

Sicherheitstechnische Einzelfragen zur Endlagerung

INHALT

1.	Einleitung	2
2.	Zu klärende sicherheitstechnische Einzelfragen	2
2.1	Isolations- und Nachweiszeitraum	3
2.2	Rückholbarkeit/Revision der Sicherheitsbewertung	3
2.3	Menschliche Einwirkungen	5
2.4	Kritikalität/direkte Endlagerung	5
2.5	Gasentwicklung	6
2.6	Chemotoxische Bestandteile der Abfallmatrix/-verpackung	7
2.7	Naturbeobachtungen	8
2.8	Schutzziele und Sicherheitsindikatoren	8
2.9	Modellrechnungen	9
2.10	Geochemische Prozesse	10
2.11	Safeguards	10
2.12	Mehrbarrierenkonzept	11
2.13	Wirtsgesteine im Vergleich	11
3.	Vorgehen zur Klärung der Einzelfragen	11
4.	Zusammenfassung	12
5.	Literatur	13
	Anlagen	15

1. Einleitung

Im Nachgang zu der Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen von 14. Juni 2000 [1] ist die weitere Erkundung des Salzstockes Gorleben am 1. Oktober 2000 zur Klärung konzeptioneller und sicherheitstechnischer Fragestellungen durch ein Moratorium unterbrochen worden. Um zu einer einheitlichen wissenschaftlich-technischen Bewertung endlagerrelevanter Sachverhalte zu kommen, sind zunächst konzeptionelle Fragen zu klären. Ihre Beantwortung erst liefert den Maßstab für die Bewertung.

Obwohl einzelne Aspekte vom Grundsatz her schon seit geraumer Zeit bekannt sind, hat sich insbesondere im Rahmen der internationalen Diskussion ein Stand herausgebildet, der auch in Deutschland zu beachten ist. Er weicht in wesentlichen Punkten von der bisher in Deutschland vorherrschenden Bewertungsgrundlage ab, die sich an den 1983 veröffentlichten BMI/RSK-Kriterien [2] orientiert. Einzelne Aspekte sind z. B. auch schon in die Planung des Endlagers Konrad eingeflossen und müssen ebenfalls bei der Beurteilung und Planung von Gorleben berücksichtigt werden.

Eine allgemeine Darstellung des aktuellen Diskussionsstandes enthält z. B. die vom National Research Council (USA) herausgegebene Unterlage [3]. Die zunehmende Konkretisierung der Entsorgungsplanung und standortspezifischer Erkenntnisse hat in vielen Ländern zu einer Entwicklung geführt, die sich in den hier zitierten Publikationen widerspiegelt. So weisen jüngste Arbeitsergebnisse, beispielsweise des Radioactive Waste Management Committee (RWMC) der OECD/NEA zur Sicherheit der Endlagerung und zum methodischen Vorgehen ([4], [5]) aus, dass es nunmehr eines iterativen Vorgehens bedarf, um Langzeitsicherheitsfragen zweifelsfrei zu klären. Genannte Methoden hierzu sind die Durchführung von System- bzw. Sicherheitsanalysen (Performance Assessment, Integrated Performance Assessment, Multi Attribute Analysis).

In jüngster Zeit werden verstärkt Fragen wie Rückholbarkeit, Verwendung von Sicherheitsindikatoren und Zeitrahmen diskutiert. Auch enthält eine von der Kommission der Europäischen Gemeinschaften 1999 vorgelegte Mitteilung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle [6] ein umfangreiches Kapitel zu Sicherheitsaspekten der Endlagerung. Dabei wird besonders auf die Einschätzung des Langzeitverhaltens von Endlagern, die Rückholbarkeit, menschliches Einwirken und die institutionelle Kontrolle von Endlagern eingegangen. Eine Arbeitsgruppe der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) zu Grundfragen und -kriterien der Endlagerung radioaktiver Abfälle befasst sich u. a. mit der Definition von Bevölkerungsgruppen, die einer hohen Strahlenexposition ausgesetzt sind (kritische Gruppen), zukünftiger Biosphären sowie der Einbeziehung der Möglichkeit menschlichen Einwirkens auf ein Endlager [7]. Hinzu kommen neue wissenschaftliche Erkenntnisse - u. a. aus den Sicherheitsbetrachtungen für das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben - die für den Standort Gorleben als Endlager für alle Arten radioaktiver Abfälle unmittelbar von Bedeutung sind, auf die z. B. in einer aktuellen Darstellung der internationalen Entwicklung [8] hingewiesen wird.

