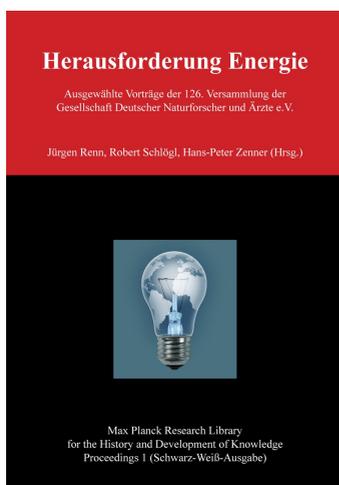


Max Planck Research Library for the History and Development of Knowledge

Proceedings 1

Tilmann Rothfuchs, Thomas Brassler, Horst-Jürgen Herbert, Jörg Mönig and Ingo Müller-Lyda:

Forschung zur sicheren Endlagerung radioaktiver Abfälle



In: Jürgen Renn, Robert Schlögl and Hans-Peter Zenner (Hrsg): *Herausforderung Energie : Ausgewählte Vorträge der 126. Versammlung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte e.V.*

Online version at <http://edition-open-access.de/proceedings/1/>

ISBN 978-3-8442-4282-9

First published 2011 by Edition Open Access, Max Planck Institute for the History of Science under Creative Commons by-nc-sa 3.0 Germany Licence.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/de/>

Printed and distributed by:

Neopubli GmbH, Berlin

<http://www.epubli.de/shop/buch/7803>

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>

Kapitel 4

Forschung zur sicheren Endlagerung radioaktiver Abfälle

Tilmann Rothfuchs, Thomas Brassler, Horst-Jürgen Herbert, Jörg Mönig, Ingo Müller-Lyda

4.1 Einleitung

Bei der friedlichen Nutzung der Kernenergie fallen radioaktive Abfälle an, die geordnet beseitigt werden müssen. Volumen und Aktivität der radioaktiven Abfälle aus anderen Bereichen, wie der Forschung oder der Medizin, sind im Vergleich zu denen aus der Stromproduktion wesentlich geringer.

In Deutschland sind alle radioaktiven Abfälle durch Endlagerung in tiefen geologischen Formationen zu entsorgen. Dies steht im Einklang mit der internationalen Auffassung [1], dass diese Entsorgungsoption, insbesondere für hochradioaktive Abfälle, am besten geeignet ist. Ziel der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ist die langfristige Isolation der radioaktiven Abfälle von der belebten Umwelt.

Nach dem Atomgesetz ist die Endlagerung eine Aufgabe des Bundes. Im Hinblick auf die Endlagerung werden die radioaktiven Abfälle in Deutschland in zwei Kategorien unterteilt, nämlich

- Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung und
- wärmeentwickelnde Abfälle.

Für die Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung wird seit 2007 aufgrund der rechtskräftig gewordenen Planfeststellung des Endlagers Konrad nunmehr die Einrichtung des Endlagers vorbereitet und voraussichtlich ab 2019 mit der Endlagerung mit einem Gesamtvolumen von ca. 300.000 m³ begonnen.

Für die wärmeentwickelnden Abfälle mit einem Gesamtvolumen von ca. 22.000 m³ ist dagegen ein geeignetes Endlager noch zu errichten. Die Anforderungen an ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle werden durch die charakteristischen Abfalleigenschaften wie Wärmeentwicklung und hohe Aktivität bestimmt. Die wärmeentwickelnden Abfälle enthalten

einen Anteil von 99,9 % der Gesamtaktivität aller in Deutschland anfallenden radioaktiven Abfälle.

Als mögliches Wirtsgestein für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle stehen in Deutschland Steinsalzformationen in steiler Lagerung (Salzstöcke) im Fokus; eine weitere in der Fachwelt diskutierte Möglichkeit ist die Endlagerung in einer Tonsteinformation.

Forschung und Entwicklung sind zur Schaffung der wissenschaftlichen Grundlagen für die Endlagerung und zur Führung des Sicherheitsnachweises erforderlich. Die Zuständigkeit für die Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet liegt beim Bund. Der in Deutschland erreichte Stand von Forschung und Entwicklung für die Errichtung eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle ist in [2] ausführlich dargestellt.

4.2 Sicherheitskonzept

Auf der Grundlage der in den Jahren 2000 bis 2003 vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) erarbeiteten Empfehlungen [3] soll die Isolation der radioaktiven Abfälle von der Biosphäre durch ihren sicheren Einschluss in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) in tiefen geologischen Formationen erfolgen. Der ewG ist der Teil des geologischen Gesamtsystems an einem Standort, der im Zusammenwirken mit geotechnischen Verschlüssen bzw. Barrieren die Isolation der Abfälle sicherstellen muss.

Der Endlagerstandort muss eine günstige geologische Gesamtsituation aufweisen, so dass die Sicherheitsanforderungen sowohl in der Betriebsphase als auch der Nachbetriebsphase über Zeiträume in der Größenordnung von einer Million Jahren erfüllt werden.

Bei der Auswahl des Wirtsgesteins werden folgende Bedingungen, Forderungen und Prioritäten angelegt [3]:

- Es muss in Deutschland mit den nötigen Mächtigkeiten, mit der erforderlichen Dichtigkeit und in günstigen Tiefen vorhanden sein.
- Ausreichend große Wirtsgesteinsbereiche (Mächtigkeit, Fläche) müssen mit vertretbarem Erkundungsaufwand auffindbar oder aus anderen Untersuchungszusammenhängen bekannt sein.
- Priorität haben solche Wirtsgesteine, deren Gesteinseigenschaften bereits für sich alleine genommen geeignet sind, die radioaktiven Stoffe einzuschließen.

Die Anforderung an einen Endlagerstandort nach einer „günstigen geologischen Gesamtsituation“ ist darüber hinaus u.a. durch folgende Punkte gekennzeichnet [3]:

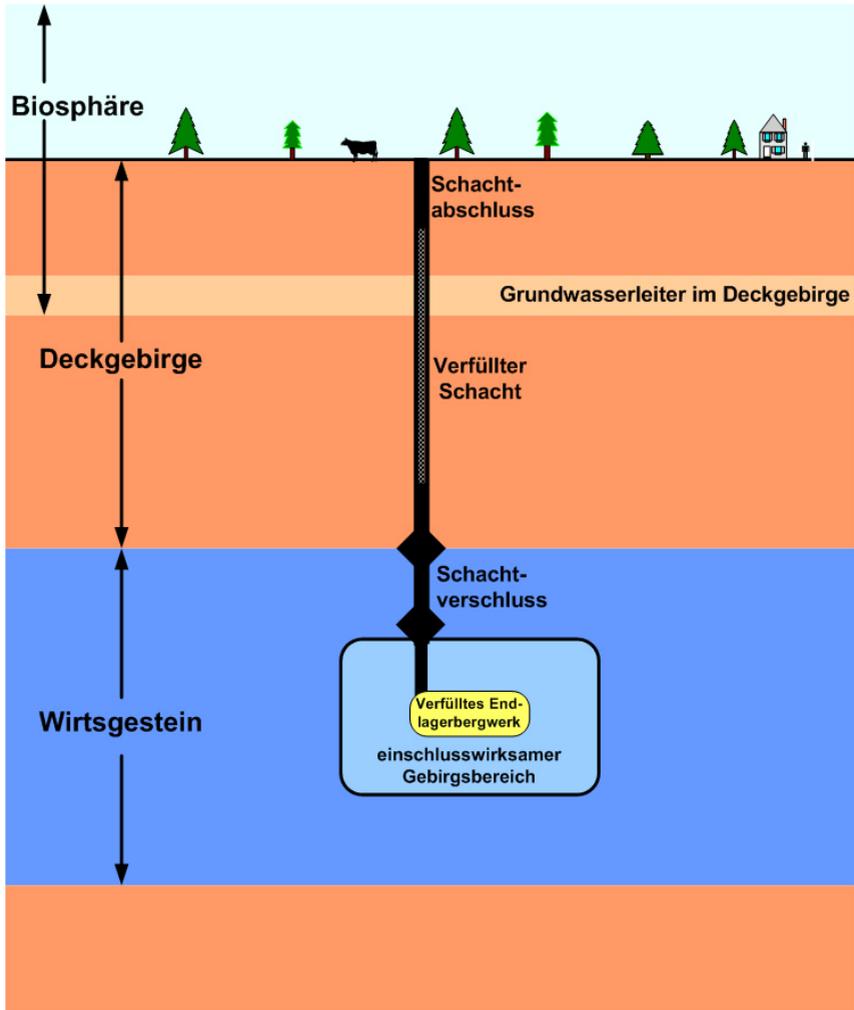


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der Komponenten eines Endlagersystems in der Nachbetriebsphase [2]

- Einfacher geologisch-tektonischer Bau,
- Gute räumliche Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit,
- Fehlen tief reichender Grundwasserleiter,
- Vorkommen gering durchlässiger Gesteine mit guter Temperaturverträglichkeit,
- günstige gebirgsmechanische Eigenschaften der Endlagerformation.

Im Einzelfall ist jeweils eine Abwägung der verschiedenen allgemeinen Anforderungen anhand von geeigneten Kriterien durchzuführen. Abbildung 4.1 zeigt schematisch die wesentlichen Komponenten eines Endlagersystems für den langzeitsicheren, nachsorgefreien Einschluss radioaktiver Abfälle.

Die nachsorgefreie Isolation der Schadstoffe soll in der Nachbetriebsphase langfristig ausschließlich vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich, d.h. der geologischen Barriere, gewährleistet werden. Diese Barriere wird durch die verfüllten Hohlräume und Schachtverbindungen des Endlagerbergwerks zur Oberfläche gestört. Diese Störungen der natürlichen Barriere müssen durch technische Barrieren (z.B. Abfallbehälter) und geotechnische Barrieren (z.B. Schachtverschluss) für einen Übergangszeitraum bis zum Wiedererreichen der Dichtheit des Wirtsgesteins kompensiert werden.

4.3 Geeignete geologische Formationen in Deutschland

Das Konzept einer Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen wurde bereits im Jahr 1957 in einem von der US-National Academy of Sciences erstellten Bericht als besonders geeignet bezeichnet. In Deutschland wurde 1963 im Zweiten Deutschen Atomprogramm ebenso eine Empfehlung für Salz als Endlagermedium ausgesprochen wie in einem Gutachten der Bundesanstalt für Bodenforschung in Hannover (heute: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR).

Einen Katalog der für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Frage kommenden Salzformationen in Deutschland hat die BGR bereits 1995 veröffentlicht [5] und 2007 durch eine weitere Studie zur Bewertung von Tongesteinsformationen unter Berücksichtigung der wichtigsten Empfehlungen des AkEnd ergänzt [6] und mit [4] eine zusammenfassende Bewertung von Regionen mit potentiell geeigneten Wirtformationen vorgelegt.

In Abbildung 4.2 sind die in den Studien ermittelten Tongesteinsformationen (grün) sowie die bereits in den 1970er bzw. 1980er Jahren diskutierten Salzformationen (blau) ausgewiesen.

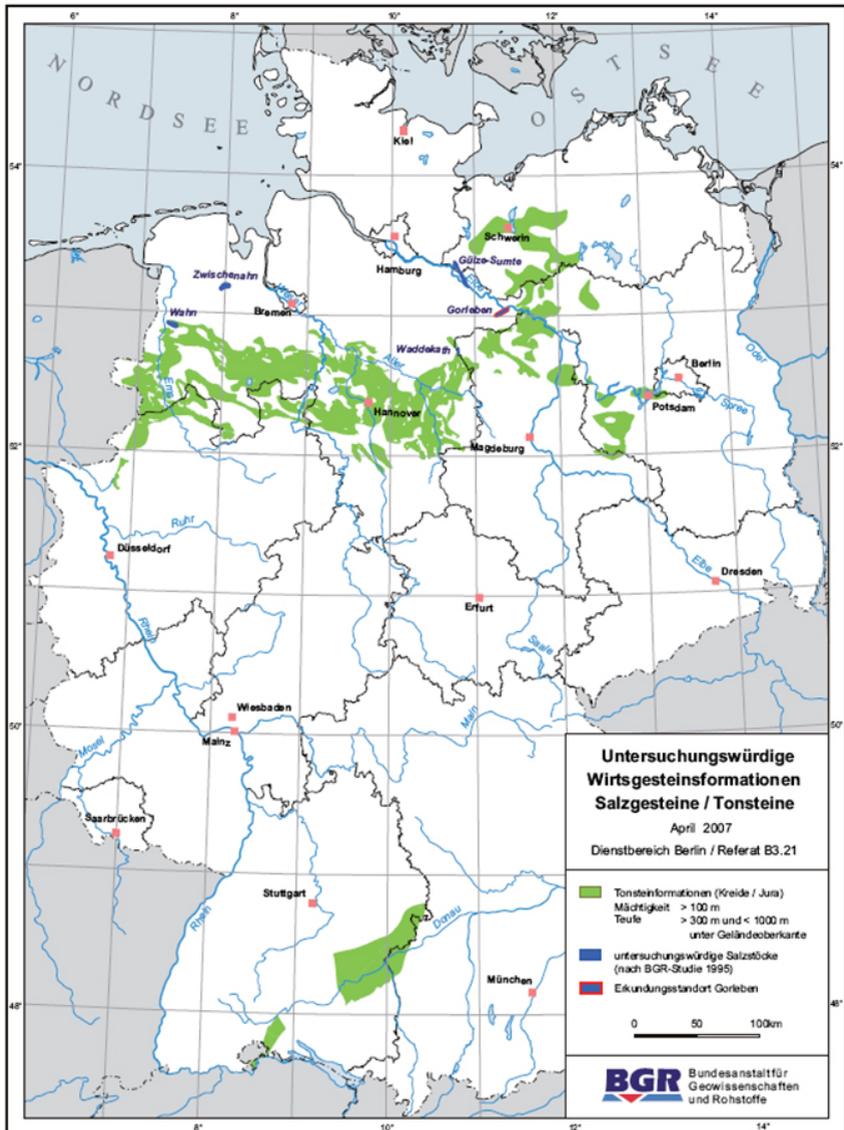


Abbildung 4.2: Teilgebiete mit untersuchungswürdigen geologischen Wirtsgesteinsformationen für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland [4]

