Abrüstung von Kernwaffen und waffenfähigem Material beinhalten auch Konzeptionen für Safeguards in Kernwaffenstaaten.

## 6. Literatur

Forschungsförderung zur Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen (1997-2001). Förderkonzept des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, herausgegeben vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, Referat 414, und Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Projektträger des BMBF für Entsorgung (PTE), Forschungszentrum Karlsruhe, April 1998

Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (2002-2006), Förderkonzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Nov. 2001

Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen vom 14.06.2000 über die künftige Nutzung der Kernenergie incl. der vom BMU gehegten „Zweifel“ an der Eignung des Steinsalzstockes von Gorleben (Anlage 4 der Vereinbarung)

Nukleare Sicherheits- und Endlagerforschung in Deutschland. Bericht der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) berufenen Arbeitsgruppe (Evaluierungskommission), Bonn, 21. Januar 2000

Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Dezember 2002

Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Wirtsgesteine im Vergleich. Synthesebericht des Bundesamtes für Strahlenschutz, 04.11.2005

Vergleich der verschiedenen Entsorgungsalternativen und Beurteilung ihrer Realisierbarkeit. Studie 'Entsorgungsalternativen'. Kernforschungszentrum Karlsruhe. KfK-3000, 1980

German Direct Disposal Project Special, Nuclear Technology Vol. 121, No. 2, Febr. 1998

Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands, Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen; Hoth et al. BGR, Berlin/Hannover, April 2007

Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS Project), Contract N° FI4W-CT95-0009, 1 January 1996 to 31 December 1998, Final Report

FZKA 6809 Forschungszentrum Karlsruhe - Wissenschaftliche Berichte – Long-Term Performance of Candidate Materials for HLW/Spent Fuel Disposal Containers, 2003

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

RSK-Stellungnahme Sicherheitstechnische Aspekte konzeptioneller Fragestellungen zur Endlagerung von bestrahlten Brennstäben mittels Kokillen in Bohrlöchern anhand eines Vergleiches mit dem Konzept „Streckenlagerung von dickwandigen Behältern“ 31.03.2005 (380. RSK-Sitzung)

PSE, Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung, Zusammenfassender Abschlussbericht (4 Bände) und 19 Fachbände, 1985

PAGIS, Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste. Disposal in Salt formations, EUR 11778 EN, GSF-Report 23/88, 1988

PACOMA, Performance Assessment of the confinement of medium-active and alpha-bearing Waste (EC-project 1988-1990), Berichte EUR 12993, EUR 13042, EUR 13143, EUR 13634, 1991

SAM, Systemanalyse Mischkonzept (SAM), Hauptband, KWA-Nr. 2190 A1, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, 1989

## **Anhang 1 Verzeichnis laufender Forschungsvorhaben (Projektförderung)**

Im Folgenden sind die laufenden Forschungsvorhaben (Stand 12/2007) für den Bereich der Endlagerung radioaktiver Abfälle und der Kernmaterialüberwachung aufgelistet. Bei den Angaben zu den einzelnen Vorhaben handelt es sich um Förderkennzeichen, Laufzeit, bearbeitende Institutionen und Thema.

### **A Weiterentwicklung von Endlagerkonzeptionen unter Sicherheitsgesichtspunkten**

#### **A1 Abfallcharakterisierung und –klassifizierung**

#### **A2 Wissenschaftliche Grundlagen für Sicherheitsanforderungen**

<b>02E10286</b> 10/06 bis 09/08	DBE Technology GmbH	Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein
------------------------------------	------------------------	--

#### **A3 Weiterentwicklung von Einlagerungs-, Handhabungs- und Überwachungstechniken**

<b>02E9854</b> 02/04 bis 01/09	DBE Technology GmbH	Optimierung der Direkten Endlagerung durch Kokillenlagerung in Bohrlöchern, Machbarkeitsstudie und Entwurfs- und Konzeptplanung (DENKMAL)
-----------------------------------	------------------------	---

#### **A4 Charakterisierung und Eigenschaften potentieller Wirtsgesteinsformationen**

<b>02E9965</b> 06/05 bis 05/08	DBE Technology GmbH	Untersuchungen zur Wirksamkeit des geologischen und geotechnischen Barrierensystems im Hinblick auf die Standortauswahl in magmatischen Gesteinen - WIBASTA
-----------------------------------	------------------------	---

<b>02E9975</b> 06/05 bis 05/08	GRS Braunschweig	Untersuchung zur Wirksamkeit des geologischen und geotechnischen Barrierensystems im Hinblick auf die Standortauswahl in magmatischen Gesteinen
-----------------------------------	---------------------	---

<b>02E10086</b> 08/06 bis 07/09	DBE Technology GmbH	Untersuchungen zur Auswirkung einer Temperaturerhöhung in Tonformationen in Deutschland im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit eines Endlagers und irreversible Veränderungen der potenziellen Wirtsfornation
------------------------------------	------------------------	--

<b>02E10226</b> 09/06 bis 06/08	GRS Braunschweig	Gasmigration im Opalinus Ton in Abhängigkeit vom Gasinjektionsdruck (unterhalb des Fracdruckes)
------------------------------------	---------------------	---

#### **A5 Entwicklung geotechnischer Barrieren**

## **B Verbesserung von Instrumentarien für die Sicherheitsbewertung von Endlagern**

### **B1 Szenarienentwicklung**

<b>02E10055</b> 10/05 bis 09/09	GRS Braunschweig	Überprüfung und Bewertung des bereits verfügbaren Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HLW
<b>02E10065</b> 10/05 bis 09/09	DBE Technology GmbH	Überprüfung und Bewertung des bereits verfügbaren Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HLW

### **B2 Verhalten der Wirtsgesteinsformation**

<b>02E10045</b> 07/05 bis 09/10	GRS Braunschweig	Beteiligung am Forschungsprogramm der ANDRA im Untertage Labor Bure
<b>02E10096</b> 05/06 bis 04/09	Forschungszentrum Karlsruhe	Verbundprojekt: Kolloidgetragener Radionuklidtransport in geklüfteten Gesteinen
<b>02E10106</b> 05/06 bis 04/09	GRS Braunschweig	Verbundprojekt: Kolloidgetragener Radionuklidtransport in geklüfteten Gesteinen
<b>02E10377</b> 05/07 bis 12/11	GRS Braunschweig	Untersuchung der THM-Prozesse im Nahfeld von Endlagern in Tonformationen
<b>02E10427</b> 07/07 bis 12/09	Technische Universität Clausthal	Untersuchungen zur Validierung von Modellansätzen für Tongestein anhand von Feldexperimenten am Standort Tournemire (F) im Rahmen DECOVALEX-THMC
<b>02E10437</b> 10/07 bis 12/09	Universität Weimar	Hydraulische Permeabilität von moderat bis hochverdichteten expansiven Tonen

### **B3 Chemische und physikalische Effekte im Nahfeld**

<b>02E9985</b> 07/05 bis 10/08	Forschungszentrum Dresden-Rossendorf	Mobilisierung von Actiniden durch mikrobiell produzierte Liganden unter Berücksichtigung der Endlagerung von radioaktivem Abfall
<b>02E10015</b> 08/05 bis 04/09	Technische Universität Darmstadt	Untersuchungen zum Gastransport in der Auflockerungszone in einem geologischen Endlager in Tongestein
<b>02E10025</b> 08/05 bis 11/08	Universität Hannover	Stabilität von Organotonen als Anionen-Adsorber unter Endlagerbedingungen - Experiment und Modellierung
<b>02E10126</b> 07/06 bis 06/09	Forschungszentrum Karlsruhe	Verbundvorhaben THEREDA: Entwicklung einer Thermodynamischen Referenzdatenbasis
<b>02E10136</b> 07/06 bis 06/09	Forschungszentrum Dresden-Rossendorf	Verbundvorhaben THEREDA: Entwicklung einer Thermodynamischen Referenzdatenbasis

<b>02E10146</b> 07/06bis 06/09	GRS Braunschweig	Verbundvorhaben THEREDA: Entwicklung einer Thermodynamischen Referenzdatenbasis
<b>02E10075</b> 10/05 bis 09/08	GRS Braunschweig	Thermodynamische Daten für Eisen(II) in hochsalinaren Lösungen bei Temperaturen bis 90°C (Kurztitel: FeT90)
<b>02E10357</b> 04/07 bis 03/10	Forschungszentrum Jülich GmbH	Wechselwirkung mobilisierter Radionuklide mit sekundären Phasen in endlagerrelevanten Formationswässern
<b>02E10387</b> 05/07 bis 04/09	GRS Braunschweig	Verbundprojekt: Chemisch-toxische Stoffe in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle - Kurztitel: CHEMOTOX
<b>02E10397</b> 05/07 bis 04/09	Öko-Institut e.V.	Verbundprojekt: Chemisch-toxische Stoffe in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle - Kurztitel: CHEMOTOX
<b>02E10407</b> 05/07 bis 04/09	DBE Technology GmbH	Verbundprojekt: Chemisch-toxische Stoffe in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle - Kurztitel: CHEMOTOX

#### **B4 Verhalten von geotechnischen Barrieren**

<b>02E9743</b> 08/03 bis 06/08	DBE Technology GmbH	Messtechnische und modelltheoretische Untersuchungen zum THM-Verhalten einer Bentonit-Barriere im Bereich des Phasenübergangs der Porenflüssigkeit unter Einsatz faseroptischer Technologie im Rahmen von Versuchen im URL Äspö
<b>02E9894</b> 01/04 bis 12/08	GRS Braunschweig	Selbstdichtende Barrieren aus Ton/Mineral-Gemischen in einem Tonendlager - SB-Experiment - im Mt. Terri Untertage-labor - Hauptprojekt -
<b>02E9944</b> 08/04 bis 12/08	GRS Braunschweig	Geoelektrische Untersuchung der Aufsättigung von Bentonitbarrieren im HRL-Äspö-Projekt "Prototype Repository" - Phase 2
<b>02E10236</b> 11/06 bis 10/09	GRS Braunschweig	Verbundprojekt: Überprüfung und Kalibrierung von THM-Modellen zur Beschreibung des Langzeitverhaltens der Auflockerungszone im Steinsalz
<b>02E10246</b> 11/06 bis 10/09	DBE Technology GmbH	Verbundprojekt: Überprüfung und Kalibrierung von THM-Modellen zur Beschreibung des Langzeitverhaltens der Auflockerungszone im Steinsalz
<b>02E10256</b> 11/06 bis 10/09	IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH	Verbundprojekt: Überprüfung und Kalibrierung von THM-Modellen zur Beschreibung des Langzeitverhaltens der Auflockerungszone im Steinsalz
<b>02E10447</b> 10/07 bis 09/09	IBeWA Wilsnack & Partner	Zerstörungsfreie In-situ-Permeabilitätsmessung
<b>02E10457</b> 11/07 bis 03/10	Technische Universität Bergakademie Freiberg	Untersuchungen und modelltechnische Beschreibung heterogener Strukturen aus Bindemittel und Zuschlag
<b>02E10477</b> 10/07 bis 09/08	GRS Braunschweig	Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz in einem HAW-Endlager, Kurztitel: Repoperm
<b>02E10487</b>	DBE Technology	Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salz-

10/07 bis 09/08 GmbH grus-Versatz in einem HAW-Endlager, Kurztitel: Repoperm

### **B5 Verhalten von geologischen Barrieren**

<b>02E10035</b> 07/05 bis 06/08	Technische Universität München	Wechselwirkungen von Actiniden mit Anorganohuminkolloiden
<b>02E10116</b> 07/06 bis 06/09	GRS Braunschweig	Barriereintegrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in Tonformationen
<b>02E10156</b> 07/06 bis 12/09	Forschungszentrum Dresden-Rossendorf	Verbundprojekt Actinidenmigration im natürlichen Tongestein: Charakterisierung und Quantifizierung des Einflusses von Tonorganika auf die Wechselwirkung von U und Am im Ton
<b>02E10166</b> 09/06 bis 12/09	Universität Mainz	Verbundprojekt Actinidenmigration im natürlichen Tongestein: Charakterisierung und Quantifizierung des Einflusses von Tonorganika auf die Wechselwirkung von U und Am im Ton
<b>02E10176</b> 07/06 bis 12/09	Institut für Interdisziplinäre Isotopenforschung	Verbundprojekt Actinidenmigration im natürlichen Tongestein: Charakterisierung und Quantifizierung des Einflusses von Tonorganika auf die Wechselwirkung von U und Am im Ton
<b>02E10186</b> 07/06 bis 12/09	Technische Universität München	Verbundprojekt Actinidenmigration im natürlichen Tongestein: Charakterisierung und Quantifizierung des Einflusses von Tonorganika auf die Wechselwirkung von U und Am im Ton
<b>02E10196</b> 09/06 bis 12/09	Universität des Saarlandes	Verbundprojekt Actinidenmigration im natürlichen Tongestein: Charakterisierung und Quantifizierung des Einflusses von Tonorganika auf die Wechselwirkung von U und Am im Ton
<b>02E10206</b> 07/06 bis 12/09	Forschungszentrum Karlsruhe	Verbundprojekt Actinidenmigration im natürlichen Tongestein: Charakterisierung und Quantifizierung des Einflusses von Tonorganika auf die Wechselwirkung von U und Am im Ton
<b>02E10216</b> 09/06 bis 12/09	Universität Potsdam	Verbundprojekt Actinidenmigration im natürlichen Tongestein: Charakterisierung und Quantifizierung des Einflusses von Tonorganika auf die Wechselwirkung von U und Am im Ton
<b>02E10417</b> 06/07 bis 04/10	Technische Universität Dresden	Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit der Komplexbildung und Sorption dreiwertiger Actinide Am(III), Pu(III) im System Actinid-NOM-natürliches Tongestein-Aquifer

### **B6 Methodenentwicklung und Rechenprogramme für Sicherheitsbewertungen**

<b>02E9934</b> 08/04 bis 01/08	GRS Braunschweig	Modellierung des großräumigen Schadstofftransports (Kurztitel: MOST)
<b>02E9954</b> 11/04 bis 07/08	GRS Braunschweig	Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlager
<b>02E10276</b> 10/06 bis 09/09	GRS Braunschweig	Weiterentwicklung sicherheitsanalytischer Methoden zur Vorbereitung eines Safety Case in Deutschland

<b>02E10296</b> 10/06 bis 09/09	Universität Bonn	Verbundvorhaben: Weiterentwicklung der Rechenprogramme d3f und r3t
<b>02E10306</b> 10/06 bis 09/09	Universität Freiburg	Verbundvorhaben: Weiterentwicklung der Rechenprogramme d3f und r3t
<b>02E10316</b> 10/06 bis 09/09	Universität Jena	Verbundvorhaben: Weiterentwicklung der Rechenprogramme d3f und r3t
<b>02E10326</b> 10/06 bis 09/09	Universität Heidelberg	Verbundvorhaben: Weiterentwicklung der Rechenprogramme d3f und r3t
<b>02E10336</b> 10/06 bis 03/10	GRS Braunschweig	Verbundvorhaben: Weiterentwicklung der Rechenprogramme d3f und r3t
<b>02E10366</b> 04/07 bis 12/10	GRS Braunschweig	Anpassung des EMOS-Programmsystems an moderne Softwareanforderungen
<b>02E10467</b> 09/07 bis 12/09	Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH	Beschreibung des reaktiven Stofftransports in einem salinaren Endlager mit dem Code TOUGHREACT