2. Zu klärende sicherheitstechnische Einzelfragen

Die einleitend genannten Erkenntnisse, Entwicklungen und Bewertungen stellen den Hintergrund für die in der Vereinbarung vom 14. Juni 2000 – Anlage IV – summarisch beschriebenen Zweifelsfragen zum Endlagerprojekt Gorleben dar. Die im Folgenden dargestellten Fragestellungen gelten grundsätzlich für alle denkbaren Wirtsgesteine und sollen daher nach Möglichkeit wirtsgesteinsunabhängig geklärt werden. Ihre Beantwortung wird damit auch die Grundlage zur Beurteilung des Salzstockes Gorleben im Hinblick auf seine

Eignung als Endlager für alle Arten radioaktiver Abfälle bilden. I. w. sind die nachfolgend in Abschnitt 2.1 bis 2.13 genannten Fragestellungen zu bearbeiten:

2.1 Isolations- und Nachweiszeitraum

Die Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) und die Strahlenschutzkommission (SSK) empfehlen in ihrer gemeinsamen Stellungnahme von 1988, „dass der zu fordernde Nachweis der Sicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle durch eine Sicherheitsanalyse für den Zeitraum von etwa 10.000 Jahren zu führen ist. ... Betrachtungen der geologischen Gegebenheiten für Zeiträume jenseits von 10.000 Jahren können jedoch dazu dienen, das Isolationspotential der Endlagerformation standortspezifisch zu prognostizieren“ [9]. Es bleibt demzufolge offen, wie mit dem Zeitraum jenseits von 10.000 Jahren zu verfahren ist. In der internationalen Literatur, in Empfehlungen und Publikationen wissenschaftlicher Gremien (National Academy of Science/USA) und internationaler Organisationen (IAEA) werden heute Nachweiszeiträume von etwa 1 Million Jahre diskutiert. In einem Endlager ist die lokale Konzentration langlebiger Radionuklide, insbesondere von U-238, selbst nach dieser Zeit höher als in natürlichen Lagerstätten, so dass sich von daher ein höheres Gefährdungspotential ergibt. Weiter würden abgebrannte Brennelemente auch nach mehr als 1 Million Jahre aufgrund der von ihnen ausgehenden Photonen-Ortsdosisleistung (10^{-3} Sv/h bis 10^{-4} Sv/h in 1 m Abstand vom Brennelement) eine erhebliche Gefahr darstellen, falls sie ganz oder teilweise wieder in die Biosphäre gelangen. Wissenschaftler weisen heute darauf hin, dass ein strenger Langzeitsicherheitsnachweis nicht bis zu dem Zeitpunkt geführt werden kann, zu dem die radioaktiven Abfälle keine Gefahr mehr darstellen [10]; dieser Zeitpunkt kann jenseits von mehreren zehn Millionen Jahren liegen. Bei Zeiträumen im Bereich mehrerer Millionen Jahre und darüber sind Veränderungen in der Erdkruste nicht mehr sicher prognostizierbar: So kam es in einem Zeitraum von 10 bis 50 Millionen Jahren in der Vergangenheit zur Entstehung der Alpen und des Oberrheintalgrabens sowie zur Erweiterung des Atlantiks. Das norddeutsche Flachland wurde in diesem Zeitraum mehrfach vom Meer überflutet. Offensichtlich werden daher Prognosen zur Standortentwicklung für Zeitbereiche von Zehnermillionen Jahren und darüber spekulativ.

Es wird international als offene Frage gesehen, ob und wie Sicherheitsnachweise für derart lange Zeiträume geführt werden können, die die Grenze der Prognostizierbarkeit charakteristischer geologischer Merkmale überschreiten. Internationales Verständnis zwischen den mit der Endlagerung befassten Wissenschaftlern ist, dass ein Standort eine wissenschaftlich fundierte Prognose der zukünftigen geologischen Entwicklung für einen Zeitraum von ca. 1 Mio. Jahren ermöglichen muss. Weiterhin wird gefordert, dass auch über diesen Zeitraum hinaus plausible sicherheitsrelevante Aussagen möglich sein sollen, z. B. durch Vergleich der Radionuklidkonzentration mit natürlichen Systemen [11]. Trotz des vorstehenden Sachverhalts ist es sinnvoll, den Zeitraum für einen Endlagerstandort zu ermitteln, für den die Standortentwicklung des tieferen Untergrundes prognostizierbar ist. Dieser Zeitraum kann für verschiedene Standorte und Wirtsgesteine unterschiedlich sein und stellt eine Bewertungsgröße eines Endlagers dar. Für den Standort Gorleben sind diesbezügliche Arbeiten bereits initiiert worden, die im Rahmen allgemeinerer Arbeiten zur Szenarienermittlung und -analyse sowie zur Erdbebensicherheit durchgeführt werden. Für andere Wirtsgesteine werden diesbezügliche Arbeiten vorbereitet.

2.2 Rückholbarkeit/Revision der Sicherheitsbewertung

Die Rückholbarkeit von radioaktiven Abfällen aus Endlagern nimmt gegenwärtig in der Debatte über die nukleare Entsorgung einen breiten Raum ein. Beispielsweise werden im Entwurf der Umweltverträglichkeitsprüfung (Environmental Impact Statement) vom Juli 1999 des U.S. Department of Energy (DOE) für das am Standort Yucca Mountain geplante

Endlager für die Rückholbarkeit Zeiträume von 50 bis 300 Jahre genannt. Regelungen zur Rückholbarkeit enthält der Code of Federal Regulation (10 CFR60.111) der Nuclear Regulatory Commission. Ein weiteres Beispiel ist die Schweiz. Hier hat die Expertengruppe „Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle in der Schweiz (EKRA)“ Empfehlungen ausgesprochen, die von der NAGRA wie folgt aufgenommen worden sind (vgl. NAGRA News, Mai 2000): „Im Kernenergiegesetz (der Schweiz) ist der neue Vorschlag der EKRA vorgesehen. Im Rahmen der laufenden konkreten Projekte sind deshalb Überwachung, Kontrolle und erleichterte Rückholung zu dokumentieren“. Aktuell wurde diese Thematik von einer 1999 im RWMC der OECD/NEA eingerichteten Arbeitsgruppe bearbeitet, der diesbezügliche Abschlußbericht [12] wurde im September 2001 vorgelegt.