4.4 Endlagerstandorte in Deutschland

In Deutschland sind gegenwärtig (neben der Schachanlage Asse II) drei Standorte in der öffentlichen Diskussion über die Endlagerung radioaktiver Abfälle: Das Erkundungsbergwerk Gorleben, die Schachanlage Konrad und das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM). Die nachfolgenden Ausführungen basieren ganz wesentlich auf den Darstellungen dieser Standorte seitens der Deutschen Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE) [7, 8, 9] sowie der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) [10, 11, 12].

4.4.1 Gorleben

Der Salzstock Gorleben wird seit 1979 auf seine Eignung als Wirtsgestein für ein Endlager für alle Arten radioaktiver Abfälle untersucht. Der Salzstock erstreckt sich über eine Länge von rund 14 km und ist ca. 4 km breit. Der Top des Salzstocks (Salzspiegel) liegt ca. 250 m unter der Geländeoberfläche, die Salzbasis zwischen 3.200 m und 3.400 m Teufe. Über einen Zeitraum von über 20 Jahren wurden am Standort Gorleben umfangreiche Untersuchungen zur Erkundung des internen Aufbaus des Salzstocks und seines Deckgebirges durchgeführt.

1983 gab die Bundesregierung ihre Zustimmung zur untertägigen Erkundung des Salzstocks. Im Jahr 2000 wurde in einem zwischen der Bundesregierung und den EVU vereinbarten Moratorium eine Unterbrechung der Erkundung des Salzstocks Gorleben für mindestens drei, höchstens jedoch zehn Jahre vereinbart, um die Klärung konzeptioneller und sicherheitstechnischer Fragestellungen zu ermöglichen. Die Erkundungsarbeiten wurden daraufhin zum 1. Oktober 2000 eingestellt [13].

Das Moratorium zur Erkundung des Salzstocks Gorleben wurde 2010 durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) aufgehoben. In einem mehrstufigen Verfahren soll nun auf der Basis einer Sicherheitsanalyse, eines aktualisierten Endlagerungskonzepts und eines Gutachtens unabhängiger internationaler Wissenschaftler geprüft werden, ob der Standort Gorleben für ein Endlager in Frage kommt. Sollte diese Prüfung positiv ausfallen, soll ein atomrechtliches Planfeststellungsverfahren durchgeführt werden [14].

4.4.2 Morsleben

Das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) ist aus dem Bergwerk der ehemaligen Burbach-Kali AG mit den beiden Schächten Bartens-

leben und Marie hervorgegangen. Die Salzstruktur im Oberen Allertal erstreckt sich über eine Länge von etwa 50 km und durchschnittlich 2 km Breite.

Die Einlagerung radioaktiver Abfälle erfolgte zwischen 1971 und 1998. Im gesamten Einlagerungszeitraum wurden im ERAM insgesamt ca. 36.753 m³ schwach- und mittelradioaktive Abfälle und 6.621 umschlossene Strahlenquellen eingelagert [15]. Die endgelagerte Abfallmenge besitzt eine Gesamtaktivität von $3,8 \times 10^{14}$ Bq (Beta- und Gammastrahler) sowie $2,3 \times 10^{11}$ Bq (Alpha-Strahler) [9].

Seit dem Ende der Einlagerung werden Arbeiten zur Aufrechterhaltung der Standsicherheit des Endlagers durchgeführt. Im Januar 2009 überreichte das BfS die für die Planfeststellung nach § 9b des Atomgesetzes mit der zugehörigen Öffentlichkeitsbeteiligung notwendigen Unterlagen für die Stilllegung (Planunterlagen) dem Umweltministerium des Landes Sachsen-Anhalt als zuständiger Genehmigungsbehörde. Erst nach einem positiven Planfeststellungsbeschluss der Genehmigungsbehörde kann mit der Stilllegung des ERAM begonnen werden. Für die Stilllegungsarbeiten wird eine Dauer zwischen 15 und 20 Jahren veranschlagt [16].

4.4.3 Konrad

Neben Salzformationen sind auch Endlager in anderen Formationen denkbar, wenn die Sicherheitsanforderungen erfüllt werden. Hierzu gehört z.B. in Deutschland das Endlager Konrad für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in einer Eisenerzformation mit einer mächtigen Tonsteinüberdeckung.

Aufgrund der wasserundurchlässigen Tone im Hangenden ist die Grube Konrad sehr trocken. Nach der wirtschaftlich bedingten Einstellung der Eisenerzförderung im Jahr 1976 wurde aufgrund dieser günstigen geologischen Verhältnisse ein umfangreiches geowissenschaftliches Erkundungs- und Untersuchungsprogramm hinsichtlich der Eignung des Bergwerks bzw. der Eisenerzformation als Endlager für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung durchgeführt [17].

Nach einem mehrjährigen Planfeststellungsverfahren liegt seit 2007 für die Schachanlage Konrad ein rechtskräftiger und unanfechtbarer Planfeststellungsbeschluss vor. Nach einer zweijährigen Vorbereitungsphase und einem Umbau der Schachanlage zu einem Endlager in weiteren vier Jahren wird mit der Einlagerung radioaktiver Abfälle voraussichtlich im Jahr 2019 begonnen.

4.5 Endlagerforschung in Deutschland

4.5.1 Forschungsbergwerk Asse

Nach der frühzeitigen Festlegung auf Steinsalz als Wirtsgestein für die Endlagerung radioaktiver Abfälle erwarb am 12. März 1965 die damalige Gesellschaft für Strahlenforschung (GSF) (heute: Helmholtz Zentrum München, Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt, HMGU) im Auftrag des Bundes das Salzbergwerk Asse und am 1. Juni 1965 wurde das Institut für Tief Lagerung (IfT) zur Durchführung von Forschungen auf dem Gebiet der Tief Lagerung radioaktiver Abfälle, insbesondere zur Eignung von Steinsalz als Wirtsgestein und zur Erprobung von Einlagerungstechniken gegründet. Zuvor war die Salzgewinnung, die 1909 mit dem Abbau von Carnallitit begonnen worden war, im Jahre 1964 eingestellt worden.