### ***B7 Validierung von Modellen, Unsicherheitsanalyse***

<b>02E9995</b> 06/05 bis 05/09	GRS Braunschweig	Grundlegende Prozesse zum Radionuklidtransport im Fernfeld eines Endlagers im Salz - Kurztitel FUNMIG-RTDC-5
-----------------------------------	---------------------	--

### ***NN Evaluierung Forschungsaktivitäten***

<b>02E9783</b> 09/03 bis 09/08	GRS Braunschweig	Handbuch der Endlagerung - Umgang mit wärmeentwickelnden und langlebigen schwach- und mittelaktiven Abfällen
<b>02E9793</b> 09/03 bis 09/08	Öko-Institut e.V.	Handbuch der Endlagerung - Umgang mit wärmeentwickelnden und langlebigen schwach- und mittelaktiven Abfällen
<b>02E10346</b> 01/07 bis 12/08	DBE Technology GmbH	Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für tiefe geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen

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

In der folgenden Aufstellung sind auch Vorhaben enthalten, die im Rahmen des Gemeinsamen Programms von BMBF und IAEO für die technische Entwicklung und weitere Verbesserung der IAEO-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.29** Nuclear Safeguards for Future Technologies
- GP-Nr. A.35** Application of Safeguards to Geological Repositories (AS-TOR), Group of Experts
- GP-Nr. A.36** Determination of Decommissioned Status of Facilities
- GP-Nr. A.38** Umbrella Task: Support for Novel Technologies

### **C2 Neue Techniken**

- 02W6243**      Forschungszent-      Institutionelle und technologische Weiterentwicklung von in-  
08/03 bis 04/09      rum Jülich GmbH      ternationalen Kernmaterialkontrollen
- GP-Nr. B.21**      Use of Satellite Imagery Data for Geological Repositories  
Monitoring
- GP-Nr. B.22**      Signatures of Nuclear Fuel Cycle Related Processes (Satellite  
Imagery/Space Borne Remote Sensing Data)

### **C3 Aufnahme, Auswertung, Zusammenführung und Fernüberwachung von Daten**

- GP-Nr. D.27**      Entwicklung eines neuen elektronisch - optischen Siegels mit  
Integrationsmöglichkeiten über VXI-Bus
- GP-Nr. D.32**      Passive Neutron Method for Verification of Spent Fuel in  
Sealed Multi-element Casks
- GP-Nr. D.35**      Next Generation Camera Module and Server-based Surveil-  
lance Systems

## **Anhang 2 Verzeichnis abgeschlossener Forschungsvorhaben (Projektförderung)**

In der folgenden Liste sind abgeschlossene Forschungsvorhaben (Stand 12/2007) zusammengestellt, die ab 1980 durch BMBF und ab 1999 durch BMWA bzw. BMWi auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle und Kernmaterialüberwachung gefördert wurden. Der größte Teil aller Vorhaben, die bis Ende 1995 im Rahmen des FuE-Programms Direkte Endlagerung durchgeführt wurden, sind unter A3 „Weiterentwicklung von Einlagerungs-, Handhabungs- und Überwachungstechniken“ zusammengefasst.

Bei den Angaben zu den einzelnen Vorhaben handelt es sich um Förderkennzeichen, Laufzeit, bearbeitende Institution und Thema.

### **A WEITERENTWICKLUNG VON ENDLAGERKONZEPTIONEN UNTER SICHERHEITSGESICHTSPUNKTEN**

#### **A1 Abfallcharakterisierung und –klassifizierung**

<b>KWA 5215/7</b> 04/86 bis 06/88	Siemens	Untersuchungsprogramm zum Verhalten abgebrannter Brennelemente bei starken mechanischen Einwirkungen
<b>KWA 5601/4</b> 01/86 bis 12/89	BAM	Weiterentwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens zur Qualitätskontrolle von zementierten LAW- und MAW-Abfällen
<b>KWA 5602/5</b> 04/86 bis 06/88	Battelle	Untersuchungen zum Fraktionierungsverhalten und zur Aerosolbildung beim Absturz von Gebinden mit hochradioaktivem Abfall im Endlager
<b>KWA 5902/7</b> 10/89 bis 05/90	Battelle	Untersuchung von Arbeiten auf dem Gebiet Gebindeabsturz und Aerosolfreisetzung im Endlager
<b>02E8080/4</b> 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
<b>02E8231/9</b> 10/90 bis 12/93	Institut für Energetik und Umwelt (IfE)	Bestimmung von Leitnukliden und Produkteigenschaften endzulagernder radioaktiver Abfälle
<b>02E8411/7</b> 10/90 bis 12/93	Battelle	Zerstörungsfreie Feststellung von Füllstand, freien Flüssigkeiten und Gasen in Abfallgebinden mit nicht-nuklearen Prüfmethoden
<b>02E8623</b> 10/93 bis 03/98	Uni Bonn	Entwicklung und Erprobung radiochemischer Verfahren für die Bestimmung reiner Alpha- und Beta-Strahler im Radionuklidinventar radioaktiver Abfälle

## **A2 Wissenschaftliche Grundlagen für Sicherheitsanforderungen**

<b>02E8442</b> 04/92 bis 06/95	NOELL	Untersuchungen zur Aussagefähigkeit von Prüfkriterien an nichtmetallischen Beschichtungen für Anlagen und Behälter zur Entsorgung radioaktiver Stoffe
<b>02E8684</b> 01/94 bis 05/96	DBE	FuE-Arbeiten zu Sicherheitsbetrachtungen für ein hypothetisches Endlager im tiefen geologischen Untergrund im kristallinen Gestein
<b>FZKA-PTE Nr. 3</b> 1994 bis 1996	FZK	GEISHA: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein
<b>02E8694</b> 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
<b>02E9087</b> 10/97 bis 06/99	DBE	Ein neuer Ansatz zur Bewertung der Wirksamkeit von Barrieren im Endlager
<b>02E9350</b> 05/00 bis 03/01	PanGeo	Vergleichende Bewertung von Entsorgungsoptionen für radioaktive Abfälle
<b>02E9511</b> 08/01 bis 12/04	DBE Technology GmbH	Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein (GEIST)
<b>02E9521</b> 08/01 bis 06/06	DBE Technology GmbH	Übertragung des Sicherheitsnachweiskonzeptes für ein Endlager im Salz auf andere Wirtsgesteine (ÜBERSICHT)
<b>02E9632</b> (A4, B7) 04/02 bis 02/06	Technische Universität Clausthal	Laborative und numerische Grundlagenuntersuchungen zur Übertragbarkeit von Stoffmodellansätzen und EDV-Software für Endlager im Salzgestein auf Endlager im Tonstein
<b>02E9733</b> 07/03 bis 12/06	DBE Technology GmbH	Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tongestein

## **A3 Weiterentwicklung von Einlagerungs-, Handhabungs- und Überwachungstechniken**

<b>KWA 2030/5</b> 07/79 bis 08/80	KfK	Vergleich der verschiedenen Entsorgungsalternativen und Beurteilung ihrer Realisierbarkeit
<b>KWA 3207/8</b> 10/82 bis 12/84	Förderges. EWI	Wirtschaftlichkeitsvergleich Anderer Entsorgungstechniken
<b>KWA 3301/0</b> 01/83 bis 12/84	GUW	Repräsentative Emissionsdatensätze und Strahlenbelastung für Versorgungseinrichtungen im nuklearen Brennstoffkreislauf
<b>KWA 3302/0</b> 03/83 bis 06/84	TN	Untersuchung zum Transport von Endlagergebinden im Rahmen der Anderen Entsorgungstechniken
<b>KWA 3310/7</b> 08/83 bis 06/84	TN	Sicherheitsanalyse des Transportes konditionierter Brennelemente auf der Schiene im Rahmen des Projektes Andere Entsorgungstechniken

<b>KWA 3602/2</b> 07/86 bis 12/90	DBE	Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente. Demonstrationsversuch Thermische Simulation der Streckenlagerung - Phase II: Planung und Errichtung des Versuchsortes
<b>KWA 3603/3</b> (B6) 07/86 bis 12/90	BGR	Geotechnische und großnumerische Untersuchungen zur Direkten Endlagerung von Brennelementen Geotechnische und großnumerische Untersuchungen zur Direkten Endlagerung von Brennelementen
<b>KWA 3604/4</b> 07/86 bis 12/89	DBE	Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente. Maschinentechnische Versuche - Phase II
<b>KWA 3701/9</b> 05/87 bis 03/90	DBE	Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente - Demonstrationsvergleich: Aktives Handhabungsexperiment mit Neutronenquellen
<b>KWA 5101/8</b> 01/81 bis 12/84	NUKEM	Andere Entsorgungstechniken für abgebrannten Brennstoff
<b>KWA 5122/5</b> 02/82 bis 12/82	GSF	Versuchseinlagerung hochradioaktiver Abfälle (HAW) im Salzbergwerk Asse
<b>KWA 5131/2</b> 09/81 bis 12/84	DBE	Anpassung u. Weiterentwicklung der Untersuchungen und Planungen z. Endlagerung von hochaktiven Abfällen durch die Direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente
<b>KWA 5131/A/2</b> 07/85 bis 05/86	DBE	Direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente - Phase I: Vorbereitende Arbeiten für die Demonstration und Konzeptplanung
<b>KWA 5131/B/5</b> 06/86 bis 12/89	DBE	Direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente. Planungsarbeiten für ein Endlager-Mischkonzept - Phase II: Systemanalyse Mischkonzept
<b>KWA 5212/4</b> 03/82 bis 11/82	Siemens	Arbeiten zur Charakterisierung abgebrannter Kernbrennstoffe
<b>KWA 5219/0</b> 05/82 bis 04/83	DORNIER	Sicherheitstechnische Unterschiede zwischen LWR- und SBR Brennstoffkreislauf
<b>KWA 5220/0</b> 04/82 bis 06/85	GSF	Versuchseinlagerung hochradioaktiver Abfälle in der Schachanlage Asse - 1. Projektphase
<b>KWA 5302/3</b> 01/83 bis 06/89	KFA	Weiterentwicklung d. Bohrlochtechnologie f. die Endlagerung radioaktiver Abfälle im Salz am Beispiel von Feedklärschlamm, Brennelementhülsen u. HTR-Brennelementen
<b>KWA 5302/B/6</b> 10/89 bis 12/92	KFA	MAW- und HTR-BE-Versuchseinlagerung in Bohrlöchern
<b>KWA 5702/2</b> 01/87 bis 12/89	GSF	Arbeiten zur Direkten Endlagerung von Brennelementen
<b>KWA 5903/8</b> 02/90 bis 12/92	GSF	Technisch-wissenschaftliche Betreuung u. geotechnisches Messprogramm für MAW- und HTR-Versuchseinlagerung
<b>KWA 8506/0</b> 01/85 bis 12/90	GSF	Versuchseinlagerung hochradioaktiver Abfallsimulate in der Schachanlage Asse - 2. Projektphase
<b>KWA 8507/1</b> 5/85 bis 12/88	GSF	Versuchseinlagerung hochradioaktiver Abfallsimulate in der Schachanlage Asse - 2. Projektphase: Wissenschaftlich-Technischer Teil
<b>KWA 8507/A/1</b> 01/89 bis 12/93	GSF	Versuchseinlagerung hochradioaktiver Abfallsimulate in der Schachanlage Asse - 3. Projektphase : Versuchsdurchführung

<b>02E8131/1</b> (B6) 01/91 bis 06/94	BGR	Geotechnische und großnumerische Untersuchungen zur Direkten Endlagerung von Brennelementen
<b>02E8191/0</b> 01/90 bis 03/95	DBE	Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente. Handhabungsversuche zur Streckenlagerung - Phase III
<b>02E8201/4</b> 01/90 bis 12/93	DBE	Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente - Systemanalyse Endlagerkonzepte
<b>02E8211/2</b> 01/90 bis 12/92	GSF	Arbeiten zur Direkten Endlagerung von Brennelementen
<b>02E8221/0</b> 01/90 bis 09/93	DBE	Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente. Simulation des Schachttransportes - Phase III
<b>02E8472/7</b> 01/91 bis 12/95	DBE	Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente. Demonstrationsversuch: Aktives Handhabungsexperiment mit Neutronenquellen
<b>02E8181A</b> 01/94 bis 12/99	GNB	Verkehrs- und atomrechtliches Zulassungsverfahren für den Transport- und Lagerbehälter CASTOR MTR 2
<b>02S7523</b> 10/93 bis 03/99	Noell	Entwicklung und Bau einer mobilen Umladestation zur Entsorgung von Brennelementen aus Forschungsreaktoren
<b>02E8946</b> 10/96 bis 01/00	DBE	Entwicklung und Erprobung redundanter faseroptischer Meßsysteme mit Selbstkontrolle zur Endlagerüberwachung
<b>02E9249</b> 02/00 bis 12/04	DBE	Entwicklung und In-situ-Erprobung faseroptischer Überwachungssysteme unter dem Aspekt der Betriebssicherheit in einem Endlager

#### **A4 Charakterisierung und Eigenschaften potentieller Wirtsgesteinsformationen**

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

<b>KWA 5209/A/2</b> 07/87 bis 11/89	Battelle	Einsatz der Schallemissionsanalyse zur Überwachung von Teilbereichen eines Salzstocks während und nach der Einlagerung radioaktiver Abfälle - Stufe III
<b>KWA 5303/4</b> 01/83 bis 12/87	BGR	Gebirgsspannungen - Felslabor Grimsel: Weiterentwicklung von Überbohrversuchen zur Bestimmung der Gebirgsspannungen und von Bohrlochverformungsversuchen
<b>KWA 5304/5</b> 01/83 bis 12/87	BGR	Bohrlochkranzversuch - Felslabor Grimsel: Felshydraulische Untersuchungen zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit und des Strömungsmechanismus von Kluftwasser
<b>KWA 5304/A/5</b> 01/88 bis 12/90	BGR	Bohrlochkranzversuch - Felslabor Grimsel: Deutsch-schweizerische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Endlagerung
<b>KWA 5305/6</b> 01/83 bis 04/86	BGR	Hochfrequenzmessungen zur Ermittlung der Homogenität von kristallinen Gesteinskomplexen
<b>KWA 5315/4</b> 04/83 bis 12/90	GSF	Untersuchungsprogramm zur Erkundung ausgewählter Eigenschaften von kristallinen Felsformationen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle
<b>KWA 5501/7</b> 01/85 bis 12/88	BGR	Weiterentwicklung von Hochfrequenz-EMR-Messverfahren zur untertägigen Vorauserkundung unerschlossener Salzlagerbereiche
<b>KWA 5505/0</b> 01/85 bis 12/87	DORNIER	Systemanalyse zu sicherheitstechnischen Aspekten von radioaktiven Abfällen im tiefsten Meeresboden
<b>KWA 5606/9</b> 07/86 bis 09/89	DBE	Weiterentwicklung von elektromagnetischen Reflexions-Messverfahren (EMR) zur untertägigen Vorauserkundung unerschlossener Salzlagerbereiche
<b>02E8110/4</b> 07/90 bis 12/92	Battelle	Schallemissionsmessungen zur Verfolgung der Bildung von Auflockerungszonen und von größeren Rissen in Salzgestein
<b>02E8141/0</b> 01/91 bis 06/94	BGR	Deutsch-schweizerische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Endlagerung. Durchströmungseigenschaften von geklüftetem Fels (Bohrlochkranzversuch - Fracture System Flow Test)
<b>02E8151/8</b> 01/91 bis 04/94	GSF	Untersuchung physikalischer Prozesse und Parameter zum Fluid- und Gastransport im Nahbereich von Endlagern in granitischen Formationen des Felslabors Grimsel - Phase 3
<b>02E8151/A</b> 05/94 bis 12/95	GRS Braunschweig	Untersuchung physikalischer Prozesse und Parameter zum Fluid- und Gastransport im Nahbereich von Endlagern in granitischen Formationen des Felslabors Grimsel - Phase 4
<b>02E8936</b> 01/96 bis 12/96	GRS Braunschweig	Voruntersuchungen zur Gebirgscharakterisierung und Auswahl eines Versuchsfeldes für ein 2-Phasenfluß-Experiment im Äspö-Hartgesteinslabor
<b>02E8141 A</b> 07/94 bis 09/98	BGR	Deutsch-Schweizerische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Endlagerung: Stofftransport in geklüftetem Fels /Gebirgscharakterisierung im Stollennahbereich
<b>02E9027</b> 01/97 bis 12/99	GRS Braunschweig	Zweiphasenfluss-Experiment im geklüfteten Kristallin im Hartgesteinslabor (HRL) ÄSPÖ