Die Gewährleistung der Rückholbarkeit der Abfälle wird aus Gründen der Förderung der Akzeptanz, der Schaffung der Möglichkeit zu eigenem verantwortlichem Handeln für zukünftige Generationen, der Nachbesserung im Fall der Revision der Sicherheitsbewertungen oder zur Nutzung der in den Brennelementen enthaltenen Ressourcen diskutiert. Insbesondere sind möglicherweise nach heutigem Stand von Wissenschaft und Technik Zweifel an einer jenseits von Millionen von Jahren liegenden langfristigen Sicherheit der Endlagerung nicht vollständig ausräumbar. In diesem Zusammenhang ist auch darauf hinzuweisen, dass parallel zu den Untersuchungen zur direkten geologischen Endlagerung radioaktiver Abfälle mögliche Alternativen wie die vorherige Abtrennung und Transmutation langlebiger Radionuklide aus den Abfällen untersucht werden bzw. worden sind. Obgleich aus heutiger Sicht nicht zu erwarten ist, dass in naher Zukunft erheblich verbesserte Möglichkeiten der Entsorgung gefunden werden, würde eine von vornherein geplante Rückholbarkeit derartigen möglichen Entwicklungen Rechnung tragen [8].

International ist daher nunmehr eine von Anfang an geplante Rückholbarkeit von wärmeentwickelnden Abfällen und insbesondere bei abgebrannten Brennelementen weitgehend Stand der Technik geworden und daher auch im Rahmen der Klärung konzeptioneller Fragestellungen standort- und wirtsgesteinsabhängig zu betrachten [8]. Demgegenüber gehen die bisherigen BMI/RSK-Kriterien von einer Endlagerung ohne Rückholbarkeit aus, für die Betriebsphase eines Endlagers wurde sie sogar ausdrücklich ausgeschlossen. Die Endlagerung wurde daher in Gorleben bisher nicht rückholbar ausgestaltet.

Die Rückholbarkeit von Brennelementen aus einem verschlossenen Endlager vom Typ Gorleben in der Nachbetriebsphase wurde von der DBE im Zusammenhang mit Safeguardsaspekten im Auftrag des BMBF untersucht und das Ergebnis im Februar 1995 im Bericht „Untersuchung der Nichtrückholbarkeit von eingelagertem Kernmaterial in der Nachbetriebsphase eines Endlagers“ vorgelegt. Danach ist die Rückholbarkeit technisch grundsätzlich möglich, wenn die Gebirgstemperatur wieder unter 100 °C gesunken ist. Auch wenn eine Rückholung von Abfällen aus größeren Tiefen - auch aus Salzgesteinen - technisch grundsätzlich zumindest für einen gewissen Zeitraum immer möglich ist, ist sie nach Verschluss des Endlagers bzw. der Einlagerungskammern aus heutiger Sicht unter sicherheitstechnischen Aspekten problematisch, wirtschaftlich kaum realistisch und entspricht u. a. nicht den obengenannten Forderungen.

Zur generellen Klärung dieser Problematik ist beabsichtigt, in einer Studie die technische Machbarkeit der Gewährleistung der Rückholbarkeit der Abfälle für verschiedene Zeiträume und verschiedene Wirtsgesteine zu untersuchen. Hierbei wären auch die Vor- und Nachteile der Rückholbarkeit für die Betriebs- und die Nachbetriebsphase sowie für Safeguardsaspekte darzustellen.

2.3 Menschliche Einwirkungen

Menschliche Einwirkungen auf ein Endlager in der Nachbetriebsphase mit der Konsequenz radiologischer Auswirkungen sind ein international diskutiertes Thema. Unterschieden wird dabei zwischen beabsichtigten und unbeabsichtigten menschlichen Eingriffen. Beabsichtigte Eingriffe liegen in der Verantwortung des Eingreifenden, können nicht verhindert werden und sind daher hinsichtlich der radiologischen Konsequenzen nicht zu bewerten.

Die Möglichkeit unbeabsichtigter Aktionen besteht von dem Zeitraum an, ab dem das Wissen um den Endlagerstandort nicht mehr vorhanden ist. International wird ein Zeitraum von bis zu 1000 Jahren angenommen, bevor dieses Wissen verloren geht.

Bisher bestand in Deutschland mehrheitlich die Auffassung, menschliche Einwirkungen auf ein verschlossenes Endlager im Rahmen der Schadensvorsorge nicht betrachten zu müssen [2]. Die ICRP empfiehlt, standortbezogen plausible typische Szenarien zu betrachten, um die Konsequenzen eines potenziellen menschlichen Eingriffs in das Endlagersystems zu bewerten [7]. Auch die vom BMU beabsichtigte Fortschreibung der Sicherheitskriterien folgt in dem hierfür erstellten GRS-Bericht „Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk, Diskussionsgrundlage“ vom März 2000 dieser Empfehlung.