Im Rahmen dieser FuE-Arbeiten, die vorrangig der Entwicklung von Handhabungstechniken und Einlagerungsmethoden gewidmet waren, wurden zwischen dem 4. April 1967 und dem 31. Dezember 1978 insgesamt 124.494 Abfallbehälter mit schwachradioaktiven Abfällen sowie 1.293 Fässer mit mittelradioaktiven Abfällen eingelagert. Die rechtlichen Grundlagen für die Einlagerung bildeten das Atomgesetz (AtG) [18] und die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV – „Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen“ [19]). Die befristeten Genehmigungen für die Versuchseinlagerung radioaktiver Abfälle liefen 1977/78 aus. Eine Rückholung der Abfälle war nicht vorgesehen.

Die FuE-Arbeiten konzentrierten sich in den Folgejahren auf Fragen der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Im Mittelpunkt dieser Arbeiten standen die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Abfällen und Wirtsgestein unter Einfluss von Wärme und Strahlung sowie die Entwicklung von Einlagerungs-, Verfüll- und Verschlusstechniken. Da die Schachtanlage Asse nie als Endlager für hochradioaktive Abfälle vorgesehen war, hatten die Forschungsarbeiten ausschließlich generischen Charakter unter endlagerrelevanten Randbedingungen.

Im Frühjahr 1992 entschied der Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT), die FuE-Arbeiten in der Schachtanlage Asse nicht weiter zu fördern. Daraufhin wurde das GSF-Institut für Tief Lagerung 1995 aufgelöst, wobei das Bergwerk Asse zunächst in der Zuständigkeit der GSF verblieb. Nach der Beendigung der meisten Großversuche wurde das Bergwerk seit Mitte der 1990er Jahre für seine Schließung nach Bundesberggesetz [20] vorbereitet.

Der hohe Durchbauungsgrad infolge des Salzabbaus hat in den nicht verfüllten Grubenbauen und im benachbarten Deckgebirge im Lauf der Zeit zu größeren Verformungen mit Kluftbildungen und ab 1988 schließlich auch zu einem Zutritt von Grundwasser in das Grubengebäude geführt. Die Bundesregierung hat daraufhin 2008 festgestellt, dass die Asse wegen der eingelagerten Abfälle und des damit verbundenen Gefahrenpotenzials verfahrensrechtlich nicht nach Bergrecht, sondern nach dem AtG wie ein Endlager zu behandeln ist. In der Folge hat das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), das für die Endlagerung radioaktiver Abfälle zuständig ist, die Betreiberschaft der Anlage zum 1. Januar 2009 vom Helmholtz Zentrum München übernommen [21].

Mit Blick auf die schnelle und langzeitsichere Schließung der Asse hat das BfS die drei Optionen Vollverfüllung, Umlagerung und Rückholung untersucht und nach einem vorab in der Öffentlichkeit vorgestellten Verfahren miteinander verglichen. Obwohl die Vollverfüllung in vier Beurteilungsfeldern den Rang 1 einnahm, hat das BfS wegen erheblicher Zweifel an der Nachweisbarkeit der Langzeitsicherheit dieser Option die Option „Rückholung aller Abfälle“ als zu bevorzugende Stilllegungsoption eingestuft. Aber auch bei der Rückholung gibt es noch offene Punkte, die die Realisierbarkeit schwieriger als geplant gestalten können [22].

4.5.2 Aktuelle Forschungsschwerpunkte

Die Förderung der anwendungsbezogenen Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle ist Aufgabe des Bundes und erfolgt aktuell auf der Grundlage des „Förderkonzepts 2007–2010“ [23] des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) mit Steuerung durch den Projektträger Karlsruhe-Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE).

Eingebunden in die heutige Endlagerforschung (Abbildung 4.3) sind Sachverständigenorganisationen wie die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Bundesinstitutionen wie die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), nationale Forschungszentren wie das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), das Forschungszentrum Dresden (FZD), das Forschungszentrum Jülich (FZJ), Industrieunternehmen wie die Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE) bzw. deren Tochterunternehmen DBE Technology GmbH sowie Universitäten und Ingenieurbüros.

Das aktuelle Förderkonzept berücksichtigt in seiner Ausrichtung die Ergebnisse der langjährigen nationalen und internationalen, vorrangig

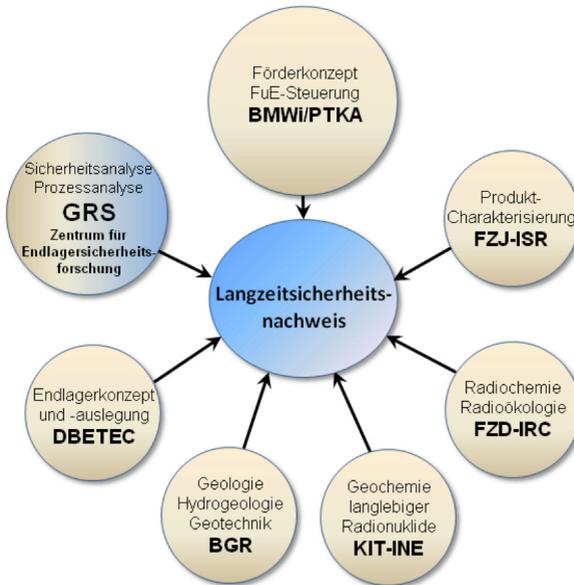


Abbildung 4.3: Beteiligte der Endlagerforschung in Deutschland

durch die Kommission der Europäischen Gemeinschaften (KEG) geförderten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle sowie die institutionell finanzierten FuE-Aktivitäten der nationalen Forschungszentren.

Aktuell stehen insbesondere die Weiterentwicklung bzw. Anpassung sicherheitsanalytischer Methoden und Instrumente an den internationalen Stand von Wissenschaft und Technik sowie die Verbesserung des Verständnisses der in Endlagersystemen ablaufenden Prozesse im Fokus der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Ein wesentliches Element hierbei ist die Weiterentwicklung von Modellen, die eine vertiefte Untersuchung der komplexen Wechselwirkungen zwischen thermischen, hydraulischen, mechanischen und chemischen Prozessen in einem potenziellen Endlager erlauben.

Ergänzend dazu werden Computer-Codes entwickelt, mit denen diese Prozessabläufe sowohl für den interessierten Laien als auch den forschenden Wissenschaftler visualisiert und damit besser verständlich gemacht werden können.

4.5.3 Langzeitsicherheitsanalyse

Zur Bewertung der Langzeitsicherheit eines Endlagers werden spezielle numerische Codes entwickelt, mit denen es möglich ist, die komplexen gekoppelten Prozesse im Endlagersystem (vgl. Prozessanalyse unten) in einer integrierten Analyse adäquat zu berücksichtigen. Die Führung des Langzeitsicherheitsnachweises wird dabei durch die regulatorischen Anforderungen bestimmt und erfolgt unter Berücksichtigung des internationalen Vorgehens.