<b>KWA 9503</b> 06/95 bis 12/98	FZK	Deutsch-schwedische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Granit - Beteiligung an den Untersuchungen im schwedischen Untertagelabor ÄSPÖ
<b>02E8785</b> 01/96 bis 03/99	GRS Braunschweig	Untersuchung physikalischer Prozesse und Parameter zum Fluid- und Gastransport im Nahbereich von Endlagern in granitischen Formationen des Felslabors Grimsel (Phase 4)
<b>02E9037</b> 01/97 bis 06/00	BGR	Zweiphasenfluss-Experimente im geklüfteten wasserführenden Kristallin
<b>02E9208</b> 10/98 bis 09/01	GRS Braunschweig	Felslabor Grimsel (Phase V): Effektive Parameter (EFP) - Begleitende geoelektrische Untersuchungen -
<b>02E9098</b> 07/98 bis 12/01	BGR	Entwicklung und Erprobung von zerstörungsfreien seismischen In-situ-Methoden zur Beurteilung der geomechanischen und hydraulischen Gebirgseigenschaften in der Umgebung untertägiger Hohlräume in Endlagerformationen
<b>02E9118</b> 07/98 bis 04/03	GRS Braunschweig	Untersuchungen zur hydraulisch wirksamen Auflockerungszone um Endlagerbereiche im Salinar in Abhängigkeit vom Hohlraumabstand und Spannungszustand
<b>02E9188</b> 10/98 bis 12/01	GRS Braunschweig	Untersuchungen zur Gas- und Wasserfreisetzung und der Wasserverteilung im Erhitzerversuch im OPALINUS-Ton des Mont Terri-Tunnels
<b>02E9198</b> 10/98 bis 06/05	GRS	Untersuchungen zur Gasausbreitung in den technischen Barrieren Beton und Bentonit sowie im Granit im Felslabor Grimsel Phase V
<b>02E9218</b> (B6) 10/98 bis 12/01	BGR	Deutsch-Schweizerische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Endlagerung (Felslabor Grimsel Phase V): Teilprojekt I: Effektive Parameter (EFP); Teilprojekt II: Numerical Calculation of Two-Phase Flow
<b>KWA 9901</b> 01/99 bis 12/02	FZK	Unterstützungsprogramm Granit
<b>02E9380</b> 06/00 bis 05/03	IIF-Leipzig	Migrations- und Sorptionsuntersuchungen geogener Lösungen in Wirtsgesteinsformationen (Ton, Tongestein, Salzgestein) mittels tomographischer Radiotracerverfahren (PET)
<b>02E9420</b> 09/00 bis 12/02	GRS Braunschweig	Laboruntersuchungen der gekoppelten hydraulisch-mechanischen Eigenschaften von Kernproben des Callovo-Oxfordian Tonsteins am Standort Meuse/Haute Marne im Projekt MODEX-REP
<b>02E9541</b> 07/01 bis 12/03	GRS Braunschweig	Vorprojekt zur Beteiligung am Forschungsprogramm der ANDRA im URL Bure
<b>02E9571</b> 08/01 bis 12/04	DBE Technology GmbH	Koordination geowissenschaftlicher Tätigkeiten in alternativen Wirtsgesteinen
<b>02E9602</b> 01/02 bis 03/05	GRS	Untersuchungen zur Gaserzeugung und -freisetzung sowie dem Wassergehalt und der Wasserumverteilung im Erhitzerversuch im OPALINUS-Ton des Mont Terri-Tunnels

<b>02E9612</b> 02/02 bis 03/05	DBE Technology GmbH	Anforderungen an die Standorterkundung für HAW-Endlager im Hartgestein
<b>02E9622</b> 02/02 bis 03/05	GRS	Anforderungen an die Standort-Erkundung für HAW-Endlager im Hartgestein (Kurztitel: ASTER), AP3 (GRS): Vorbereitung eines sicherheitsanalytischen Endlager- und Standortmodells
<b>02E9773</b> 08/03 bis 12/06	GRS Braunschweig	Untersuchung und Modellierung des gekoppelten THM-Verhaltens des Opalinuston im Rahmen des Aufheizversuches TER-MOCK UP im Mont Terri-Untertagelabor
<b>02E9834</b> 01/04 bis 12/07	GRS Braunschweig	Laborprogramm zur Untersuchung der Entwicklung und Verteilung von Auflockerungszonen in Tonsteinformationen
<b>02E9914</b> 04/04 bis 12/07	GRS Braunschweig	Goelektrische Untersuchung der Entsättigung des Opalinuston im Ventilationsversuch im Mont Terri-Untertagelabor Phase 2; Kurzzeitentwicklung der EDZ

#### **A5 Geotechnische Barrieren**

<b>KWA 5509/4</b> 10/85 bis 05/86	DBE	Dammbau im Salzgebirge - Pilotdamm Phase I: Vorbereitende Arbeiten und Konzeptplanung
<b>KWA 5603/A/6</b> 07/86 bis 12/92	GSF	Dammbau im Salzgebirge - Untersuchungen und Erprobung eines Systems von Baukomponenten zur Entwicklung und Optimierung eines Dammbauwerkes
<b>KWA 5604/7</b> 07/86 bis 12/92	DBE	Dammbau im Salzgebirge - Untersuchungen und Erprobung eines Systems von Baukomponenten zur Optimierung eines Dammbauwerkes
<b>KWA 5605/A/8</b> 07/86 bis 12/92	BGR	Dammbau im Salzgebirge - Untersuchungen und Erprobung eines Systems von Baukomponenten zur Optimierung eines Dammbauwerkes
<b>02E9390</b> 07/00 bis 12/07	GRS Braunschweig	Untersuchungen zur Gasentwicklung und -freisetzung aus dem Tonversatz sowie dessen Gas- und Wasserpermeabilität im Projekt "Full Scale Engineered Barriers Experiment in Crystalline Host Rock-Phase II" FEBEX II

## **B VERBESSERUNG VON INSTRUMENTARIEN FÜR DIE SICHERHEITSBEWERTUNG VON ENDLAGERN**

### **B1 Szenarientwicklung**

**02E8563** Stoller Untersuchungen zur Szenarienmodellierung im Nahfeld eines wärmebeeinflussten Endlagerbereichs im Salzgestein  
01/93 bis 01/95

### **B2 Verhalten der Wirtsgesteinsformation**

**KWA 5103/0** 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  
01/81 bis 12/84

**KWA 5104/0** BGR Stoffgesetze und Daten für Salz  
01/81 bis 12/84

**KWA 5105/1** BGR Untersuchung der thermomechanischen Eigenschaften radioaktiv bestrahlter Salzproben  
07/81 bis 04/85

**KWA 5118/2** Uni Hannover Stoffgleichungen für Salze unter mechanischer, thermischer und radioaktiver Belastung sowie numerische Behandlung von Anfangs- und Randwertproblemen  
01/81 bis 12/82

**KWA 5202/6** BGR Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Langzeitdeformationsverhalten von Steinsalz auf der Grundlage der wirksamen Deformationsmechanismen  
01/82 bis 04/86

**KWA 5204/8** BGR In-situ-Experimente zum Nachweis kritischer Spannungszustände (thermisch induzierte Rissbildung) - Teilprojekt Geophysik  
01/82 bis 12/84

**KWA 5205/9** BGR Thermomechanische In-situ-Versuche zum Nachweis kritischer Spannungszustände (Rissbildung) - Teilprojekt Gebirgsmechanik  
07/82 bis 06/85

**KWA 5301/2** Uni Hannover Stoffgleichungen für Salze unter mechanischer, thermischer und radioaktiver Belastungen sowie numerische Behandlung von Anfangs- und Randwertproblemen  
01/83 bis 12/83

**KWA 5502/8** BGR Geotechnisches Verhalten verschiedener Salzgesteine  
01/85 bis 12/87

**KWA 5503/9** BGR In-situ-Heizversuche zum Nachweis kritischer Spannungszustände (thermisch induzierte Rissbildung)  
01/85 bis 06/88

**KWA 5802/0** BGR Wissenschaftliche Grundlagen der Erkundung und Berechenbarkeit des Endlagerbergwerks  
03/88 bis 12/90

**02E8161/6** IfG Leipzig Überprüfung vorhandener Modellvorstellungen zum Konvergenzverhalten und zur Standsicherheit komplexer Grubengebäude im Salzgestein. Ermittlung notwendiger Ergänzender Daten - Phase I  
01/91 bis 12/91

<b>02E8241/A</b> 01/92 bis 03/95	IfG Leipzig	Gebirgsmechanisches Verhalten von Anhydrit und Salzton
<b>02E8311/0</b> 07/91 bis 06/93	IfAG	Flächenhafte Erfassung der vertikalen Deckgebirgsbewegungen in untertägigen Hohlräumen im Salzgebirge
<b>02E8391</b> 01/91 bis 12/96	BGR	Entwicklung von Methoden zur Erkundung dynamischen Gebirgseigenschaften in der Umgebung von untertägigen Hohlräumen
<b>02E8421</b> 01/91 bis 02/95	BGR	Untersuchungen thermophysikalischer und elektrischer Eigenschaften von Salzgesteinen
<b>02E8452</b> 04/92 bis 06/95	GSF	Geotechnische Untersuchung im Salinar zur Ermittlung des gebirgsmechanischen Verhaltens von Anhydrit und Salzton (Nachbetriebsphase)
<b>02E8542/0</b> 01/93 bis 12/94	BGR	Thermomechanisches Verhalten von Salzgesteinen
<b>02E8755</b> 09/95 bis 08/98	IfG Leipzig	Untersuchung der Barrierewirksamkeit des Gesteinsverbandes Steinsalz/Anhydrit/Salzton (BARITON)
<b>02E8765</b> 09/95 bis 08/98	GRS Braunschweig	Untersuchung der Barrierewirksamkeit des Gesteinsverbandes Steinsalz/Anhydrit/Salzton (BARITON)
<b>02E9006</b> 01/97 bis 04/00	GRS	Gasfreisetzung und Migration im Boom-Clay von Mol im Projekt „Corrosion on Active Glass in Underground Conditions“ (CORALUS) at SCK-CEN in Mol
<b>02E9158</b> 09/98 bis 12/01	IfG-Leipzig	Untersuchung des Barriereverhaltens von Anhydrit bei großräumigen Spannungsumlagerungen (BARIAN)
<b>02E9168</b> 09/98 bis 12/01	GRS Braunschweig	Untersuchung des Barriereverhaltens von Anhydrit bei großräumigen Spannungsumlagerungen (BARIAN)
<b>02E9400</b> 07/00 bis 03/04	GRS Braunschweig	Untersuchungen zur Gasentwicklung- und Freisetzung im Boom-Clay im Projekt: „Integrated in Situ Corrosion Test on Alpha-Active High Level Waste Glass-Phase 2“
<b>02E9501</b> 07/01 bis 03/04	GRS Braunschweig	Geoelektrische Untersuchung der Entsättigung des Opalinuston im Ventilationsversuch im Mont Terri-Untertagelabor
<b>02E9531</b> 10/01 bis 07/06	DBE Technology GmbH	Untersuchung Thermischer Expansions-Effekte (TEE) in Tonformationen
<b>02E9582</b> 03/02 bis 06/04	IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH	Verbundprojekt: Untersuchung des Barriereverhaltens von Anhydrit bei großräumigen Spannungsumlagerungen (Phase 2)
<b>02E9592</b> 03/02 bis 09/04	GRS	Verbundprojekt: Untersuchung des Barriereverhaltens von Anhydrit bei großräumigen Spannungsumlagerungen (BARIAN) Phase 2
<b>02E9864</b> 01/04 bis 06/05	BUTEC Umwelt- technik GmbH	Selbstheilungseffekte in Tongestein bei hohen Temperaturen - Teilvorhaben WP 4.4 des Integrated Project NF-PRO des 6. Rahmenprogramms der Europäischen Kommission

**02E9874** IfG Institut für Untersuchung der komplexen mechanischen und hydraulischen Eigenschaften von Tongesteinen unter besonderer Berücksichtigung der Foliation  
01/04 bis 12/07  
Gebirgsmechanik GmbH