Es müssen daher angemessene Anstrengungen unternommen werden, um die Wahrscheinlichkeit für einen menschlichen Eingriff zu reduzieren bzw. um die radiologischen Konsequenzen des Eingriffs zu begrenzen, wenn effektive Individualdosen von mehr als 100 mSv/a erwartet werden. Bei jährlichen Dosen unter 10 mSv werden Gegenmaßnahmen in der Regel als nicht gerechtfertigt angesehen.

Salzgesteine sind wirtschaftlich als Rohstoffe und als Speichermedien interessant, z. B. für den Bergbau auf Kalisalze, die Prospektion auf Kohlenwasserstoffe, die Anlage von Kavernen zur Solegewinnung, die Speicherung von Rohstoffen wie Gas oder Rohöl oder die Ablagerung von Abfällen. Eine Bewertung des Gefahrenpotentials künftiger, bei verlorengangenen Wissen ungewollter menschlicher Einwirkungen auf ein Endlager in einem Salzstock könnte daher Salzstöcke - und möglicherweise Salz generell - als potenzielles Wirtsgestein in Frage stellen. Bereits durch Prospektionsbohrungen kann es zu ungewollten menschlichen Einwirkungen kommen. Deshalb ist die Untersuchung und Entwicklung von Konzepten zur Behandlung dieser Szenariengruppe für unterschiedliche Wirtsgesteine notwendig. Aus heutiger Sicht soll das Szenario einer Bohrung und das Szenario einer Kavernensolung für ein Endlager vom Typ Gorleben behandelt werden, entsprechende Szenarien für andere Wirtsgesteine sind noch festzulegen. Zu untersuchen ist auch die Fragestellung, ob sich durch spezielle Elemente der Endlagerauslegung (Anordnung und Größe der Einlagerungsbereiche, Einlagerungstechnik etc.) die Auswirkungen und die Wahrscheinlichkeiten für die genannten Szenarien verringern lassen. Eine weitere Möglichkeit zur Beurteilung der langfristigen Sicherheit des Standortes Gorleben gegenüber menschlichen Eingriffen im Vergleich zu anderen Standorten wäre beispielsweise ein auf probabilistischer Basis durchgeführter Vergleich verschiedener Wirtsgesteine (Risikovergleich).

2.4 Kritikalität/direkte Endlagerung

Während der Betriebsphase eines Endlagers kann die Kritikalitätssicherheit, dem Stand der Technik entsprechend, durch Anforderungen an den Spaltstoffgehalt der Abfallgebinde/Endlagerbehälter, an den Gehalt Neutronen absorbierender Materialien und Anforderungen an die geometrische Anordnung nachgewiesen werden, soweit zusätzlich hinreichende Kontrollmaßnahmen die Einhaltung dieser Anforderungen gewährleisten.

Neben der Kritikalitätssicherheit in der Betriebsphase spielt bei einem Endlager auch die Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase eine Rolle. Die hier auftretenden komplexen

Fragestellungen sind eng verknüpft mit potenziellen Lösungszuflüssen an die eingelagerten Abfälle. Entsprechende Szenarien hängen von den Erkundungsergebnissen eines Endlagerstandortes, der Endlagerauslegung und der Prognostizierbarkeit zukünftiger Standortentwicklungen ab. Die potenziellen Möglichkeiten der Anreicherung von Spaltstoffen durch Sedimentation nach dem Zerfall der Abfallmatrix, Lösungstransport, kolloidgetragenen Transport, Bildung sekundärer Lagerstätten oder durch Redoxsenken müssen bezüglich der Bildung kritischer Anordnungen bewertet werden.

Die Frage einer Kritikalität der in einem Endlager befindlichen Kernbrennstoffe ist bisher noch für kein Endlager mit abgebrannten Brennelementen befriedigend beantwortet worden. Auch wenn die in einem Salinar inhärent anwesenden Neutronenabsorber (Cl-35) einen grundsätzlichen Vorteil gegenüber anderen Wirtsgesteinen darstellen, ist wissenschaftlich nicht von vornherein auszuschließen, dass es bei einer großen Menge an spaltbarem Material (U-235, Pu-239, ...) langfristig zur Akkumulation von kritischen Massen und zur Ausbildung sich selbst erhaltender Kettenreaktionen mit positiven Temperaturkoeffizienten kommen kann [13]. Diese könnten im Nahbereich zur Bildung neuer Wegsamkeiten für den Radionuklidtransport führen und die gesamte Integrität eines Endlagers gefährden. Es ist darüber hinaus offen, ob Unterkritikalität bzw. eine hinreichende Begrenzung der Auswirkungen einer kritischen Anordnung überhaupt dauerhaft durch technische Maßnahmen gewährleistet werden können. Des Weiteren unterstellen die bisher für Gorleben durchgeführten Rechnungen einen Laugenzutritt und ein Behälterversagen bei ansonsten konstanter Endlagergeometrie sowie Kernbrennstoffe mit niedriger Anfangsanreicherung bzw. niedrigem Plutoniumgehalt [14]. Hier sind in vergleichende Untersuchungen mögliche zukünftige Änderungen der Endlagergeometrie für verschiedene Wirtsgesteine und weiter die diesbezüglich noch nicht untersuchten HEU-Brennelemente aus Forschungsreaktoren, der SNR- und KNK-Kern und die Gebinde aus dem angedachten Plutonium-Lagerstabverfahren aufzunehmen.