Die sicherheitsanalytischen Rechenmodule des integrierten Programmsystems EMOS zur Bewertung von Endlagern in verschiedenen Wirtsgesteinen (Abbildung 4.4) wurden in den zurückliegenden Jahren maßgeblich von der GRS entwickelt. Für Konzepte zur Endlagerung im Salz sind die Module hinsichtlich der berücksichtigten Prozesse bereits recht umfassend und ausgereift, wogegen zu den Tonformationen noch Erweiterungen unter Berücksichtigung einer Reihe von Einzelprozessen in der Bearbeitung sind.

Die Ergebnisse sicherheitsanalytischer Modellrechnungen werden in der Regel als Graphen dargestellt, in denen die potenzielle jährliche Strahlenexposition in der Biosphäre über der Zeit nuklidspezifisch sowie als Summenkurve aufgetragen ist (Abbildung 4.5). Endlager müssen dabei die aktuellen gesetzlichen Grenzwerte gem. AtG (aktuell 3×10^{-4} Sv/Jahr) immer zu allen Zeiten unterschreiten.

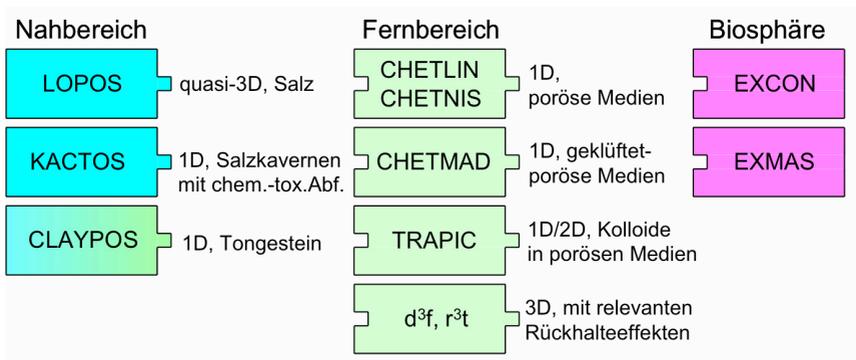


Abbildung 4.4: Module des integrierten Programmsystems EMOS [24]

Nachdem früher in der Regel Störfallsituationen analysiert wurden (vgl. Abbildung 4.5), steht bei der Sicherheitsanalyse heute der Nachweis des sicheren Einschlusses im Vordergrund. Dieses soll in der Weise ge-

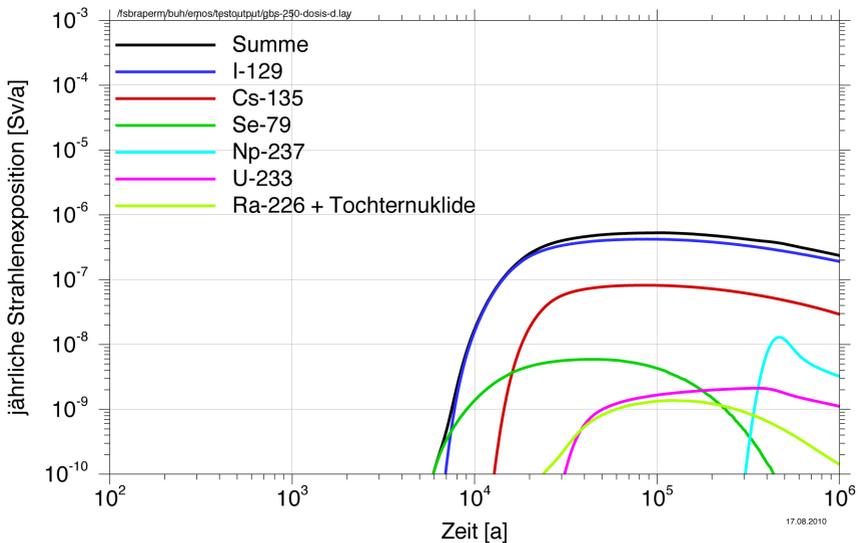


Abbildung 4.5: Strahlenexposition am Standort eines Endlagers im Salz nach einem potenziellen Lösungszutritt [25]

schehen, indem numerisch nachgewiesen wird, dass bereits am Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches im tiefen geologischen Untergrund eine mögliche Radionuklidfreisetzung unterhalb regulatorisch festgelegter Grenzwerte liegt [3].

Aus diesem Grunde haben in der aktuellen Endlagerforschung der Nachweis der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches und der langzeitsicheren Funktion der das Endlager verschließenden geotechnischen Barrieren (vgl. Kap. 4.2) Priorität.

4.5.4 Prozessanalyse

Für die hinreichende Bewertung der Funktion der Barrieren ist ein fundiertes Verständnis der im Endlager ablaufenden Prozesse und von deren Wirkungen auf die Barrieren von hoher Bedeutung. Während der Errichtung und des Betriebes des Endlagers werden Auffahrungen (Kammern, Strecken, Bohrlöcher) vorgenommen, die Abfälle eingelagert, Resthohlräume versetzt sowie Barrieren wie Damm- und Verschlussbauwerke gebaut. Die während der Bau-, Betriebs- und Stilllegungsphase initiierten thermi-

schen, hydraulischen, geomechanischen und geochemischen Prozesse sind Ausgangsbasis für die weitere Entwicklung des Endlagersystems in der Nachbetriebsphase und bestimmen im Zusammenspiel dessen langzeitliche Sicherheit.

Im Sinne des sicheren Einschlusses richten sich die aktuellen FuE-Arbeiten auf die Vertiefung des Verständnisses der komplexen Abläufe im Endlagersystem sowie die Bereitstellung der entsprechenden Werkzeuge für die prädiktive Simulation dieser Prozesse und die Bereitstellung der Forschungsergebnisse für die Weiterentwicklung der sicherheitsanalytischen Instrumente aus.

So wurde in den Jahren 2007 bis 2009, von der KEG gefördert, insbesondere die Langzeitentwicklung (*Entstehung und Rückbildung*) von Auflockerungszonen untersucht, die sich nach der Auffahrung der Hohlräume an deren Rändern ausbilden und die das Dichtvermögen nachträglich installierter Verschlussysteme signifikant beeinträchtigen können.