### **B3 Chemische und physikalische Effekte im Nahfeld**

<b>KWA 5116/0</b> 01/81 bis 12/83	GSF	Laugenmigrationstest in der Schachanlage Asse
<b>KWA 5124/7</b> 07/81 bis 08/83	Siemens	Auslaugversuche an unbestrahlten und bestrahlten Kernbrennstoffen in Salzlaugen
<b>KWA 5124/A/7</b> 09/83 bis 06/86	Siemens	Langzeitauslaugung bestrahlter Kernbrennstoffe in Salzlaugen und Einfluss von Eisen auf die Elementmobilisierung
<b>KWA 5312/1</b> 02/83 bis 01/85	TU München	Bestimmung der Löslichkeiten und des chemischen Verhaltens der Np-, Pu- und Am-Komplexe in Salzlösungen
<b>KWA 5313/2</b> 02/83 bis 01/85	FU Berlin	Untersuchung der Mobilität von Plutonium und Americium aus MAW-Produkten bei Endlagerung im Salz
<b>KWA 5314/3</b> 09/83 bis 12/86	TH Darmstadt	Löslichkeit von Technetium in konzentrierten Salzlösungen
<b>KWA 5401/0</b> 01/84 bis 12/86	GSF	HAW-Simulationsversuch mit Co-60-Quellen in der Schachanlage Asse
<b>KWA 5905/0</b> 10/90 bis 03/92	DBI	Rückgewinnung von Bohrlocheinbauten und Steinsalzproben nach In-situ-Versuchen zur Sicherheitsanalyse bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Steinsalzformationen
<b>KWA 5906/0</b> 10/90 bis 05/92	Institut für Energetik und Umwelt (IfE)	Korrosions- und Auslaugverhalten metallischer Werkstoffe mit und ohne Beschichtung in einem Endlager - Vorphase
<b>02U5715/0</b> 02/85 bis 03/88	FU Berlin	Untersuchung der Mobilisierung ausgewählter Radionuklide und deren Sorptionsverhalten an natürlichen und technischen Barrieren unter MAW-Endlagerbedingungen
<b>02U5725/9</b> 02/85 bis 12/87	TU München	Geochemisches Verhalten von Aktinoiden und Tc im geologischen Milieu des Endlagerortes
<b>02U5998/3</b> 10/88 bis 09/91	FU Berlin	Elektrochemische Korrosionsuntersuchungen an bestrahlten und unbestrahlten Urandioxidpellets in konzentrierten Salzlösungen
<b>02E8020/5</b> 07/90 bis 12/93	TU Clausthal	Elektrochemische Untersuchungen der Korrosion von Werkstoffen in heißen Salzlaugen
<b>02E8030/3</b> 08/90 bis 02/93	FU Berlin	Untersuchung der Verstärkung der Rückhaltung des Nahbereiches eines Endlagers in einem Salzdom gegenüber mehrwertigen Kationen durch Hydroxylapatit
<b>02E8030 A</b> 07/94 bis 12/98	FU Berlin	Bestimmung von Löslichkeitsprodukten endlagerrelevanter Elemente in gesättigten Salzlösungen in Gegenwart von Hydroxylapatit

<b>02E8100/6</b> 09/90 bis 10/91	Battelle	Untersuchungen zum Gefährdungspotential von Wasserstoff in einem Endlager für radioaktive Abfälle in Steinsalz während der Betriebsphase
<b>02E8251</b> 09/91 bis 08/95	Uni Düsseldorf	Lokale Korrosion metallischer Werkstoffe u. Gamma-Strahlenwirkung in Passiv-Schichten unter Endlagerbedingung.
<b>02E8261</b> 10/91 bis 04/95	FU Berlin	Radiochemische Korrosionsuntersuchungen an Titan und Titanlegierungen als Containerwerkstoffe in praxisrelevanten Salzlaugen
<b>02E8271/1</b> 10/91 bis 03/95	FU Berlin	Elektrochemische Korrosionsuntersuchungen an unbestrahltem Urandioxid und simuliertem "spent fuel" in endlagerungsrelevanten Laugensystemen
<b>02E8351/2</b> 05/91 bis 09/92	GRS Köln	Gasbildung und Gastransport in einem salinaren Endlager bei unterstelltem Laugeneinbruch
<b>02E8361/0</b> 10/91 bis 06/92	TU BAF	Vergleich von geochemischen Rechenprogrammen und Erweiterung der thermodynamischen Datenbasis für die Modellierung von hochsalinaren Lösungen
<b>02E8603/5</b> 07/93 bis 01/94	Stoller	Literaturrecherche zu Strahleneffekten im Steinsalz - Auswertung der russischen Literatur
<b>02E8613</b> 11/93 bis 10/96	TU BAF	Vergleich von geochemischen Rechenprogrammen und Erweiterung der thermodynamischen Datenbasis für die Modellierung von hochsalinaren Lösungen (Phase II)
<b>02E8633/0</b> 10/93 bis 04/94	Stoller	Thermische und radiologische Geschichte des Wirtsgesteins in den Versuchen A1 u. A2 im Untertagemessfeld des ERAM
<b>02E8825</b> 10/95 bis 06/96	GRS Braunschweig	Realistische Abschätzung der Strahlenschädigung von Steinsalz bei Einlagerung von HAW in Bohrlöchern
<b>02E8654</b> 04/94 bis 03/98	FZJ	Untersuchungen zur Radionuklidfreisetzung durch Einwirkung konzentrierter Salzlaugen auf Alu-MTR-Brennelemente
<b>02E8725</b> 04/95 bis 08/97	FU Berlin	Elektrochemische und radiochemische Korrosionsuntersuchungen an Urandioxyd in endlagerrelevanten Elektrolysystemen
<b>02E9108</b> 06/98 bis 11/01	FZ-Jülich	Untersuchungen zur Radionuklidfreisetzung und zum Korrosionsverhalten von bestrahltem Kernbrennstoff aus Forschungsreaktoren unter Endlagerbedingungen
<b>02E9138</b> 10/98 bis 09/02	GRS Braunschweig	Entwicklung eines Modells zur Beschreibung des geochemischen Milieus in hochsalinaren Lösungen
<b>02E9319</b> 01/00 bis 12/01	TU BAF	Erweiterung der Datenbasis zur thermodynamischen Modellierung der Reaktionen CaSO <sub>4</sub> -haltiger Minerale und des Glycerits bei Temperaturen bis 200 °C
<b>02E9440</b> 10/00 bis 09/02	GRS Braunschweig	Entwicklung einer Methode zur verbesserten Rückhaltung von Jod und Selen im Nahbereich eines Endlagers
<b>02E9450</b> 11/00 bis 10/03	TU-München	Quantenmechanische Modellierung der aquatischen und Sorptions-Chemie von Aktinoiden

<b>02E9461</b> 01/01 bis 09/03	GRS Braunschweig	Untersuchung der chemischen und hydromechanischen Wechselwirkungen von Ton/Zement-Systemen
<b>02E9481</b> 04/01 bis 03/04	Universität Hannover	Einsatz von Organo-Tonen als Adsorber für problematische Anionen in geotechnischen Barrieren
<b>02E9491</b> 04/01 bis 03/04	Forschungszentrum Rossendorf	Wechselwirkung von Actiniden mit dominanten Bakterien des Äspö-Grundwasserleiters
<b>02E9803</b> 11/03 bis 10/06	Forschungszentrum Jülich GmbH	Untersuchungen zum Verhalten von Forschungsreaktor-Brennelementen (FR-BE) in den Wirtsgesteinsformationsgewässern möglicher Endlager
<b>02E9824</b> 01/04 bis 06/07	GRS Braunschweig	Advectiver und diffusiver Gastransport im Salzgestein im Forschungsbergwerk Asse (Kurztitel: Addigas)
<b>02E9884</b> 01/04 bis 12/07	GRS Braunschweig	Langzeitwechselwirkungen von Tonen und Zementen in Ton- und Salzformationen
<b>02E10005</b> 07/05 bis 06/06	Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec)	Auswertung von Modellierungsansätzen zum Gastransport in Tongesteinen (GASTON)

#### **B4 Verhalten von geotechnischen Barrieren**

<b>KWA 5404/2</b> 06/84 bis 12/86	Siemens	Konzept für die Ermittlung der Rückhaltefähigkeit von Versatzmaterialien und Abschlussbauwerken gegenüber gasförmigen Radionukliden
<b>02U5836/5</b> 01/87 bis 10/89	Siemens	Laborversuche zur Ermittlung des Rückhaltevermögens von Salz (Schüttungen unterschiedlicher Korngröße und Salz Mischung) gegenüber ausgewählten Radionukliden und einigen ihrer gasförmigen chemischen Verbindungen
<b>02E8040/1</b> 07/90 bis 06/91	Uni Karlsruhe	Grundlagenuntersuchungen zu Salzhaufwerk mit Korndurchmessern bis 65 mm in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte und des Spannungsniveaus
<b>02E8211/A</b> 01/93 bis 12/95	GSF	Arbeiten zur Direkten Endlagerung von Brennelementen (Thermische Simulation der Streckenlagerung / TSS)
<b>02E8131/A</b> 07/94 bis 01/96	BGR	Geotechnische Untersuchungen im Rahmen des Demonstrationsversuchs Thermische Simulation der Streckenlagerung (TSS)
<b>02E8291/8</b> 07/91 bis 12/93	TU BAF	Untersuchungen zu Bohrlochverschlüssen und Verschlussmaterialien mit Dokumentation bisheriger Sorptionsergebnisse
<b>02E8462</b> 04/92 bis 12/95	TU BAF	Diffusions- und Permeabilitätsverhalten von Wasserstoff in Steinsalz und kompaktiertem Salzgrus
<b>02E8492</b> 04/92 bis 12/95	Battelle	Bestimmung des Diffusions- und Permeabilitätsverhaltens von Wasserstoff in Steinsalz und kompaktiertem Salzgrus

<b>02E8552/8</b> 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
<b>02E8715</b> 10/95 bis 06/99	GRS Braunschweig	Untersuchung der Langzeit-Dichtwirkung von Bohrlochverschlüssen aus Salzgrus (DEBORA-Projekt Phase 2)
<b>02E8805</b> 01/96 bis 03/00	GRS Braunschweig	Experimentelle Untersuchungen zum Verhalten von Versatz in Endlagerstrecken im Salinar
<b>02E8876</b> 02/96 bis 04/99	TU BAF	Durchlässigkeitsverhalten von Steinsalzversatz bei gekoppeltem Einfluss von Fluidodynamik, Gebirgsmechanik und Lösungsvorgängen
<b>02E8886</b> 02/96 bis 04/99	BIG	Durchlässigkeitsverhalten von Steinsalzversatz gegenüber Laugen unter Berücksichtigung von zeitlich veränderlichen Überlagerungsdrücken und Lösungsvorgängen
<b>02E8956</b> 07/96 bis 08/99	GRS Braunschweig	Experimentelle und theoretische Untersuchung physikalisch-chemischer Vorgänge beim Laugenzutritt in Einlagerungsstrecken - theoretischer Teil -
<b>02E8966</b> 07/96 bis 08/99	Stoller	Experimentelle und theoretische Untersuchung physikalisch-chemischer Vorgänge beim Laugenzutritt in Einlagerungsstrecken - experimenteller Teil -
<b>02E8986</b> 07/96 bis 12/00	GRS Braunschweig	Untersuchungen zur geochemischen Stabilität von Tonen in Endlagern und Untertagedeponien im Salzgestein
<b>02E9006</b> 01/97 bis 04/00	GRS Braunschweig	Gasfreisetzung und Migration im Boom-Clay von Mol im Projekt CORALUS
<b>02E9017</b> 01/97 bis 12/99	GRS Braunschweig	Untersuchungen zum Zweiphasenfluss und diffusiven Transport in Tonbarrieren und Tongesteinen
<b>02E9047</b> 05/97 bis 04/00	GRS Braunschweig	Wirksamkeit der Abdichtung von Versatzmaterialien - Geochemische Untersuchungen
<b>02E9057</b> 01/98 bis 07/01	K-UTEC	Wirksamkeit der Abdichtung von Versatzmaterialien – Techniks- und In-situ-Versuche am Dreistoffsystem polymineralisches Salzgestein-Versatzstoff-Fluid
<b>02E9228</b> 01/99 bis 03/00	BGR	Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Verhalten von Versatz in Endlagerstrecken im Salinar
<b>02E9259</b> 04/00 bis 04/03	IfG-Leipzig	Untersuchungen des Spannungszustandes und des gebirgsmechanischen Verhaltens von Versatz und Wirtsgestein in Abhängigkeit von der Temperatur
<b>02E9269</b> 04/00 bis 04/03	GRS Braunschweig	Abschließende Auswertung des Projektes „Thermische Simulation der Streckenlagerung / Experimentelle Untersuchungen zum Verhalten von Versatz in Endlagerstrecken im Salinar“
<b>02E9279</b> 01/00 bis 02/04	GRS Braunschweig	Geoelektrische Untersuchungen der Aufsättigung von Bentonitbarrieren im HRL-Äspö-Projekt „Prototype Repository“
<b>02E9289</b> 04/00 bis 04/03	DBE	Versuchsaufwältigung und Rückgewinnung von Materialproben und Messeinrichtungen

<b>02E9330</b> 05/00 bis 04/03	TU-BAF	Untersuchungen der Durchlässigkeit von kompaktiertem Salzgrus und Salzgestein gegenüber Laugen bei HAW- und DE-typischen Temperaturen
<b>02E9340</b> 05/00 bis 04/03	Battelle	Untersuchungen der Durchlässigkeit von kompaktiertem Salzgrus und Salzgestein gegenüber Laugen bei HAW- und DE-typischen Temperaturen
<b>02E9390</b> 07/00 bis 02/04	GRS Braunschweig	Untersuchungen zur Gasentwicklung und -freisetzung aus dem Tonversatz sowie dessen Gas- und Wasserpermeabilität im Projekt "Full Scale Engineered Barriers Experiment in Crystalline Host Rock-Phase II" FEBEX II
<b>02E9430</b> 10/00 bis 09/03	GRS Braunschweig	Modellierung des Aufsättigungsverhaltens von Bentonit im Endlager im Kristallin Mitarbeit in der Task Force "EBS" des HRL Äspö
<b>02E9561</b> 10/01 bis 09/04	GRS Braunschweig	Modellentwicklung zur Quellung hochkompakter Bentonite im Kontakt zu Lösungen unterschiedlicher Salinität im Temperaturbereich 25 - 120°C
<b>02E9713</b> 01/03 bis 12/04	GRS	Selbstdichtende Barrieren aus Ton/Mineral-Gemischen in einem Tonendlager - SB-Experiment - im Mt. Terri Untertage-labor
<b>02E9904</b> 01/04 bis 12/07	IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH	Untersuchung des mechanischen Verhaltens von kompaktiertem Salzgrus im Kontakt mit dem Wirtsgestein

### **B5 Verhalten von geologischen Barrieren**

<b>KWA 3111/3</b> 07/81 bis 06/84	GSF	Sicherheitsstudie Entsorgung PSE II - Die Sorption von Radionukliden in oberflächennahen Böden der Bundesrepublik Deutschland
<b>KWA 5701/1</b> 01/87 bis 06/89	BAM	Untersuchung des Sorptionsmechanismus des Urans, Nikkels und Thoriums an Gesteinsoberflächen
<b>KWA 5801/9</b> 03/88 bis 12/90	BGR	Langzeitsicherheit der Barriere Salzstock
<b>02U5695/A/9</b> 07/87 bis 11/89	FU Berlin	Das Ausbreitungsverhalten von Technetium (Selen) in geochemisch unterschiedlichen Grundwasserleitern
<b>02U5695/9</b> 09/85 bis 06/87	FU Berlin	Bereitstellung gesicherter Sorptionsdaten für Technetium
<b>02U5705/2</b> 10/85 bis 12/88	TU Berlin	Untersuchung von Rückhalteeffekten im Barriersystem Deckgebirge
<b>02U5745/5</b> 07/84 bis 09/87	TU Berlin	Erweiterung und Anwendung vorhandener Modellansätze zur Berechnung der Nuklidmigration in Unterschiedlichen Deckgebirgsformationen