Daher sind vor dem Hintergrund einer künftig nahezu ausschließlichen direkten Endlagerung bestrahlter Brennelemente sowie ggf. nicht verwerteten Plutoniums die Aspekte der Kritikalität einschließlich möglicher Auswirkungen auf sämtliche potenziellen Wirtsgesteine näher zu untersuchen. Für den Salzstock Gorleben wird hierauf auch in einem Abschlussbericht der Deutschen Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE) zur Aktualisierung des Konzepts "Endlager Gorleben" [15] hingewiesen.

2.5 Gasentwicklung

Auch wenn die Gasentwicklung ein naturwissenschaftlich seit längerem bekanntes Phänomen darstellt, so ist die Bedeutung der Gasentwicklung erst in 1997/98 als Problem für "dichte" Endlager erkannt worden. Eine überzeugende Lösung ist noch nicht in Sicht.

Bei schwach- und mittelaktiven Abfällen bilden sich i. W. durch anaerobe Korrosion der metallischen Bestandteile in Abfällen und Abfallbehältern, durch mikrobielle Zersetzung der organischen Bestandteile in den Abfällen und durch Zersetzung der umgebenden Materialien durch radioaktive Strahlung (Radiolyse) Gase, die im Laufe der Zeit zu einer erheblichen Gasentwicklung in den Einlagerungsortern führen können. Daneben werden auch gesteinsgebundene Gase/Kondensate, z. B. aus einem Salzgebirge, in die Hohlräume freigesetzt. Die Gasproblematik wurde in den 80er Jahren bei den Arbeiten zum Endlagerprojekt Konrad erkannt und hat dort zur Abänderung des Versatzkonzepts geführt. Ferner wurde der Einfluss der Gasentwicklung auf die Radionuklidenausbreitung im Fernfeld berechnet und bewertet. In gasdichten Gesteinen (z. B. Salz) kann die Gasbildung zum Aufbau hoher Drücke führen mit der Gefahr, dass durch mögliche Rissbildungen Wasserwegsamkeiten geschaffen werden können. Überzeugende Lösungen für diese

Fragestellung, die wirtsgesteinsübergreifend Gegenstand internationaler Projekte ist [16], sind für gasdichte Gesteine noch nicht gefunden worden.

Die GRS hat im Nachgang zu generischen Untersuchungen bei Untersuchungen zur Langzeitsicherheit des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) Anfang 1997 aufgezeigt, dass dort die Gasbildung abhängig vom Versatzmaterial einen starken Druckaufbau in den Einlagerungskammern bewirken und den Nuklidaustrag aus ihnen deutlich verstärken kann [17]. Zugleich wurde im Zusammenhang mit dem Endlager Morsleben 1998 erkannt, dass mit größeren Gasmengen als ursprünglich angenommen gerechnet werden muss [18]. Bei diesen Arbeiten zum Verfüllen und Verschließen des Endlagers Morsleben wurde auch ein Konzept zur Speicherung von Gasen in mit Schotter verfüllten Hohlräumen erarbeitet, das auf seine Eignung für die Ein-Endlager-Zielsetzung untersucht werden soll. Darüber hinaus sind Vorschläge zu erarbeiten, die zu einer Verringerung der Gasmenge führen, z. B. die Herabsetzung der Restfeuchte in den Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung und in Versatzmaterialien, die Verbrennung von Abfällen, eine besondere Konditionierung amphoterer Metalle oder der Einsatz wiederverwendbarer Verpackungen.

Aus heutiger Sicht ist daher die Gasentwicklung weitgehend wissenschaftlich durchdrungen und berechenbar, ungeklärt ist allerdings, welche Gasdrücke bei der Endlagerung wärmentwickelnder Abfälle unter der Voraussetzung rascher Konvergenz entstehen und ob dieser Druckaufbau die erwünschte Dichtheit des Barrierensystems bzw. Salzgesteins gefährdet, so dass neue Wegsamkeiten für eine Radionuklid Ausbreitung entstehen könnten. Ungeklärt sind weiter der Temperatureinfluss auf das Verhalten von ggf. zur Aufnahme von Gasen zu planenden Hohlräumen (z. B. Porenspeicher) sowie die Frage, ob durch abfallspezifische oder konzeptionelle technische Maßnahmen einen kritischer Druckaufbau verhindert werden kann. Für einen Hohlraum im undurchlässigen Salzgebirge können beispielsweise die Prozesse Gasbildung und Konvergenz zu einem Innendruck führen, der den Betrag aus kleinster Hauptspannung und Gesteinsfestigkeit überschreitet und der damit zur Rissbildung des Salzgebirges führen kann. Die Gasbildung, insbesondere aus Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, kann daher die Barrierenintegrität des Wirtsgesteins gefährden.

Naturbeobachtungen sind durch die anthropogenen Einflüsse (z. B. Einbringung von Wärmeleistung, Auffahrung, Schächte) nicht ohne weiteres übertragbar. Eine weitere Problematisierung mit Blick auf Bohrlochverschlüsse findet in dem o. a. Abschlussbericht [15] der DBE statt.

Diese neuen Erkenntnisse werfen insbesondere die Frage auf, ob das Konzept einer Endlagerung (auch) schwach- und mittelaktiver Abfälle in Gorleben und darüber hinaus generell in gasdichten Wirtsgesteinen wie Salz weiter verfolgt werden sollte.