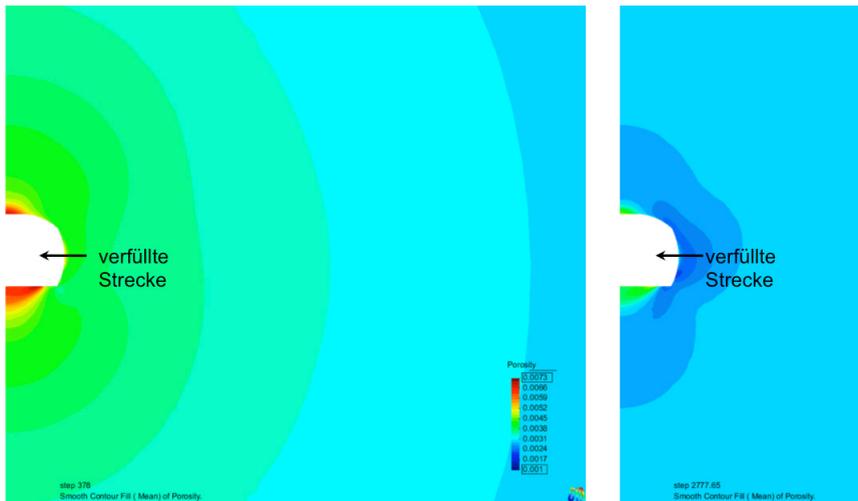


Abbildung 4.6: Rückbildung der Auflockerungszone um eine verfüllte Strecke

Abbildung 4.6 zeigt beispielhaft die Ergebnisse einer Modellierung der Rückbildung der Auflockerungszone nach Einbringung eines Streckenverschlusses. Dargestellt ist die Porosität des umgebenden Steinsalzes (Farbskala 0.1 % (blau) – 0.73 % (rot)), links unmittelbar nach Nachschnitt

der Streckenkontur und Einbau eines Betonverschlusses, rechts 200 Jahre später, wenn die Rückbildung weitgehend abgeschlossen ist.

Wie sich eine potentielle Schadstoffausbreitung aus dem Endlager darstellt, ist aber nicht nur eine Frage des Dichtvermögens des Wirtsgesteins und der installierten Barrieren, sondern auch der Mobilität der eingelagerten Radionuklide, die wiederum weitgehend durch chemische Prozesse bestimmt wird. Die aktuelle geochemische Endlagerforschung befasst sich vorrangig mit der Untersuchung und der modellhaften Beschreibung der Wechselwirkungen, die bei einem unterstellten Wasserzutritt im Nahfeld eines Endlagers zwischen der geologischen Barriere, den technischen Barrieren und den Abfällen zu betrachten sind.

Vorraussetzung für die richtige Beschreibung dieser Prozesse ist eine geeignete, vollständige und in sich konsistente thermodynamische Datenbasis. Eine solche Datenbasis, die auf die speziellen Bedürfnisse der Endlagerung zugeschnitten ist, wird zur Zeit in einem Verbundprojekt von GRS, KIT, FZ Dresden-Rossendorf, der TU Bergakademie Freiberg und der Schweizer Firma Colenco erarbeitet [26].

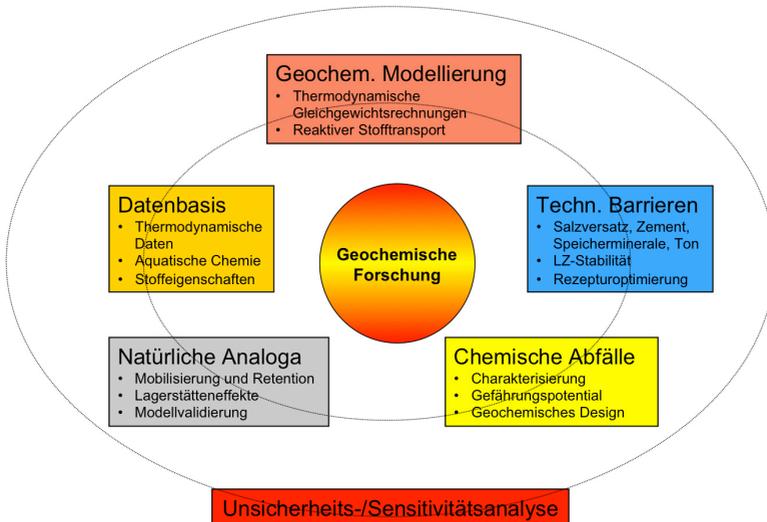


Abbildung 4.7: Schwerpunkte der geochemischen Endlagerarbeiten

Abbildung 4.7 illustriert die Schwerpunkte der heutigen geochemischen Endlagerforschung. Ganz oben steht hierbei die Entwicklung der Werkzeuge für die Modellierung der geochemischen Prozesse. Abgesichert

werden die Modellrechnungen durch Laborexperimente. Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen erlauben weitere Rückschlüsse auf die Belastbarkeit von Prognoserechnungen.

4.5.5 Forschung und Entwicklung in Untertagelabors

In den mit der Endlagerung befassten Ländern sind Untertagelabors (engl. Underground Research Laboratories, URL) integrale Bestandteile der jeweiligen nationalen Entsorgungsprogramme. Ziel dieser URL ist es, die zum Nachweis der sicheren Endlagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen erforderlichen Kenntnisse durch Feldversuche in repräsentativer Umgebung abzusichern sowie Endlagertechniken zu entwickeln und ihren funktionsgerechten Einsatz zu erproben (Abbildung 4.8).



Abbildung 4.8: Erprobung eines Einlagerungssystems für hochradioaktive Abfälle [27]

Bei der Errichtung eines Endlagers in einer Salzformation kann auf langjährige Erfahrung aus dem konventionellen Gewinnungsbergbau zurückgegriffen werden. Bei der technischen Umsetzung eines Endlagerkon-

zepts müssen dagegen weitergehende Anforderungen berücksichtigt werden.

Diese umfassen die Entwicklung endlagerspezifischer Komponenten und neuer Technologien, insbesondere bei der schonenden Erstellung von Endlagerhohlräumen und der Auslegung von Verschlussbauwerken sowie spezielle Techniken zur Stilllegung. Diese Entwicklungen können in einem URL getestet und ihre Funktionsfähigkeit demonstriert werden.

Durch Feldversuche in den Untertagelabors wird das Vertrauen in die zum Nachweis der Langzeitsicherheit erforderlichen Modelle - konzeptuell und numerisch - gestärkt und deren Anwendbarkeit überprüft und demonstriert.

4.6 Endlagerforschung international

Die Verfolgung internationaler Entwicklungen ist eine der wichtigsten Rahmenbedingung für eine erfolgreiche Ausrichtung der nationalen Endlagersicherheitsforschung. Wichtige Komponenten sind hierbei die Absicherung eigener Forschungs- und Entwicklungsergebnisse durch die Mitarbeit in internationalen Gremien, wie z.B. der OECD-Nuclear Energy Agency (NEA) oder der International Atomic Energy Agency (IAEA), die auf der Grundlage internationaler Forschungsergebnisse und Erfahrungen Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (z.B. [28]) entwickeln. Für die meisten Mitgliedsstaaten sind diese Regelwerke verpflichtend und finden entsprechende Berücksichtigung in der nationalen Gesetzgebung. Nationen, in denen die Endlagerprogramme noch am Anfang stehen, profitieren insbesondere von den internationalen Entwicklungen.

Die Beteiligung an internationalen Projekten und die damit verbundene Vernetzung mit international und national renommierten Forschungseinrichtungen stellen darüber hinaus sicher, dass eigene Sicherheitsanforderungen und -erkenntnisse international wahrgenommen werden und andererseits wichtige internationale Entwicklungen im eigenen Umfeld nicht übersehen werden. In Europa hat vor diesem Hintergrund die Beteiligung an internationalen Verbundprojekten der Europäischen Kommission (KEG) einen besonders hohen Stellenwert.