<b>02U5826/7</b> 08/86 bis 07/89	TH Darmstadt	Untersuchungen zur Kolloidbildung in natürlichen Systemen und Einfluss der Kolloidbildung auf das Migrationsverhalten von Spurenelementen
<b>02U5958/0</b> 10/88 bis 03/92	TU München	Untersuchung der Übertragbarkeit von Labordaten (Löslichkeiten und Sorptionskoeffizienten) auf natürliche Verhältnisse am Beispiel von Gorleben-Aquifer-Systemen
<b>02U5917/7</b> 08/87 bis 12/88	TH Darmstadt	Literatursauswertung über Untersuchungen zum möglichen Einfluss von Mikroorganismen auf die Ausbreitung von Radionukliden aus Endlagern
<b>02E8050/0</b> 07/90 bis 06/93	FU Berlin	Sorptionsexperimente zur Beeinflussung der Radionuklidmigration durch mikrobielle Aktivitäten am Beispiel des Technetiums, Selens und Jods
<b>02E8060/8</b> 07/90 bis 06/93	TU Berlin	Untersuchungen zur Methodik von Sterilisationsverfahren sowie der mikrobiologischen Überwachung von Sorptionsexperimenten
<b>02E8060/A</b> 10/93 bis 04/96	TU Berlin	Einfluss der autochthonen Mikroflora auf die Sorption und Remobilisierung des Technetiums und Selens
<b>02E8331/6</b> 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
<b>02E8341/4</b> 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
<b>02E8573</b> 06/93 bis 02/95	Institut für Energetik und Umwelt (IfE)	Bestandsaufnahme und Bewertung des Datenmaterials von geochemischen Experimenten sowie Zusammenstellung in Form einer Datenbank zur Verwendung in der geochemischen Modellierung
<b>02E8583</b> 06/93 bis 01/97	TU München	Untersuchung der Übertragbarkeit von Labordaten (Löslichkeiten und Sorptionskoeffizienten) auf natürliche Verhältnisse am Beispiel von Gorleben Aquifersystemen
<b>02E8674</b> 10/94 bis 12/95	GRS Köln	Teilnahme am EVEGAS Benchmark Projekt
<b>02E8906</b> 05/96 bis 04/97	FU Berlin	Einfluss der autochthonen Mikroflora auf die Sorption und die Remobilisierung des Technetiums und Selens an verschiedenen Sedimenten
<b>02E8664</b> 10/95 bis 09/98	GSF	Geochemische Modellierung der Rückhaltung von Radionukliden der Elemente Sr, Cs, U, Am, Se und Ni in wassergesättigten Aquiferen
<b>02E8795</b> 11/95 bis 01/99	Uni Mainz	Einfluss von Huminstoffen auf das Migrationsverhalten radioaktiver und nichtradioaktiver Schadstoffe unter naturnahen Bedingungen

<b>02E8815</b> 11/95 bis 02/99	Forschungszentrum Rossendorf	Einfluss von Huminstoffen auf das Migrationsverhalten radioaktiver und nicht radioaktiver Stoffe unter naturnahen Bedingungen - Synthese, radiometrische Bestimmung funktioneller Gruppen, Komplexierung -
<b>02E9299</b> 01/00 bis 11/02	Forschungszentrum Rossendorf	Untersuchungen über die Komplexierung und die Migration von Aktiniden und nichtradioaktiven Stoffen mit Huminsäuren unter geogenen Bedingungen – Komplexierung von Huminsäuren mit Aktiniden in der Oxidationsstufe IV Th, U, Np
<b>02E9309</b> 01/00 bis 12/02	Universität Mainz	Untersuchungen über das Komplexierungsverhalten von Huminsäuren und deren Einfluss auf die Migration von radioaktiven und nichtradioaktiven Stoffen
<b>02E9329</b> 01/00 bis 02/03	IIF-Leipzig	Komplexierung und Migration von Al, Ga, In, Sc, Y, La und Schwermetallen mit Huminsäuren
<b>02E9360</b> 06/00 bis 05/03	Technische Universität München	Einfluss von Kolloiden auf die Migration von Actiniden
<b>02E9471</b> 04/01 bis 03/04	Forschungszentrum Rossendorf	Entwicklung einer mineralspezifischen Sorptions-Datenbank für Oberflächenkomplexierungsmodelle
<b>02E9653</b> 07/03 bis 12/06	Universität Mainz	Verbundprojekt: Migration von Actiniden im System Ton, Huminstoff, Aquifer - Wechselwirkung von Neptunium und Plutonium mit Huminstoffen und Kaolinit
<b>02E9663</b> 07/03 bis 08/06	Institut für Interdisziplinäre Isotopenforschung	Verbundprojekt: Migration von Actiniden im System Ton, Huminstoff, Aquifer - Entwicklung und Einsatz von Radiotracern für Untersuchungen zur Bildung und Verteilung von kolloidalen Spezies mobilisierter Schwermetalle in Geosystemen
<b>02E9673</b> 07/03 bis 06/06	Forschungszentrum Dresden-Rossendorf e.V. (FZR)	Verbundprojekt: Migration von Actiniden im System Ton, Huminstoff, Aquifer - Migrationsverhalten von Actiniden (Uran, Neptunium) in Tonen: Charakterisierung und Quantifizierung des Einflusses von Huminstoffen
<b>02E9683</b> 07/03 bis 12/06	Universität des Saarlandes	Verbundprojekt: Migration von Actiniden im System Ton, Huminstoff, Aquifer- Kinetische Untersuchungen im System Huminsäure - Metall - Kaolinit
<b>02E9693</b> 07/03 bis 06/06	Technische Universität München	Verbundprojekt: Migration von Actiniden im System Ton, Huminstoff, Aquifer - Quantenmechanische Modellierung der Komplexierung von Actiniden durch Huminstoffe
<b>02E9703</b> 07/03 bis 12/06	Universität Heidelberg	Verbundprojekt: Migration von Actiniden im System Ton, Huminstoff, Aquifer - Thermodynamische Daten für Cm-Humat und dessen kinetische Zustände/Modi und Charakterisierung der Huminstoffsorption an Ton-Modelloberflächen
<b>02E9753</b> 08/03 bis 09/06	Institut für Interdisziplinäre Isotopenforschung	Untersuchung lokaler Schadstofftransport- und Sorptionsprozesse in Granit mit tomographischen Radiotracerverfahren
<b>02E9763</b> 11/03 bis 10/06	Technische Universität München	Einfluss von Kolloiden auf die Migration von Actiniden

<b>02E9924</b> 04/04 bis 10/07	Universität Potsdam	Verbundprojekt: Spektroskopische Bestimmung von thermodynamischen und kinetischen Kenngrößen zur Beschreibung der Huminstoff-Metall-Komplexierung (Teilantrag im Verbund "Migration von Actiniden im System Ton, Huminstoff, Aquifer")
<b>02E10266</b> 09/06 bis 07/07	ISTec	Numerische Modellierung der Dilatanz induzierten, perkolativen Permeation in Salzgestein

### **B6 Methodenentwicklung und Rechenprogramme für Sicherheitsbewertungen**

<b>KWA 2070/8</b> 04/80 bis 03/82	BGR	Entwicklung eines optimalen Finite Element Programms zur Berechnung thermomechanischer Vorgänge bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle
<b>KWA 2090/4</b> 07/80 bis 10/81	Control Data	Berechnung thermomechanischer Vorgänge im Salzgestein
<b>KWA 5317/6</b> 10/83 bis 12/84	BGR	ANSALT-Produktionssicherungssystem
<b>KWA 5408/6</b> 07/84 bis 03/90	GSF	Arbeiten zur Sicherheitsanalyse eines geologischen Endlagers. Untersuchung strömungsmechanischer und geochemischer Vorgänge sowie Weiterführung der Modellentwicklung
<b>KWA 5409/7</b> 07/84 bis 12/88	GSF	Aspekte der potentiellen Strahlenexposition der Bevölkerung aus Endlagern
<b>KWA 5911/4</b> 10/90 bis 12/91	Institut für Energetik und Umwelt (IfE)	Modelle zur numerischen Simulation der Radionuklid Ausbreitung bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle - 1. Arbeitsphase
<b>02U5937/3</b> 10/87 bis 09/90	Uni Hannover	Methodenentwicklung für Kluftwassersysteme
<b>02E8019/5</b> 02/90 bis 12/92	GSF	Potentielle Strahlenexposition der Bevölkerung und ihre Variabilität nach Austritt von Radionukliden aus Endlagern in nutzbare Grundwässer
<b>02E8320/7</b> 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
<b>02E8401/9</b> 02/91 bis 04/95	GRS Köln	Entwicklung und Umsetzung von Qualifizierungsstrategien für Rechencodes zum Nachweis der Langzeitsicherheit in der Endlagerung
<b>02E8522</b> 09/91 bis 12/95	GSF	Entwicklung eines eindimensionalen Nuklid ausbreitungsprogramms des Freisetzungsprogramms REPOS
<b>02E8532</b> 07/92 bis 12/95	GSF	Erarbeitung und Bewertung der wissenschaftlichen Grundlagen zur Sicherheitsanalyse eines Endlagers in der Nachbetriebsphase

<b>02E8593/1</b> 08/93 bis 01/94	Institut für Ener- getik und Umwelt (IfE)	Manual und Testbericht zum Grundwassermodell GEOFIM
<b>02E8775</b> 01/96 bis 03/96	GRS Braunschweig	Erarbeitung und Bewertung der wissenschaftlichen Grundlagen zur Sicherheitsanalyse eines Endlagers in der Nachbetriebsphase
<b>02E8705</b> 01/95 bis 07/98	BSH	Transportmechanismen radioaktiver Substanzen im Arktischen Ozean - Numerische und experimentelle Studien am Beispiel der Kara- und Barentssee
<b>02E8835</b> 01/96 bis 12/98	GRS Braunschweig	Weiterentwicklung des Rechenprogramms EMOS zur Durchführung von Langzeitsicherheitsanalysen
<b>02E8845</b> 01/96 bis 12/99	GRS Braunschweig	Aktualisierte Langzeitsicherheitsanalyse für wärmeerzeugende Abfälle im Salinar
<b>02E8855</b> 04/96 bis 01/00	GRS Braunschweig	Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern
<b>02E8916</b> 04/96 bis 10/99	TU Clausthal	Mobilisierung und Immobilisierung endlagerrelevanter Elemente
<b>02E9037</b> 01/97 bis 06/00	BGR	Zweiphasenfluss-Experimente im geklüfteten wasserführenden Kristallin > Gastransport in geklüfteten teilgesättigten Gebirgen <
<b>02E9077</b> 01/98 bis 02/99	TU Clausthal	Erprobung geostatistischer Rechenprogramme zur Rechenzeitverkürzung bei der 3-D-Modellierung von Heterogenitäten und Anisotropien in ausgedehnten hydrogeologischen Strömungsmodellen > Teil 1: Mikro- und Makroklüfte <
<b>02E9148</b> 10/98 bis 06/03	GRS Braunschweig	Entwicklung eines Programms zur dreidimensionalen Modellierung des Schadstofftransportes
<b>02E9178</b> 01/99 bis 09/03	GRS Braunschweig	Aktualisierung sicherheitsanalytischer Rechenprogramme für Teilsysteme eines Endlagers (ARTE)
<b>02E9239</b> 02/00 bis 03/05	GRS Braunschweig	Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern
<b>02E9370</b> 06/00 bis 05/03	Uni Stuttgart	Weiterentwicklung von Simulationstechniken für Gas-Wasser-Prozesse in geklüftet-porösen Medien auf der Feldskala
<b>02E9723</b> 07/03 bis 06/06	GRS	Kopplung von Transportmodellen mit thermodynamischen Gleichgewichtsrechnungen
<b>02E9844</b> 01/04 bis 12/07	GRS Braunschweig	NF-PRO 5, Process Couplings and Integration in Performance Assessment

## **B7 Validierung von Modellen, Unsicherheitsanalyse**

<b>KWA 5203/7</b> 01/82 bis 12/84	BGR	Vergleich thermomechanischer Berechnungen mit thermomechanischen In-situ-Versuchen
<b>KWA 5311/0</b> 06/83 bis 06/88	GSF	Untersuchungen endlagerrelevanter Vorgänge während und nach der Flutung der Kalisalzbergwerkes Hope
<b>KWA 8307/7</b> 06/83 bis 09/88	KBB	Untersuchung relevanter Vorgänge während und nach der Flutung des Kalisalzbergwerkes Hope - Technische Durchführung
<b>02E8121</b> 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
<b>02E8301/1</b> 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
<b>02E8431/3</b> 01/91 bis 12/93	BGR	Aussagegenauigkeit dreidimensionaler thermomechanischer Modellrechnungen im Salzgebirge (Aussagesicherheit)
<b>02E8745</b> 10/95 bis 01/97	Stoller	Auswertung von russischen Experimenten zum Nachweis der Stabilität von Salzstöcken nach der Freisetzung extremer Energiemengen im Steinsalzmassiv
<b>02E8865</b> 01/96 bis 12/98	GRS Braunschweig	Validierung von Einzeleffekten in Grundwassermodellen
<b>02E8926</b> 06/96 bis 05/98	GRS Braunschweig	Untersuchung der Uran-Thorium-Mobilisation als natürliches Analogon für den Radionuklidtransport im Deckgebirge eines Endlagers für radioaktive Abfälle
<b>02E8996</b> 09/96 bis 09/97	GRS Braunschweig	Untersuchung von Altversatz als Analogon zur Konvergenz und Kompaktierung versetzter Strecken über lange Zeiträume - Phase 1 -
<b>02E9067</b> 10/97 bis 04/00	TU Clausthal	U-Th-Isotopenverteilung als natürliches Analogon zur Mobilität von Actiniden in granitischen Gesteinen
<b>02E9128</b> 07/98 bis 08/01	GRS Braunschweig	Tertiäre Sedimente als Barriere für die U/Th-Migration im Fernfeld von Endlagern
<b>02E9410</b> 10/00 bis 09/02	TU Clausthal	Transport und Rückhaltung von Schadstoffen in alterierten Kluftbereichen des HRL Äspö
<b>02E9551</b> 09/01 bis 07/05	GRS Braunschweig	Anwendung von Transportprogrammen auf die Nuklidmigration in natürlichen Gesteinsformationen mit Feldmessungen
<b>02E9813</b> 11/03 bis 07/07	GRS Braunschweig	Entwicklung eines Instrumentariums zur Berechnung des Radionuklidtransports in Tonformationen

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

### ***C1 Erstellung und Anpassung von Überwachungskonzepten***

<b>KWA 3303/1</b> 04/83 bis 03/85	KFA	Studie über Kernmaterialüberwachung bei der Direkten Endlagerung
<b>KWA 3307/5</b> 07/83 bis 12/83	NOELL	Untersuchung zur Überprüfung der Zugänglichkeit von abgebrannten Brennelementen
<b>02E8371/9</b> 01/91 bis 03/94	DBE	Untersuchung der Nichtrückholbarkeit von eingelagertem Kernmaterial
<b>02W6174</b> 02/94 bis 12/96	KFA	Nukleare Nichtverbreitung und Safeguards unter veränderten politischen und technischen Bedingungen
<b>02W6206</b> 01/97 bis 12/98	FZJ	Internationale Kernmaterialkontrolle vor neuen politischen und technischen Herausforderungen
<b>02W6228</b> 01/99 bis 12/01	FZJ	Das „Gestärkte Safeguardsystem“ und die Nichtverbreitungs-Herausforderungen, Perspektiven und innovative Lösungsansätze
<b>02W6232</b> 06/02 bis 09/05	Forschungszentrum Jülich GmbH	Internationale Safeguards- und Technologiekontrolle unter neuen technologischen und politischen Rahmenbedingungen
<b>GP-Nr. A.13</b>	GNS	Sicherheitsmaßnahmen für die Pilot-Konditionierungsanlage: Weiterentwicklung eines Instruments zur Identifizierung von Behälterschweißnähten mittels Ultraschall
<b>GP-Nr. A.14</b>	FZJ	Sicherungsmaßnahmen für die Direkte Endlagerung von Kernmaterialien einem geologischen Endlager: Untersuchung geophysikalischer Messungen