2.6 Chemotoxische Bestandteile der Abfallmatrix/-verpackung

Bei der Endlagerung sind neben den Schutzziele des Atomgesetzes auch Anforderungen aus anderen Rechtsgebieten, z. B. dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG) einzuhalten. Die Matrix radioaktiver Abfälle und ihre Verpackung können chemotoxische Bestandteile (z. B. Schwermetalle) enthalten [19]. Damit sind nicht nur radiotoxische Stoffe, sondern auch chemotoxische Stoffe bei den Sicherheitsanalysen zu berücksichtigen. Bisher wurden diese Bestandteile für Gorleben nicht näher betrachtet. International wird die Berücksichtigung chemotoxischer Bestandteile bei den Sicherheitsbeurteilungen heute immer stärker diskutiert und gefordert [20]. Einschlägige Regelungen zur Bewertung derartiger Stoffe bzw. zur erlaubten Konzentration in Abfallgebinden liegen bei den Mitgliedsländern der EU nicht vor, werden aber in naher Zukunft auf der Grundlage der Richtlinie [21] erwartet. Seitens der EU wurde ein Bewertungsverfahren entwickelt, das die Freisetzungswahrscheinlichkeit des chemotoxischen Inventars insgesamt bzw. für einzelne Stoffe berücksichtigt [8].

Demgegenüber wurde im Rahmen der Untersuchungen zur Schachtanlage Konrad gezeigt, dass ausgelaugte chemotoxische Bestandteile der Abfallmatrix bzw. ihrer Verpackung unter Zugrundelegung einer modellhaften Zusammensetzung der Abfälle bei Ausbreitung über das Deckgebirge eine hinreichende Verdünnung erfahren [19].

Im übrigen ist die Frage der Kolloid-Migration auch radiotoxischer Bestandteile (z. B. Pu) während der Nachbetriebsphase auch in jüngster Zeit Schwerpunkt der geochemischen Sicherheitsuntersuchungen, deren Ergebnisse verstärkt bei der Eignungsbeurteilung zu berücksichtigen sind. Auf der Basis der Arbeiten zu zum Projekt Konrad und zum Endlager Morsleben sollen die Art und Menge chemotoxischer Stoffe in den Abfallgebinden und in den Versatzstoffen ermittelt und das erforderliche Verdünnungspotential bestimmt werden, das zur Einhaltung der Schutzziele des WHG erforderlich ist. Dieses Verdünnungspotential ist mit dem des standortspezifischen hydrogeologischen Systems zu vergleichen und zu bewerten. Zukünftige Veränderungen des hydrogeologischen Systems sollen in die Bewertung einbezogen werden.

2.7 Naturbeobachtungen

In einer Langzeitsicherheitsanalyse müssen Prozesse (z. B. das Konvergenzverhalten von Hohlräumen im Salzgebirge, die Korrosion von Abfallprodukten in Salzlösungen, Ausfällungen beim Erreichen von Löslichkeitsgrenzen, die Bildung von Mineralphasen, etc.) modelliert werden, um die Schadstoffausbreitung im Nah- und Fernfeld sowie in der Biosphäre bei einem unterstellten Lösungszutritt an die Abfälle durch Rechnungen zu quantifizieren. Für die mathematische Beschreibung eines Prozesses werden verschiedenartige Modelle eingesetzt, z. B. thermodynamische Modelle, empirische Modelle etc., von denen zu zeigen ist, dass sie die Prozesse in statthaften Grenzen richtig beschreiben. Diese als Validierung bezeichnete Überprüfung von Modellen ist insbesondere bei den die Langzeitsicherheit berührenden Modellvorstellungen nicht möglich, da sich komplexe natürliche Systeme in den zu betrachtenden Zeiträumen nur eingeschränkt in Labor- oder Feldexperimenten abbilden lassen.

Natürliche Analoga beinhalten gewisse Möglichkeiten zur Vertrauensbildung in die benutzten Modellvorstellungen. International hat diese Möglichkeit in den letzten Jahren ein verstärktes Interesse gefunden. Bisher wurden natürliche Analoga vorwiegend im Zusammenhang mit geochemischen Prozessen, dem Langzeitverhalten gewisser Abfallmatrizes und dem Isolationspotential von Standorten untersucht. Zu klären ist, ob und in welchem Umfang natürliche Analoga für die Vertrauensbildung in Modellvorstellungen geeignet sind, die in Langzeitsicherheitsanalysen eingehen.

Naturbeobachtungen könnten insbesondere Hinweise auf die geologische Stabilität eines Endlagers geben und für die Festlegung von Sicherheitsindikatoren herangezogen werden, denen für langfristige Prognosen entscheidende Bedeutung zukommt. Mit ihnen könnten möglicherweise auch die Randbedingungen von Sicherheitsanalysen untermauert werden. Zulässigkeit und Voraussetzungen für eine Verwendung von Naturbeobachtungen als natürliche Analoga werden allerdings noch sehr unterschiedlich eingeschätzt: Probleme ergeben sich bei der standortspezifischen Anwendung von Naturbeobachtungen vor dem Hintergrund anthropogener Störungen des Systems und bei einer Übertragung von Beobachtungen von A nach B ([22] bis [25]).