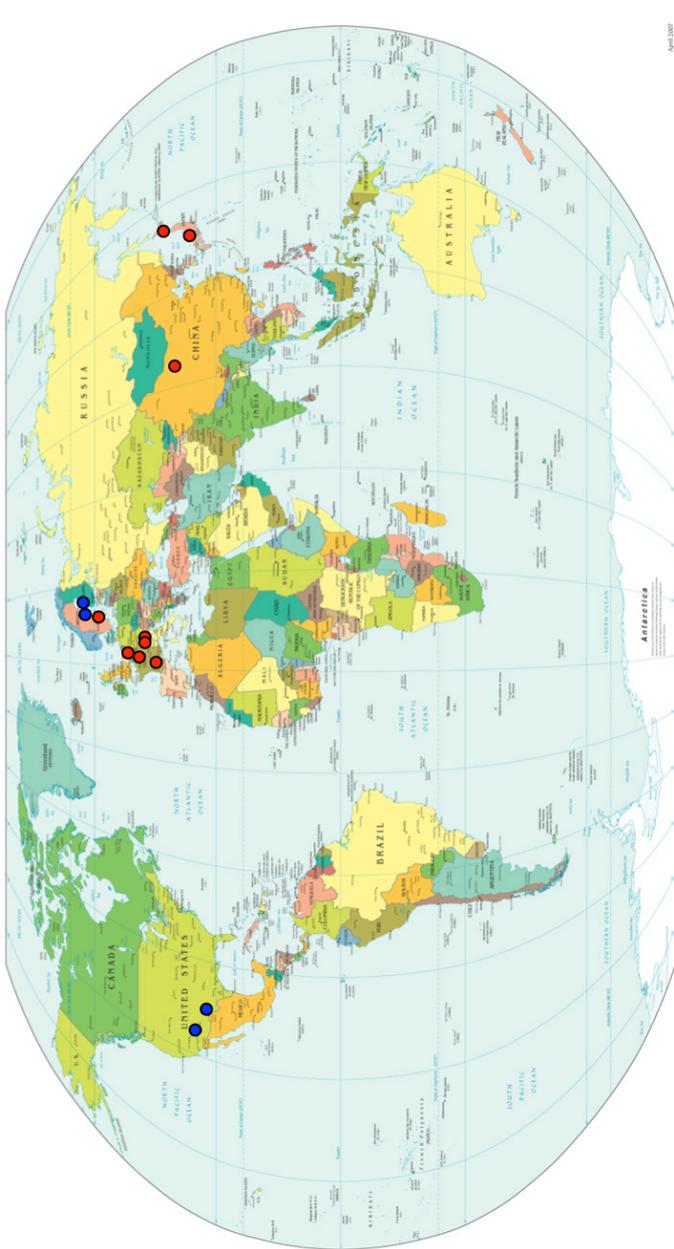


Abbildung 4.9: Die wichtigsten Endlagerprojekte (blau markiert) und Untertagelabors (rot markiert) weltweit

Die Entwicklung und Anwendung von Methoden und Verfahren zur Führung bzw. zur Untermuerung des Langzeitsicherheitsnachweises für Endlager radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen stand in den letzten Jahren im Vordergrund des 6. und 7. Rahmenprogramms der KEG. Hierbei wurden Fragen der Verbesserung und Harmonisierung der Methoden und Werkzeuge für den Langzeitsicherheitsnachweis (Projekt PAMINA) sowie der Verbesserung des Verständnisses der im Endlager ablaufenden Prozesse zur Absicherung der in den Sicherheitsanalysen eingesetzten Modelle vorrangig behandelt (z.B. Projekte NF-Pro, FUNMIG, Theresa und ReCosy).

Hinzu kamen in jüngerer Zeit auf Wunsch der KEG insbesondere auch Projekte, die sich mit der Entwicklung, Erprobung und Demonstration der erforderlichen technischen Einrichtungen für den Betrieb und den langzeit-sicheren Verschluss von Endlagern befassten. Hier ist besonders das Integrierte Projekt ESDRED (Engineering Studies and Demonstration of Repository Designs) zu nennen, in dessen Rahmen die Funktionstüchtigkeit prototypischer Einlagerungs- und Verschlussysteme demonstriert wurde.

Einige Arbeiten des Projektes ESDRED wurden in Untertagelabors in verschiedenen geologischen Formationen betrieben, z.B. im schweizerischen URL Mont Terri und im schwedischen URL Äspö. Letzteres ist ein Untertagelabor im Granit, der über die in Deutschland betrachteten Wirtsgesteine Salz und Ton hinaus international auch als geeignetes Wirtsgestein angesehen und untersucht wird.

Abbildung 4.9 zeigt eine Weltkarte mit den zur Zeit aktiven Untertagelabors und konkret verfolgten Endlagerprojekten in verschiedenen Wirtsgesteinsformationen. Der Tabelle 4.1 können die jeweiligen Wirtsgesteinsformationen entnommen werden.

4.7 Ausblick

Nach über 40 Jahren FuE zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in Steinsalzformationen in Deutschland sind die Grundlagen für den Einstieg in ein Genehmigungsverfahren für ein Endlager vorhanden. Die GRS und das Ökoinstitut haben im Auftrag des BMWi die entsprechenden Erkenntnisse in dem Bericht „Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland“ umfassend dargestellt [2].

Nach den im September 2010 vom BMU veröffentlichten Sicherheitsanforderungen [29] werden sich die Maßnahmen zur geologischen Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle von der Standortfestlegung des Endlagers bis zum Ende seiner Stilllegung über einen Zeitraum von

Tabelle 4.1: Übersicht aktiver Untertagelabors und Endlagerprojekte weltweit

<i>Land</i>	<i>Untertagelabor-Standort</i>	<i>Wirtsformation</i>
Frankreich	Bure	Tonstein
Frankreich	Tournemire	Tonstein
Schweiz	Mont Terri	Tonstein
Belgien	Mol	plastischer Ton
Schweiz	Grimsel	Granit
Schweden	Äspö	Granit
Finnland	Onkalo	Granit
Japan	Mitzunami	Granit
China	Beishan (in der Erkundung)	Granit
Japan	Honorobe	Sedimentgestein
<i>Endlagerprojekte</i>		
USA	WIPP (genehmigt)	Salz
Schweden	Forsmark (Genehmigungsantrag eingereicht)	Granit
Finnland	Onkalo (Standortuntersuchungen laufen)	Granit

mehreren Jahrzehnten erstrecken. Daher muss dem in diesem Zeitraum zunehmenden Kenntnisgewinn und der Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik Rechnung getragen werden.