### ***C2 Neue Techniken***

<b>02E8381</b> 01/91 bis 06/94	BGR	Ortung und Überwachung von Brennelement-Behältern mit elektromagnetischen Reflexionsmessungen
<b>02W6218</b> 01/99 bis 12/02	FZJ	Entwicklung digitaler Safeguardstechniken zu Verbesserung der Effektivität und der Kosteneffizienz und Anpassung an das neue Safeguardsystem IN FCIRC/540

### ***C3 Aufnahme, Auswertung, Zusammenführung und Fernübertragung von Daten***

<b>02E8735</b> 01/95 bis 11/95	DBE	Untersuchung zur Verwendung von elektro-optischen Messverfahren für Überwachungsmaßnahmen im Endlager
<b>02W6194</b> 02/94 bis 12/96	FZR	Miniaturisierter Vielkanalanalysator - Modul

**02W6184**  
02/94 bis 12/98

FZJ

Verbesserung von Safeguards durch Datenfernübertragung  
und Auswertung von Satellitendaten

**GP-Nr. D.26**

FZJ

Entwicklung des digitalen Kamerasystems mit digitaler Auf-  
zeichnungs- und Überprüfungsmöglichkeit auf der Basis des  
VXI-Bus

### **Anhang 3 Verzeichnis laufender Forschungsvorhaben (Projektförderung) zur untertägigen Entsorgung chemotoxischer Abfälle**

Im Folgenden sind die laufenden Forschungsvorhaben (Stand 12/2007) für den Bereich der untertägigen Entsorgung chemotoxischer Abfälle in der Struktur des Förderkonzeptes „Forschungsförderung zur Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen (1997-2001)“ aufgelistet. Des Weiteren sind die zur Thematik Altbergbau gehörenden Vorhaben aufgeführt.

#### **A Weiterentwicklung von 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**

<b>02C1074</b> 07/04 bis 03/08	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)	Verbundvorhaben: "Entwicklung eines richtungssensitiven Georadar-Bohrlochmessverfahrens", Teilvorhaben "Weiterentwicklung der räumlichen Auswertung von richtungssensitiven EMR-Bohrlochmessdaten"
<b>02C1084</b> 07/04 bis 03/08	Bergische Universität Wuppertal	Verbundvorhaben: "Entwicklung eines richtungssensitiven Georadar-Bohrlochmessverfahrens", Teilvorhaben: Entwicklung eines aktiven richtungssensitiven Bohrloch-antennensystems
<b>02C1094</b> 07/04 bis 03/08	Deutsche Montan Technologie GmbH	Verbundvorhaben: "Entwicklung eines richtungssensitiven Georadar-Bohrlochmessverfahrens", Teilvorhaben: Entwicklung und Bau der Steuer- und Digitalisierungseinheit, der mechanischen Komponenten und der Datenerfassungseinheit
<b>02C1184</b> 08/04 bis 01/08	Fraunhofer-IzFP	Entwicklung eines Messsystems zur hochauflösenden zerstörungsfreien Erkundung von Gesteinsnahbereichen mittels Sonar
<b>02C1194</b> 08/04 bis 01/08	Technische Universität Ilmenau	Entwicklung eines Messsystems zur hochauflösenden zerstörungsfreien Erkundung von Gesteinsnahbereichen mittels Höchstfrequenz-Radar
<b>02C1305</b> 06/05 bis 05/08	Universität Leipzig	Verbundprojekt: Universelles integriertes geophysikalisches Mess- und Auswerteeinstrumentarium zur Charakterisierung von Problemzonen im Salinar. Teilprojekt Uni Leipzig: Geologie, Geoelektrik, Seismik und Szenarienmodellierung

<b>02C1315</b> 06/05 bis 05/08	Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA)	Verbundprojekt: Universelles integriertes geophysikalisches Mess- und Auswertinstrumentarium zur Charakterisierung von Problemzonen im Salinar. Teilprojekt GGA: Elektromagnetik, Georadar und Quantitative Charakterisierung von Problemzonen
<b>02C1325</b> 06/05 bis 05/08	Fraunhofer-IzFP	Verbundprojekt: Universelles integriertes geophysikalisches Mess- und Auswertinstrumentarium zur Charakterisierung von Problemzonen im Salinar. Teilprojekt FhG: Sonarverfahren

## **A5 Geotechnische Barrieren**

<b>02C0922</b> 05/02 bis 02/09	Universität Friedriciana zu Karlsruhe (TH)	Verschlosssystem mit Äquipotenzialsegmenten für die untertägige Entsorgung (UTD und ELA) gefährlicher Abfälle zur Sicherstellung der homogenen Befeuchtung der Dichtelemente und zur Verbesserung der Langzeitstabilität
-----------------------------------	--	--

## **B Verbesserung von Instrumentarien für die Sicherheitsbewertung von Untertage- deponien**

### **B1 Szenarientwicklung**

### **B2 Verhalten der Wirtsgesteinsformation**

<b>02C0952</b> 10/02 bis 03/08	Technische Universität Clausthal	Modellentwicklung zur Gaspermeation aus unterirdischen Hohlräumen im Salzgebirge
<b>02C1355</b> 09/05 bis 08/08	Technische Universität Clausthal	Weiterentwicklung der EDV-Software INFIL zur Simulation des druckgetriebenen Infiltrationsprozesses von Fluiden in ein nicht permeables Barrieren-Gebirge (Salinar)
<b>02C1577</b> 08/07 bis 04/10	Dr. Andreas Hampel	Verbundprojekt: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von 3D-Modellberechnungen zum mechanischen Langzeitverhalten eines realen Untertagebauwerks im Steinsalz - Teilvorhaben 1
<b>02C1587</b> 08/07 bis 04/10	IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH	Verbundprojekt: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von 3D-Modellberechnungen zum mechanischen Langzeitverhalten eines realen Untertagebauwerks im Steinsalz - Teilvorhaben 2
<b>02C1597</b> 08/07 bis 04/10	Forschungszentrum Karlsruhe GmbH	Verbundprojekt: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von 3D-Modellberechnungen zum mechanischen Langzeitverhalten eines realen Untertagebauwerks im Steinsalz - Teilvorhaben 3
<b>02C1607</b> 08/07 bis 04/10	Universität Hannover	Verbundprojekt: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von 3D-Modellberechnungen zum mechanischen Langzeitverhalten eines realen Untertagebauwerks im Steinsalz - Teilvorhaben 4

<b>02C1617</b> 08/07 bis 04/10	Technische Universität Clausthal	Verbundprojekt: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von 3D-Modellberechnungen zum mechanischen Langzeitverhalten eines realen Untertagebauwerks im Steinsalz - Teilvorhaben 5
-----------------------------------	----------------------------------	---

### **B3 Chemische und physikalische Effekte im Nahfeld**

<b>02C0993</b> 09/03 bis 06/08	GRS Braunschweig	Geochemische Modellierung des Langzeitverhaltens von silikatischen und alumosilikatischen Materialien im Temperaturbereich 30°C bis 90°C
-----------------------------------	------------------	--

<b>02C1244</b> 04/05 bis 03/08	GRS Braunschweig	Prognose der Redoxeigenschaften natürlicher wässriger Lösungen
-----------------------------------	------------------	--

<b>02C1254</b> 01/05 bis 09/08	GRS Braunschweig	Geochemische Barriereeffizienz im anaeroben Deponienahfeld einer UTD
-----------------------------------	------------------	--

<b>02C1426</b> 07/06 bis 06/09	GRS Braunschweig	Verbundvorhaben THEREDA: Entwicklung einer Thermodynamischen Referenzdatenbasis
-----------------------------------	------------------	---

<b>02C1436</b> 07/06 bis 06/09	Forschungszentrum Dresden-Rossendorf	Verbundvorhaben THEREDA: Entwicklung einer Thermodynamischen Referenzdatenbasis
-----------------------------------	--------------------------------------	---

<b>02C1446</b> 07/06 bis 06/09	Technische Universität Bergakademie Freiberg	Verbundvorhaben THEREDA: Entwicklung einer Thermodynamischen Referenzdatenbasis
-----------------------------------	--	---

### **B4 Verhalten von geotechnischen Barrieren**

<b>02C1064</b> 05/04 bis 02/09	Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar	Weiterentwicklung eines TDR-Messverfahrens zur Quantifizierung von Feuchte- und Dichteverteilungen in Bentonitversuchsbauwerken
-----------------------------------	--	---

<b>02C1104</b> 08/04 bis 12/08	Bauhaus-Universität Weimar	Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Abschlussbauwerken: Thermo-Hydro-Mechanisch-Chemisch gekoppelte Systeme
-----------------------------------	----------------------------	--

<b>02C1114</b> 01/05 bis 12/08	Eberhard-Karls-Universität Tübingen	Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Abschlussbauwerken: Thermo-Hydro-Mechanisch-Chemisch gekoppelte Systeme
-----------------------------------	-------------------------------------	--

<b>02C1124</b> 10/04 bis 03/08	Technische Universität Bergakademie Freiberg	Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke
-----------------------------------	--	---

<b>02C1134</b> 07/04 bis 06/08	Technische Universität Clausthal	Untersuchungen an Calciumsulfat-Steinsalz-Baustoffen für Dammbauwerke in Unter-Tage-Deponien und Endlagern
-----------------------------------	----------------------------------	--

<b>02C1204</b> 11/04 bis 12/08	GTS Grube Teutschenthal Sicherungs GmbH & Co. KG	Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit); Teil 2: Erprobung von Funktionselementen in situ
<b>02C1275</b> 05/05 bis 03/09	Technische Uni- versität Clausthal	Verbundprojekt: Kopplung Numerischer Modelle für C:HM-Transportprozesse. Teilprojekt TUC: Gekoppelte Modellierung des C:HM Verhaltens von selbstverheilendem Salzversatz
<b>02C1285</b> 05/05 bis 03/09	GRS Braun- schweig	Verbundprojekt: Kopplung numerischer Modelle für C:HM-Transportprozesse. Teilprojekt GRS: Laborversuche und Geochemische Modellierung
<b>02C1295</b> 05/05 bis 03/09	Eberhard-Karls- Universität Tü- bingen	Verbundprojekt: Kopplung Numerischer Modelle für C:HM-Transportprozesse. Teilprojekt Uni Tübingen: Validierung Numerischer Modelle für geochemische Prozesse in geotechnischen Dichtelementen
<b>02C1335</b> 06/05 bis 02/09	GRS Braun- schweig	Qualifizierung von Strömungsbarrieren in Salzformationen, Phase 1 bis Phase 4
<b>02C1395</b> 10/05 bis 12/08	Kali- Umwelttechnik GmbH vorm. Kaliforschungs- institut	Verbundprojekt: Optimierung von Magnesiabindersystemen für die Verwendung in Verschlussbauwerken für untertägige Deponien und Endlager für radioaktive Abfälle im Salinar - Teilprojekt 1
<b>02C1405</b> 10/05 bis 12/08	Technische Uni- versität Clausthal	Verbundprojekt: Optimierung von Magnesiabindersystemen für die Verwendung in Verschlussbauwerken für untertägige Deponien und Endlager für radioaktive Abfälle im Salinar - Teilprojekt 2
<b>02C1415</b> 10/05 bis 12/08	Technische Uni- versität Clausthal	Verbundprojekt: Optimierung von Magnesiabindersystemen für die Verwendung in Verschlussbauwerken für untertägige Deponien und Endlager für radioaktive Abfälle im Salinar - Teilprojekt 3

## **B5 Verhalten von geologischen Barrieren**

<b>02C1144</b> 10/04 bis 04/08	Forschungszent- rum Dresden- Rossendorf e.V. (FZR)	Verbundprojekt: Integriertes Sorptions-Datenbanksystem für Wechselwirkungen chemisch-toxischer und radioaktiver Kontaminanten mit mineralischen Systemen in geologischen Formationen (ISDA-FZR)
<b>02C1154</b> 10/04 bis 04/08	Deutsche Mon- tan Technologie GmbH	Verbundprojekt: Integriertes Sorptions-Datenbanksystem für Wechselwirkungen chemisch-toxischer und radioaktiver Kontaminanten mit mineralischen Systemen in geologischen Formationen (ISDA-DMT)
<b>02C1164</b> 10/04 bis 04/08	GRS Braun- schweig	Verbundprojekt: Integriertes Sorptions-Datenbanksystem für Wechselwirkungen chemisch-toxischer und radioaktiver Kontaminanten mit mineralischen Systemen in geologischen Formationen (ISDA-GRS)

<b>02C1174</b> 10/04 bis 04/08	EnviCon Dr. Ve- erhoff & Scher- schel GbR	Verbundprojekt: Integriertes Sorptions-Datenbanksystem für Wechselwirkungen chemisch-toxischer und radioaktiver Kontaminanten mit mineralischen Systemen in geologischen Formationen (ISDA-EnviCON)
<b>02C1264</b> 01/05 bis 04/09	IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH	Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss
<b>02C1456</b> 10/06 bis 09/09	Institut für Inter- disziplinäre Iso- topenforschung e.V. an der Uni- versität Leipzig	Bestimmung der Änderung des räumlichen und zeitlichen Ausbreitungsverhaltens von chemotoxischen Schwermetallen nach Wechselwirkung mit Natural Organic Matter (NOM) in geologischen Formationen von Untertagedeponien