2.8 Schutzziele und Sicherheitsindikatoren

Für die Nachbetriebsphase von Endlagern wird in Deutschland als radiologisches Schutzziel die Einhaltung einer maximalen Individualdosis - ohne zeitliche Begrenzung - herangezogen. Dieses Schutzziel ist auf den Grenzwert des § 47 StrlSchV (0,3 mSv/a effektive Dosis) festgelegt. Im Vergleich zu Kanada, den nordischen Ländern, der Schweiz und den USA ist

der nationale Grenzwert von 0,3 mSv/a um den Faktor 3 höher; die genannten Länder tendieren zu einem Dosisgrenzwert von 0,1 mSv/a [11]. National ist auch die Einhaltung nicht radiologischer Schutzziele im Hinblick auf z. B. Grundwasser (Besorgnisgrundsatz), Boden o. ä. gefordert.

Die in den Langzeitsicherheitsanalysen verwendeten Modelle zur rechnerischen Simulation einer potenziellen Schadstoffausbreitung aus dem Endlagerbereich bis in die Biosphäre für den unterstellten Fall eines Lösungszutritts an die eingelagerten Abfälle enthalten Unsicherheiten in den Modellannahmen, die um so größer werden, je länger der Nachweiszeitraum ist. In den 80er Jahren hat sich international die Auffassung herausgebildet, dass die Einhaltung der Schutzziele, z. B. in einem Großversuch, nicht demonstriert werden kann. Darüber hinaus wuchs Mitte der 90er Jahre die Erkenntnis, dass die Modelle und die daraus resultierenden Rechenergebnisse nicht so validiert werden können, wie es in anderen Bereichen der Wissenschaft und Technik üblich ist. Rechenergebnisse, die in Einklang mit quantitativen Schutzziele stehen, können von daher nicht mehr als getreues Abbild der Wirklichkeit, sondern nur als Indikatoren gewertet werden. Daher stellt sich die Frage, wie die rechnerische Erfüllung des radiologischen Schutzziels langfristig zu beurteilen ist, wenn die errechneten Individualdosen nur noch als Sicherheitsindikator gewertet werden können. Bisher werden i. d. R. einzelne, sich möglicherweise stark unterscheidende Langzeitrechenergebnisse in einer "wahrscheinlichen Ergebniskurve" verdichtet, die mit dem Schutzziel als Maßstab verglichen wird. International werden mit zunehmender Zeitspanne und damit zunehmender Prognoseunsicherheit die als Schutzziel festgelegten Individualdosen oder –risiken als Sicherheitsindikatoren interpretiert und weitere Indikatoren, z. B. Grundwasseralter oder Konzentrationen, zur Absicherung und Unterstützung der Sicherheitsaussagen herangezogen [8].

Diese Erkenntnis hat dazu geführt, die mit deterministischen Langzeitsicherheitsanalysen abgeleiteten Dosiswerte bzw. mit probabilistischen Analysen berechneten Risikowerte nicht als solche zu werten, sondern nur als Indikatoren.

Die IAEA hat 1994 und 1997 empfohlen, zur Sicherheitsbewertung der Nachbetriebsphase von Endlagern die Indikatoren Risiko bzw. Dosis durch weitere Sicherheitsindikatoren zu ergänzen, die weniger von Annahmen abhängen. Sie definiert den Sicherheitsindikator als Größe zur Bewertung und Eingrenzung der unterschiedlichen Arten von Prognoseunsicherheiten für unterschiedliche Nachweiszeiträume. Neben sog. primären Sicherheitsindikatoren wie Dosis, Risiko, Schadstoffkonzentration an oder in der Nähe der Erdoberfläche etc. werden sekundäre Sicherheitsindikatoren wie die Wirkungszeiten von Barrieren etc. definiert. Zu klären ist, welche Sicherheitsindikatoren im Hinblick auf die Ein-Endlager-Zielsetzung aufgestellt werden können.

Es ist daher davon auszugehen, dass, entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik, heute ein anderes, auf zusätzlichen Sicherheitskriterien und -indikatoren beruhendes System der Sicherheitsbewertung zugrunde zu legen ist [26].

2.9 Modellrechnungen

Nach § 9b Abs.4 des Atomgesetzes muss ein Endlager nach dem Stand von Wissenschaft und Technik errichtet und betrieben werden. Die Einhaltung des Standes von Wissenschaft und Technik gilt auch für die Sicherheitsnachweise eines Endlagers, die mit Hilfe von Modellrechnungen geführt werden. Im Genehmigungsverfahren für kerntechnische Anlagen werden bisher nur deterministische Sicherheitsnachweise gefordert. Die Entwicklung probabilistischer (geostatistischer) Analysen für eine Anwendung auf z. B. Grundwasser- und Transportmodellierungen hat gerade erst begonnen. Die Auswirkungen dieser grundlegenden Forschungsarbeiten auf die Aussagen zu den Unsicherheiten der verwendeten Modelle und Szenarien ist daher ungewiss ([27], [28]).