Dies bedeutet, dass im Genehmigungsverfahren die Einbindung begleitender FuE-Arbeiten (auch nach dem Planfeststellungsbeschluss) mindestens bis zum langzeitsicheren Verschluss des Endlagers zu regeln ist. Dabei stehen nachfolgende Arbeiten im Fokus:

- Ausrichtung des FuE-Bedarfs an den Erfordernissen des Langzeitsicherheitsnachweises mit der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Methoden und Verfahren der Sicherheitsanalyse.
- Periodische Sicherheitsbewertungen auf Grundlage der weiter entwickelten Methoden und Werkzeuge sowie jeweils der Nachweis, dass die ehemals gezogenen Schlüsse richtig waren und durch die aktuellen Erkenntnisse bestätigt werden.

Die hierfür durchzuführenden Forschungsarbeiten sind soweit wie möglich in internationale Projekte einzubetten. Diese Einbindung erhöht die Transparenz der nationalen Vorgehensweise und stellt ein unverzichtbares Element für deren wissenschaftliche Absicherung dar.

Literatur

- [1] OECD-Nuclear Energy Agency (NEA), *Moving Forward with Geological Disposal of Radioactive Waste. A Collective Statement by the NEA Radioactive Waste Management Committee (RWMC)*. NEA No. 6433. Paris: NEA, 2008.
- [2] T. Brasser, J. Droste, I. Müller-Lyda, J. M. Neles, M. Sailer, G. Schmidt, and M. Steinhoff, *Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland. Projektleitung: Dr. Ingo Müller-Lyda (GRS mbH) und Michael Sailer (Öko-Institut e.V.). Hauptband, GRS-247*. Köln: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), September 2008.
- [3] Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), “Auswahlverfahren für Endlagerstandorte.” www.bfs.de/de/endlager/faq/langfassung_abschlussbericht_akend.pdf, Dezember 2002.
- [4] BGR, *Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland. Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)*. Hannover/Berlin: BGR, April 2007.

- [5] F. Kockel and P. Krull, *Endlagerung stark Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Salzformationen. Bericht Archiv-Nr. 111089*. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 1995.
- [6] P. Hoth, H. Wirth, K. Reinhold, V. Bräuer, P. Krull, and H. Feldrappe, *Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. Bericht*. April 2007.
- [7] DBE, “Erkundungsbergwerk Gorleben. Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE).” <http://www.dbe.de/de/betriebe/gorleben/1/index.php>.
- [8] DBE, “Schachanlage Konrad (Salzgitter). Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE).” <http://www.dbe.de/de/betriebe/konrad/1/index.php>.
- [9] DBE, “Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM). Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE).” <http://www.dbe.de/de/betriebe/morsleben/1/index.php>.
- [10] BGR, “Erkundungsstandort Gorleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).” http://www.bgr.bund.de/nn_329652/DE/Themen/Geotechnik/Endlagerstandorte/Gorleben/gorleben__inhalt.html.
- [11] BGR, “Schachanlage Konrad. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).” http://www.bgr.bund.de/nn_329652/DE/Themen/Geotechnik/Endlagerstandorte/Konrad/konrad__inhalt.html.
- [12] BGR, “Morsleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).” http://www.bgr.bund.de/nn_329652/DE/Themen/Geotechnik/Endlagerstandorte/Morsleben/morsleben__inhalt.html.
- [13] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), “Endlagerung radioaktiver Abfälle als nationale Aufgabe.” http://www.bfs.de/de/bfs/druck/broschueren/Endlagerung_national.pdf, 2005. Elektronischer Zugang existiert nicht mehr.
- [14] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), “Pressemitteilung Nr. 037/10 (Berlin, 15.03.2010).” <http://www.bmu.de>

www.bmu.de/pressemitteilungen/aktuelle_pressemitteilungen/pm/45767.php, 2010.

- [15] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), “ERAM - Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben.” http://www.bfs.de/de/endlager/endlager_morsleben/morsleben_artikel.html.
- [16] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), “Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) - Update (Einlegeblatt zur Broschüre „Endlager Morsleben“).” <http://www.bfs.de/de/bfs/druck/broschueren/Einlegeblatt.pdf>, September 2005.
- [17] W. Brewitz (Redaktion), *Eignungsprüfung der Schachtanlage Konrad für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Abschlussbericht (GSF - T 136) / Ges. für Strahlen- u. Umweltforschung mbH (GSF), Inst. für Tief Lagerung in Zusammenarbeit mit Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Inst. für Nukleare Entsorgungstechnik. (Ausgeführt im Auftr. d. Bundesministers für Forschung u. Technologie, Förderungskennzeichen KWA 1324 6)*. Neuherberg: GSF, 1982.
- [18] “Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz - AtG) i. d. F. der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), zuletzt geändert durch Artikel 4 des Gesetzes vom 26. Februar 2008 (BGBl. I S. 215).”, 2008.
- [19] “Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714, (2002, 1459)), zuletzt geändert durch Artikel 3 § 15 Nr. 1 und 2 des Gesetzes vom 13. Dezember 2007 (BGBl. I S. 2930).”, 2007.
- [20] “Bundesberggesetz (BBergG) vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), zuletzt geändert durch Artikel 11 des Gesetzes vom 9. Dezember 2006 (BGBl. I S. 2833).”, 2006.
- [21] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), “Vom Salzbergwerk zum Atomlager. Die wechselvolle Geschichte der Schachtanlage Asse II.” http://www.endlager-asse.de/cln_137/DE/2_WasIst/B_Geschichte/_node.html, 22.03.2011.
- [22] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), “Schachtanlage Asse II.” http://www.bmu.de/atomenergie_ver_und_entsorgung/endlagerung/asse/doc/40319.php, Februar 2011.

- [23] Forschungszentrum Karlsruhe, “Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (2007 – 2010). Förderkonzept des Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe - Wassertechnologie und Entsorgung,” Dezember 2007.
- [24] R. Storck, D. Buhmann, R. P. Hirsekorn, T. Kühle, and L. Lührmann, *Das Programmpaket EMOS zur Analyse der Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle. Version 5. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-122*. 1996.
- [25] J. Brenner, D. Buhmann, and T. Kühle, *Einfluss netzwerkartiger Strukturen der Gruben Hohlräume auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers im Salinar. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH*. 2000.
- [26] S. Gester, M. Altmaier, V. Brendler, S. Hagemann, H. Herbert, C. Marquardt, H. C. Moog, V. Neck, A. Richter, W. Voigt, and S. Wilhelm, “THEREDA – Thermodynamic Reference Database for Nuclear Waste Disposal in Germany, Proceedings der IHLRWM Konferenz, 7.-11. September 2008, Las Vegas,” 2008.
- [27] T. Rothfuchs (Redaktion), *Test disposal of highly radioactive radiation sources in the Asse salt mine. Final report. Commission of the European Communities. Nuclear science and technology. EUR 16688 EN*. Neuberberg: GSF, 1995.
- [28] International Atomic Energy Agency (IAEA), “IAEA Safety Standards, Geological Disposal of Radioactive Waste, Safety Requirements No. WS-R-4,” 2006.
- [29] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), “Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Stand 30.09.2010.” http://www.bmu.de/atomenergie_ver_und_entsorgung/downloads/doc/42047.php.