**B6 Methodenentwicklung und Rechenprogramme für Sicherheitsbewertungen**

**B7 Validierung von Modellen, Unsicherheitsanalyse**

## **AB Altbergbau (Sicherheitsforschung für Bergbauregionen)**

<b>02C1466</b> 09/06 bis 06/10	Brandenburgische Technische Universität Cottbus	Verbundprojekt: Dynamik abgesoffener oder gefluteter Salzbergwerke und ihres Deckgebirgsstockwerkes; TV1: Hydrologie und Geochemie des Gesamtsystems
<b>02C1476</b> 09/06 bis 06/10	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe	Verbundprojekt: Dynamik abgesoffener oder gefluteter Salzbergwerke und ihres Deckgebirgsstockwerkes; TV2: Geophysikalische Untersuchungen, Seismische Erkundung, Geologisches 3D-Modell, Bohrungen, Server-Datenbank, Koordination des Vorhabens
<b>02C1486</b> 09/06 bis 06/10	Technische Universität Clausthal	Verbundprojekt: Dynamik abgesoffener oder gefluteter Salzbergwerke und ihres Deckgebirgsstockwerkes; TV3: Geomechanische Modellierung
<b>02C1496</b> 09/06 bis 06/10	Kali-Umwelttechnik GmbH vorm. Kaliforschungsinstitut	Verbundprojekt: Dynamik abgesoffener oder gefluteter Salzbergwerke und ihres Deckgebirgsstockwerkes; TV4: Grundlagen für die Geomodellierung
<b>02C1506</b> 09/06 bis 06/10	IHU Geologie und Analytik Gesellschaft für Ingenieur-, Hydro- und Umweltgeologie mbH	Verbundprojekt: Dynamik abgesoffener oder gefluteter Salzbergwerke und ihres Deckgebirgsstockwerkes; TV5: Erfassung, Bewertung und Darstellung der Strukturgeologie und Hydrochemie
<b>02C1516</b> 09/06 bis 06/10	Wasy Gesellschaft für Wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH	Verbundprojekt: Dynamik abgesoffener oder gefluteter Salzbergwerke und ihres Deckgebirgsstockwerkes; TV6: Strömungs- und Transportmodellierung
<b>02C1526</b> 09/06 bis 06/10	Johannes Gutenberg-Universität Mainz	Verbundprojekt: Dynamik abgesoffener oder gefluteter Salzbergwerke und ihres Deckgebirgsstockwerkes; TV7: Bestimmung der durchflusswirksamen Porosität
<b>02C1536</b> 09/06 bis 06/10	Institut für Interdisziplinäre Isotopenforschung e.V. an der Universität Leipzig	Verbundprojekt: Dynamik abgesoffener oder gefluteter Salzbergwerke und ihres Deckgebirgsstockwerkes; TV8: Tomographische Radiotraceruntersuchungen und Fluoreszenztraceruntersuchungen
<b>02C1546</b> 09/06 bis 06/10	Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben	Verbundprojekt: Dynamik abgesoffener oder gefluteter Salzbergwerke und ihres Deckgebirgsstockwerkes; TV9: Deckgebirgseigenschaften über einem bergbaubedingt destabilisiertem Untergrund, abgeleitet aus seismischen Beobachtungen
<b>02C1556</b> 09/06 bis 06/10	Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben	Verbundprojekt: Dynamik abgesoffener oder gefluteter Salzbergwerke und ihres Deckgebirgsstockwerkes; TV10: Isotopenhydrologische Untersuchungen

#### **Anhang 4 Verzeichnis abgeschlossener Vorhaben (Projektförderung) zur untertägigen Entsorgung chemotoxischer Abfälle**

Im Folgenden sind die abgeschlossenen Forschungsvorhaben (Stand 12/2007) für den Bereich der untertägigen Entsorgung chemotoxischer Abfälle in der Struktur des Förderkonzeptes „Forschungsförderung zur Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen (1997-2001)“ aufgelistet. Des Weiteren sind die zur Thematik Altbergbau gehörenden Vorhaben aufgeführt.

### **A WEITERENTWICKLUNG VON UNTERTAGEDEPONIEKONZEPTIONEN UNTER SICHERHEITSGESICHTSPUNKTEN**

#### **A1 Abfallcharakterisierung und –klassifizierung**

<b>02C0051</b> 03/92 bis 05/95	GSF	Auswahl und Untersuchung untertagerelevanter Abfallarten
<b>02C0133</b> 05/93 bis 05/94	ERCOSPLAN Erfurter Consulting- und Planungsbüro GmbH	Untersuchung des Langzeitverhaltens von Rückständen aus der Braunkohlenveredlung bei einer Untertagedeponie unter den Geogenen Bedingungen des Kali- und Steinsalzbergbaus
<b>02C0284</b> 01/95 bis 12/95	GSF	Erprobung und Anpassung ökotoxikologischer Methoden zur Bewertung UTD-relevanter Abfall-Eluate
<b>02C0415</b> 01/96 bis 12/97	GRS Braunschweig	Erprobung und Anpassung ökotoxikologischer Methoden zur Bewertung UTD-relevanter Abfall-Eluate
<b>02C0506</b> 08/96 bis 07/99	GRS Braunschweig	Erweiterung und Übertragung von Untersuchungsmethoden für die untertägige Einbringung von Abfällen - Realitätsnahe Untersuchungsmethoden zur Bestimmung des Langzeitverhaltens -
<b>02C0679</b> 10/99 bis 11/01	GRS Braunschweig	Erstellung und Nutzung einer Datenbank zur Bestandsaufnahme und Bewertung methodenabhängiger Informationen zum Mobilisationsverhalten und zum Schadstoffpotential von organisch und anorganisch belasteten Feststoffen
<b>02C0689</b> 10/99 bis 09/04	GRS Braunschweig	Gasfreisetzung aus chemisch-toxischen Abfällen in Untertagedeponien

#### **A2 Wissenschaftliche Grundlagen für Sicherheitsanforderungen**

<b>02C0294</b> 01/95 bis 07/97	BGR Berlin	Tiefversenkung von Abwässern und flüssigen Abfällen in den östlichen Bundesländern
-----------------------------------	------------	--

### **A3 Weiterentwicklung von Einlagerungs-, Handhabungs- und Überwachungs- techniken**

<b>02WS8845</b> 09/88 bis 12/88	NGS	Experimentaluntersuchungen zur Ablagerung von Abfällen in Salzkavernen - Teilvorhaben: Abfallerhebung und Projektdefinitionsphase
<b>02WA8937</b> 07/89 bis 09/92	NGS	Experimentaluntersuchungen zur Ablagerung von Abfällen in Salzkavernen
<b>02C0123</b> 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
<b>02C0143</b> 04/93 bis 03/94	BSM Beratungsgesellschaft für Umweltfragen	Systemanalytische Untersuchung zu Förder- und Einlagerungstechniken für die Untertägige Entsorgung von Rest- und Abfallstoffen
<b>02C0183</b> 10/93 bis 05/96	RWTH Aachen	Gegenüberstellung und vergleichende Bewertung unterschiedlicher Konzepte zur untertägigen Deponierung chem./tox. Abfälle
<b>02C0214</b> 01/94 bis 03/96	Uni Konstanz	Vergleich von oberirdischer und untertägiger Entsorgung umweltgefährdender Stoffe unter Berücksichtigung von Langzeiteffekten
<b>02C0334</b> 01/95 bis 01/96	K-UTEC	Entsorgung von Autoshreder-Leichtfraktion mit dem Dickstoffverfahren in untertägige Hohlräume des Kalibergbaus - Erarbeitung der Verfahrensgrundlagen -
<b>02C0486</b> 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**

<b>02C0011</b> 10/91 bis 07/95	Technische Universität Bergakademie Freiberg	Systemanalyse über die Nutzung untertägiger Hohlräume des Steinkohlen-, Erz-, Salz- und Kalkbergbaus zur umweltverträglichen Verbringung von Abfällen mit chem./tox. Inhaltsstoffen
<b>02C0102</b> 01/93 bis 01/95	Fraunhofer-Izfp	Inverse Methoden der Schallemissionsanalyse zur quantitat. Bestimmung von Auflockerungszonen insbes. der Lage, der Orientierung und der Bruchfläche von Rissen im Wirtsgestein von UTD
<b>02C0204</b> 01/94 bis 12/95	GRS Braunschweig	Untersuchungen zur Auflockerungszone um Hohlräume im Steinsalzgebirge

<b>02C0425</b> 01/96 bis 03/98	GRS Braunschweig	Untersuchungen zur Auflockerungszone um Hohlräume im Steinsalzgebirge
<b>02C0527</b> 10/97 bis 03/01	Technische Universität Bergakademie Freiberg	In-situ-Ermittlung von Strömungskennwerten natürlicher Salzgesteine in Auflockerungszonen gegenüber Gas und Salzlösungen unter den gegebenen Spannungsbedingungen im Gebirge
<b>02C0537</b> 10/97 bis 12/01	Fraunhofer-Izfp	Entwicklung und In-situ-Test akustischer Verfahren zur zerstörungsfreien Beurteilung von Auflockerungszonen im Salinar
<b>02C0588</b> 07/98 bis 12/01	Technische Universität Clausthal	Mechanische und hydraulische Eigenschaften von Auflockerungszonen des grubenraumnahen Gebirges in Verbindung mit der Planung von Damm- und Verschlussbauwerken im Salinar - Teil A: Mechanische Modellbildung und mechanisch-hydraulische Tragwerksanalyse
<b>02C0598</b> 07/98 bis 12/01	Technische Universität Clausthal	Mechanische und hydraulische Eigenschaften von Auflockerungszonen des grubennahen Gebirges in Verbindung mit der Planung von Damm- und Verschlussbauwerken in Salinar - Teil B: Hydraulische Modellbildung
<b>02C0820</b> 01/01 bis 03/04	Technische Universität Bergakademie Freiberg	Zeitliche Veränderungen der Ausdehnung und der hydraulischen Eigenschaften von Auflockerungszonen um Hohlräume in Gesteinen mit visko-plastischen Eigenschaften
<b>02C0841</b> 07/01 bis 06/05	Technische Universität Clausthal	Herkunft und Migration mineralgebundener Gase in marinen Evaporiten
<b>02C0851</b> 07/01 bis 09/03	Fraunhofer-Izfp	Geophysikalische Erkundung als Beitrag zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern und Untertagedeponien - Geosonar- und Ultraschallverfahren
<b>02C0861</b> 07/01 bis 12/03	Universität Leipzig	Geophysikalische Erkundung als Beitrag zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern und Untertagedeponien - Geoelektrik, Seismik, Geologie
<b>02C0871</b> 07/01 bis 12/03	Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA)	Geophysikalische Erkundung als Beitrag zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern und Untertagedeponien - Elektromagnetik, Georadar, Quantitative Charakterisierung von Problemzonen -

## **A5 Geotechnische Barrieren**

<b>02C0234</b> 03/94 bis 12/95	GSF	Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken - Vorprojekt -
<b>02C0496</b> 03/97 bis 01/99	Technische Universität Bergakademie Freiberg	Untersuchung und Bewertung alter Spülversatzkörper aus bergbaueigenen Rückständen der Kaliindustrie hinsichtlich der Eignung für Verschlussarbeiten in UTD
<b>02C0516</b> 08/96 bis 09/02	Kali und Salz	Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken - Forschungsvorhaben Schachtverschluss Salzdettfurth Schacht SA II

<b>02C0547</b> 10/97 bis 03/03	Technische Universität Bergakademie Freiberg	Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckenverschlusssysteme für UTD im Salinar; Bau und Test eines Versuchsverschlusssystemes unter realen Bedingungen
<b>02C0699</b> 10/99 bis 09/01	Kali-Umwelttechnik GmbH	Untersuchungen zur Entwicklung, Anwendung und Eignung von mineralischen Gelen und Bindemittelsystemen auf Sorelbasis zur Einbettung und Sorption schadstoffhaltiger Abfallstoffe und zur Verbesserung der Barrierewirkung von Versatz
<b>02C0902</b> 01/02 bis 12/02	Technische Universität Bergakademie Freiberg	Wissenschaftlich - technisches Programm für den Rückbau des in situ getesteten Versuchsverschlusssystemes in der Grube Sondershausen
<b>02C0942</b> 10/02 bis 10/04	GTS Grube Teutschenthal Sicherungs GmbH & Co. KG	Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Abschlussbauwerke (Streckendämme) im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) in UTD und UTV

## **B VERBESSERUNG VON INSTRUMENTARIEN FÜR DIE SICHERHEITSBEWERTUNG VON UNTERTAGEDEPONIEREN**

### **B1 Szenarienentwicklung**

<b>02C0314</b> 05/95 bis 06/96	Technische Universität Bergakademie Freiberg	Interdisziplinäre Untersuchungen zur Langzeitsicherheit einer UTD im Salinar unter dem Gesichtspunkt des Lösungszutritts - Präzisierung der Anforderungen für eine Modellierung -
<b>02C0324</b> 04/95 bis 06/96	K-UTEK	Interdisziplinäre Untersuchungen zur Langzeitsicherheit einer UTD unter dem Gesichtspunkt eines Lösungszutritts - Zusammenstellung und Bewertung von Beobachtungen in der Natur -
<b>02C0344</b> 08/95 bis 04/97	Technische Universität Bergakademie Freiberg	Flutungsphänomene als Fluidbarriere

### **B2 Verhalten der Wirtsgesteinsformation**

<b>02C0062</b> 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
<b>02C0092</b> 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
<b>02C0264</b> 04/95 bis 12/99	IfG Leipzig	Untersuchungen zum Spröbruchverhalten von Carnallit und seiner Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit von UTD

<b>02C0274</b> 04/95 bis 12/99	IfG Leipzig	Untersuchungen zur Langzeitsicherheit von UTD in Salzformationen der Flachen Lagerung im Zusammenhang mit dem Verformungs- und Bruchverhalten - Phase II: Fortführung und Abschluss Geotechnischer In-situ-Messungen
<b>02C0649</b> 01/00 bis 12/02	IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH	Untersuchungen zur Langzeitsicherheit von UTD in Salzformationen der flachen Lagerung im Zusammenhang mit dem Verformungs- und Bruchverhalten - Phase III
<b>02C0892</b> 01/02 bis 12/04	IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH	Prognose der dynamischen Langzeitstabilität von Grubengebäuden im Salinar unter Berücksichtigung von Diskontinuitäts- und Schichtflächen
<b>02C0720</b> 10/00 bis 03/06	Technische Universität Clausthal	Weiterentwicklung eines Prognosemodells zum Barrierenintegritäts- und Langzeitsicherheitsnachweis für Untertagedeponien mit Berücksichtigung von Gefügeschädigung und Schädigungsverheilung auf der Grundlage der Continuum-Damage-Theorie
<b>02C1004</b> 04/04 bis 11/06	Dr. Andreas Hampel	Verbundprojekt: Die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen - Teilvorhaben 1
<b>02C1014</b> 04/04 bis 11/06	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)	Verbundprojekt: Die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen - Teilvorhaben 2
<b>02C1024</b> 04/04 bis 11/06	IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH	Verbundprojekt: Die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen - Teilvorhaben 3
<b>02C1034</b> 04/04 bis 11/06	Technische Universität Clausthal	Verbundprojekt: Die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen - Teilvorhaben 4
<b>02C1044</b> 04/04 bis 11/06	Universität Hannover	Verbundprojekt: Die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen - Teilvorhaben 5
<b>02C1054</b> 04/04 bis 11/06	Forschungszentrum Karlsruhe GmbH	Verbundprojekt: Die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen - Teilvorhaben 6
<b>02C1566</b> 10/06 bis 03/07	Technische Universität Clausthal	Grundlagenuntersuchungen zur Unterdrückung der Auflocke- rungszone in Strecken des Salinar

### **B3 Chemische und physikalische Effekte im Nahfeld**

<b>02C0021</b> 10/91 bis 07/95	TU Berlin	Untersuchung des Langzeitverhaltens in situ-verfestigter Abfallstoffe in untertägigen Hohlräumen
<b>02C0031</b> 10/91 bis 06/95	TU Clausthal	Untersuchungen zum Langzeitverhalten chem. immobilisiert. Abfall- und Reststoffe in untertägigen Hohlräumen

<b>02C0072</b> 10/92 bis 11/95	GRS Braunschweig	Exemplarische Untersuchungen von Wechselwirkungsreaktionen chem./tox. Abfälle mit hochsalinaren Lösungen
<b>02C0082</b> 11/92 bis 12/95	TU- Braunschweig	Der Einfluß des interaktiven Verhaltens von Gebirge und Deponat auf die geotechnische Sicherheitsbeurteilung unterirdischer Entsorgungsanlagen
<b>02C0163</b> 07/93 bis 12/95	GRS Braunschweig	Gaserzeugung und -freisetzung in Abfällen und deren Ausbreitung im umgebenden Gebirge
<b>02C0173</b> 07/93 bis 12/95	GRS Braunschweig	Charakterisierung von mineralisierten Tiefengrundwässern in nichtsalinaren Festgesteinen - Untersuchung von Wechselwirkungsreaktionen mit Abfällen bei der immissionsneutralen Ablagerung
<b>02C0435</b> 01/96 bis 06/96	GRS Braunschweig	Charakterisierung von mineralisierten Tiefengrundwässern in nichtsalinaren Festgesteinen - Untersuchungen von Wechselwirkungsreaktionen mit Abfällen bei der immissionsneutralen Ablagerung
<b>02C0445</b> 01/96 bis 06/96	GRS Braunschweig	Gaserzeugung und -freisetzung in Abfällen und deren Ausbreitung im umgebenden Gebirge
<b>02C0385</b> 08/95 bis 10/97	TU Berlin	Untersuchung des langfristigen Gefährdungspotentials anorganischer Rückstände bei deren Integration in Schicht- und Sedimentgestein
<b>02C0395</b> 08/95 bis 07/99	TU Clausthal	Untersuchungen zur dauerhaften Immobilisierung schadstoffhaltiger Rückstände unter Berücksichtigung der Barrierewirkung kompakter Wirtsgesteine
<b>02C0405</b> 09/95 bis 01/98	Technische Universität Bergakademie Freiberg	Erstellung einer Datenbasis zur Modellierung der Wechselwirkung von chrom-, kupfer- und nickelhaltigem Deponiegut mit Lösungen des Salzgesteins einer UTD
<b>02C0475</b> 10/95 bis 09/98	GRS Braunschweig	Experimentelle Untersuchungen und geochemische Modellierung zum Verhalten schwermetallhaltiger chemisch-toxischer Abfälle in UTD in Salzformationen
<b>02C0608</b> 07/98 bis 06/01	GRS Braunschweig	Geochemische Barriereeffizienz im anaeroben Deponienahfeld einer UTD (Geochemische Barriere)
<b>02C0710</b> 07/00 bis 09/04	GRS Braunschweig	Geochemisches Modell für Zn, Cd und Pb in salinaren Lösungen aus Abfalldeponien und Alt- und Umweltlasten
<b>02C0912</b> 05/02 bis 12/05	GRS Braunschweig	Geochemische Modellierung des Langzeitverhaltens von silikatischen und aluminosilikatischen Materialien Kurztitel: SiAl
<b>02C0963</b> 10/03 bis 10/05	GRS Braunschweig	Erfassung und Bewertung der chemischen und physikalischen Analysenergebnisse von Salzlösungszuflüssen im Salzbergbau Mitteldeutschlands (Kurztitel: Laugen Mitteldeutschland)
<b>02C0973</b> 09/03 bis 01/07	GRS Braunschweig	Entwicklung einfacher Strategien zur Reduzierung der Mobilisierbarkeit von Schwermetallen aus untertägig abgelagerten Abfällen

<b>02C0983</b> 09/03 bis 09/07	GRS Braun- schweig	Komplettierung der Datenbasis zur Modellierung der Schwermetallmobilisierung in salinaren Systemen
-----------------------------------	-----------------------	--

#### **B4 Verhalten von geotechnischen Barrieren**

<b>02C0304</b> 12/94 bis 06/97	TU Clausthal	Entwicklung und Erprobung von kontrollierbaren Verfahren zur Verbesserung der Barrierenwirkung des nicht-salinaren Wirtsgesteins oder Deckgebirges im Bereich von Auflockerungs- und Störzonen
-----------------------------------	--------------	--

<b>02C0193</b> 11/93 bis 09/97	Technische Uni- versität Bergaka- demie Freiberg	Materialuntersuchungen für Mehrkomponentensysteme auf Ton/Bentonit-Basis für Dichtung und Lastabtrag mit hohem Rückhaltevermögen für den langzeitsicheren Verschluss von UTD und Endlagern im Salinar
-----------------------------------	--	---

<b>02C0659</b> 07/99 bis 12/01	GRS Braunschweig	Langzeitstabilität von Tondichtungen in Salzformationen
-----------------------------------	---------------------	---

<b>02C0669</b> 10/99 bis 03/03	GRS Braunschweig	Hydraulische Kennwerte von tonhaltigen Mineralgemischen zum Verschluss von Untertagedeponien
-----------------------------------	---------------------	--

<b>02C0800</b> 11/00 bis 01/04	MFPA an der Bauhaus- Universität Wei- mar	Entwicklung eines Messsystems zur Feuchtemessung in Bentonit-Abschlussbauwerken in salinärer Umgebung
-----------------------------------	--	---

<b>02C0810</b> 11/00 bis 10/03	Forschungszent- rum Karlsruhe GmbH	Entwicklung eines Messsystems zur Feuchtemessung in Bentonit-Abschlussbauwerken in salinärer Umgebung
-----------------------------------	--	---

<b>02C0830</b> 11/00 bis 10/04	GRS Braunschweig	Weiterentwicklung eines selbstverheilenden Salzversatzes als Komponente im Barriersystem Salinar
-----------------------------------	---------------------	--

<b>02C0881</b> 08/01 bis 07/04	Bauhaus- Universität Wei- mar	Experimentelle und numerische Untersuchungen des Langzeitverhaltens von Abschlussbauwerken im Salinar mit Bentonitgemischen als Dichtelement
-----------------------------------	-------------------------------------	--

<b>02C1214</b> 01/05 bis 07/07	Kali- Umwelttechnik GmbH vorm. Kaliforschungs- institut	Verbundprojekt: Weiterentwicklung von Magnesiabindern von der Strömungsbarriere hin zu einem Verschlusselement im Salinar - Hauptprojekt
-----------------------------------	---	--

<b>02C1224</b> 01/05 bis 07/07	Bauhaus- Universität Wei- mar	Verbundprojekt: Weiterentwicklung von Magnesiabindern von der Strömungsbarriere hin zu einem Verschlusselement im Salinar. Teilprojekt Bauhaus Uni: Experimentelle Untersuchungen zur Struktur, dem Abbindeverhalten, der Kompressibilität und den volumetrischen Eigenschaften
-----------------------------------	-------------------------------------	---

<b>02C1234</b> 01/05 bis 07/07	IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH	Verbundprojekt: Weiterentwicklung von Magnesiabindern von der Strömungsbarriere hin zu einem Verschlussbauwerk im Salinar. Teilprojekt IfG: Untersuchungen der mechanischen Anforderungen und Eigenschaften
-----------------------------------	---	---

## **B5 Verhalten von geologischen Barrieren**

<b>02C0558</b> 07/98 bis 06/01	Universität Leipzig	Komplexes Meß- und Auswerteeinstrumentarium für die untertägige Erkundung von Problemzonen der geologischen Barriere von Endlagern und UTD im Salinar - Geologie, Einbeziehung von Geoelektrik und Seismik
<b>02C0568</b> 07/98 bis 06/01	Fraunhofer-IzFP	Komplexes Meß- und Auswerteeinstrumentarium für die untertägige Erkundung von Problemzonen der geologischen Barriere von Endlagern und Untertagedeponie im Salinar - Einbeziehung von Sonarverfahren
<b>02C0578</b> 07/98 bis 06/01	Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA)	Komplexes Meß- und Auswerteeinstrumentarium für die untertägige Erkundung von Problemzonen der geologischen Barriere von Endlagern und UTD im Salinar - Einbeziehung elektromagnetischer Verfahren
<b>02C0618</b> 09/98 bis 08/01	GRS Braunschweig	Erstellung einer Datenbank zur Bestandsaufnahme und Bewertung geochemischer Informationen zum Verhalten von Abfallinhaltsstoffen im Deckgebirge einer UTD/UTV (Sorptionsdatenbank Chemieabfälle)
<b>02C0639</b> 01/00 bis 12/01	IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH	Prognose der dynamischen Langzeitstabilität von Grubengebäuden im Salinar
<b>02C0709</b> 10/99 bis 12/02	Institut für Interdisziplinäre Isotopenforschung e.V. an der Universität Leipzig	Geochemische Untersuchungen zur Retention von geogenen / anthropogenen Kohlenstoffverbindungen für toxische Schwermetalle
<b>02C0932</b> 01/03 bis 03/06	Institut für Interdisziplinäre Isotopenforschung e.V. an der Universität Leipzig	Georadiochemische Untersuchungen zur Rückhaltung und Mobilisierung von chemotoxischen Schwermetallspezies durch Natural Organic Matter (NOM)

## **B6 Methodenentwicklung und Rechenprogramme für Sicherheitsbewertungen**

<b>02C0153</b> 07/93 bis 12/95	GSF	Entwicklung eines Nahbereichsmodells für Langzeitsicherheitsanalysen von Salzkavernen mit chem./tox. Abfällen
<b>02C0224</b> 01/94 bis 03/98	GRS Köln	Entwicklung und Anwendung analytischer Methoden zur Eignungsuntersuchung der Verbringung bergbaufremder Rückstände in dauerhaft offene Grubenräume im Festgestein
<b>02C0244</b> 04/94 bis 08/97	Technische Universität Bergakademie Freiberg	Entwicklung von Verfahren und Programmen zur Kalibrierung von Strömungs- und Transportmodellen
<b>02C0254</b> 10/94 bis 12/95	GSF	Entwicklung eines schnellen Programms zur Modellierung von Grundwasserströmungen mit variabler Dichte
<b>02C0365</b> 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

<b>02C0455</b> 01/96 bis 06/96	GRS Braunschweig	Entwicklung eines Nahbereichsmodells für Langzeitsicherheitsanalysen von Salzkavernen mit chem./tox. Abfällen
<b>02C0465</b> 01/96 bis 03/98	GRS Braunschweig	Entwicklung eines schnellen Programms zur Modellierung von Grundwasserströmungen mit variabler Dichte
<b>02C0628</b> 01/99 bis 03/03	GRS Braunschweig	Modellrechnungen zur großräumigen dichteabhängigen Grundwasserbewegung
<b>02C1345</b> 08/05 bis 05/07	Öko-Institut e.V. - Institut für angewandte Ökologie	Methodenentwicklung für die ökologische Bewertung der Entsorgung gefährlicher Abfälle unter und über Tage und Anwendung auf ausgewählte Abfälle

### **B7 Validierung von Modellen, Unsicherheitsanalyse**

<b>02C0113</b> 07/93 bis 11/97	IFAG	Validierungsverfahren für Prognoserechnungen zur Standsicherheit der Grubengebäude von Endlagern Chemisch-Toxischer Abfälle (Flache Lagerstätte, Weiterlaufender Abbau) durch Verwendung eines Arrays von Hochauflösenden Strainmetern
<b>02C0354</b> 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
<b>02C0375</b> 08/95 bis 07/98	GRS Köln	Anwendung von Qualitätssicherungsmaßnahmen sowie Durchführung von Test- und Verifizierungsrechnungen zur Qualifizierung des in Entwicklung befindlichen schnellen Grundwasserprogramms

## **AB Altbergbau (Sicherheitsforschung für Bergbauregionen)**

<b>02C0730</b> 10/00 bis 02/02	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)	Verbundprojekt: Maßnahmen der nachhaltigen Gefahrenabwehr für Altlasten in Gebieten mit bergbaubedingten Destabilisierungsvorgängen am Beispiel der Stadt Staßfurt - Teilvorhaben 1: Gesamtprojektkoordinierung, geochemische Untersuchungen und Monitoring
<b>02C0740</b> 10/00 bis 09/01	Technische Universität Clausthal	Verbundprojekt: Maßnahmen der nachhaltigen Gefahrenabwehr für Altlasten in Gebieten mit bergbaubedingten Destabilisierungsvorgängen am Beispiel der Stadt Staßfurt - Teilvorhaben 2: Gebirgsmechanische Analyse des Bergschadensgebietes Staßfurt
<b>02C0750</b> 10/00 bis 02/02	Kali-Umwelttechnik GmbH vorm. Kaliforschungsinstitut	Verbundprojekt: Maßnahmen der nachhaltigen Gefahrenabwehr für Altlasten in Gebieten mit bergbaubedingten Destabilisierungsvorgängen am Beispiel der Stadt Staßfurt - Teilvorhaben 3: Bergschadensbewertung, Geohydraulik und Sanierungsmaßnahmen
<b>02C0760</b> 10/00 bis 02/02	Brandenburgische Technische Universität Cottbus	Verbundprojekt: Maßnahmen der nachhaltigen Gefahrenabwehr für Altlasten in Gebieten mit bergbaubedingten Destabilisierungsvorgängen am Bspiel der Stadt Staßfurt - Teilvorhaben 4: Thermodyn. Modellierung, Abdichtsysteme von Altablagern, Gesamtbewert. Gefährdungspotent.
<b>02C0770</b> 10/00 bis 02/02	IHU Geologie und Analytik Gesellschaft für Ingenieur-, Hydro- und Umweltgeologie mbH	Verbundprojekt: Maßnahmen der nachhaltigen Gefahrenabwehr für Altlasten in Gebieten mit bergbaubedingten Destabilisierungsvorgängen - Teilvorhaben 5: Struktur- und Hydrogeol. Analyse im Bergschadensgebiet Staßfurt - Entwicklung Hydr. Sicherungs- und Sanierungskonzepte
<b>02C0780</b> 10/00 bis 09/01	Geophysik GGD Gesellschaft für Geowissenschaftliche Dienste mbH	Verbundprojekt: Maßnahmen der nachhaltigen Gefahrenabwehr für Altlasten in Gebieten mit bergbaubedingten Destabilisierungsvorgängen am Beispiel der Stadt Staßfurt - Teilvorhaben 6: Geophysikalische Erkundung - Seismik

## **Anhang 5 Verzeichnis verwendeter Abkürzungen**

AB	Altbergbau
AtG	Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren. AtG - Atomgesetz
BAMBUS	Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (EU-Projekt)
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung (früher BMFT: Bundesministerium für Forschung und Technologie)
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
DBE	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern
DBETec	DBE-Technology GmbH (Tochtergesellschaft der DBE)
ELA	Endlager / Endlagerung
EMOS	Endlager-Modellierung von Szenarien
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit
IAEA	International Atomic Energy Agency
INE	Institut für Nukleare Entsorgung (des Forschungszentrum Karlsruhe)
KMÜ	Kernmaterialüberwachung
NAGRA	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
NAWG	Natural Analogues Working Group
OECD-NEA	Organisation for Economic Cooperation and Development - Nuclear Energy Agency
RWMC	Radioactive Waste Management Committee (der OECD-NEA)
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB
UTD	Untertagedeponie / Untertagedeponierung
UTV	Untertageversatz / Untertageversatzbergwerke