Wegen der Unsicherheiten in den Modellen und Modellannahmen kann eine probabilistische Sicherheitsanalyse einem Endlagersystem angepasster sein als eine deterministische Sicherheitsanalyse. Geostatistische Verfahren könnten hier eingesetzt werden. Ihre Anwendung ist im Hinblick auf die Berücksichtigung von allgemeinen Unsicherheiten und räumlichen Variabilitäten hydrogeologischer Daten bei der Modellierung der Grundwasserströmung für das Deckgebirge des Standortes Gorleben untersucht worden. Diese Verfahren erscheinen geeignet, generell auf potenzielle Endlagerformationen angewendet zu werden

Probabilistische Sicherheitsanalysen können daher deterministische Analysen sinnvoll ergänzen oder sogar ersetzen. Schutzziele für diese Analysen wären in einer Bewertungsbasis zu verankern. Die Forderung, die Sicherheit eines Endlagers zusätzlich bzw. generell probabilistisch nachzuweisen, wird daher voraussichtlich in den Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle verankert, die momentan erarbeitet werden. Zu klären ist, inwieweit geostatistische Verfahren bei probabilistischen Sicherheitsanalysen einsetzbar sind. Die o. a. Aspekte bekommen vor dem Hintergrund zusätzliches Gewicht, dass die Inbetriebnahme eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle erst ab ca. 2030 zweckmäßig ist, zukünftige Anforderungen an ein derartiges Endlager jedoch bereits heute so weit wie möglich zu berücksichtigen sind, da sie Voraussetzung für die künftige Erteilung eines Planfeststellungsbeschlusses sind. Gründe, die für eine späte Inbetriebnahme eines derartigen Endlagers sprechen, sind primär der Rückgang der Wärmeleistung der Abfälle aufgrund radioaktiven Zerfalls und die dann erreichbare Auslastung des Endlagers durch hinreichende Abfallmengen.

2.10 Geochemische Prozesse

Die Notwendigkeit, geochemische Prozesse zu beschreiben und in Langzeitsicherheitsanalysen modellhaft zu berücksichtigen, gewinnt immer mehr an Bedeutung und ist Gegenstand intensiver nationaler und internationaler Forschungsarbeiten. In diesem Jahr werden die Ergebnisse von Untersuchungen zu geochemisch fundierten Quelltermen für HAW-Glas, zu abgebrannten Brennelementen und zu Zement für die Nahfeldmodellierung vorliegen. Aus diesen Arbeiten haben sich Fragestellungen ergeben, die einer weiteren Bearbeitung bedürfen. Hierzu zählen die Erstellung einer einheitlichen thermodynamischen Standarddatenbasis für die geochemische Nahfeldmodellierung, die Aufklärung der Speziation von vier- und sechswertigen Aktiniden, die Temperaturabhängigkeit der thermodynamischen Daten für die Aktiniden in hochkonzentrierten salinaren Lösungen, das Kolloidverhalten der Aktiniden, die Auswirkung der Radiolyse im Hinblick auf die Oxidation und Reduktion der Aktiniden und ihre Wechselwirkung mit Versatzstoffen.

2.11 Safeguards

Die Bundesrepublik Deutschland ist Signatarstaat des Vertrages zur Nichtverbreitung von Kernwaffen und hat sich verpflichtet, seine Einhaltung durch entsprechende Kontrollmaßnahmen überprüfen zu lassen. Hierfür sind EURATOM als regionales Inspektorat sowie die IAEA zuständig.

Für die direkte Endlagerung von Brennelementen in einem Salzstock ist von deutscher Seite im Rahmen der Task A.14 ihres IAEA-Safeguards-Unterstützungsprogramms ein Referenzkonzept für Safeguardsmaßnahmen erarbeitet worden. Mit der geplanten Aufgabe der Wiederaufarbeitung und der verstärkten direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente gewinnt auch die Safeguards-Problematik an Bedeutung. Durch die direkte Endlagerung wird das Inventar an spaltbarem Material (U-235, Pu-239 ...) erhöht. Es ist zu prüfen, ob die bisher im Rahmen von F&E-Arbeiten untersuchten Maßnahmen zur Sicherung

einer undeklarierten Entnahme von eingelagerten Brennelementen und zur Erkennung undeklariert Bergbauaktivitäten (z. B. Schall-Emissionsmessungen, Radar) auch dann noch ausreichend sein können.

Die Anforderungen aus der Safeguards-Problematik stehen möglicherweise im Widerspruch zur Forderung nach Rückholbarkeit der Abfälle. Ein Konzept, dass beide gegenläufigen Aspekte miteinander befriedigend verknüpft, wurde noch nicht entwickelt. Für die rückholbare Abfalleinlagerung sind die genannten Konzepte daher ebenfalls zu überarbeiten, für die direkte Endlagerung von Plutonium gibt es für die Spaltstoffüberwachung durch die IAEA oder EURATOM noch kein Konzept.

2.12 Mehrbarrierenkonzept

Das Mehrbarrierenkonzept ist ein international für die Endlagerung anerkanntes Konzept, das die Einhaltung von Schutzziele gewährleisten soll. Unterschieden wird zwischen technischen Barrieren wie Abfallmatrix, Abfallbehälter, Versatz, Abschlussbauwerken von Kammern, Strecken, Bohrlöchern, Schächten und natürlichen (geologischen) Barrieren wie Deckgebirge und Wirtsgestein. Am Standort Gorleben stellt das Salzgebirge die Hauptbarriere dar. Umstritten ist die Beurteilung der Tatsache, dass eine vollständige Tonabdeckung des Salzstockes Gorleben fehlt. Dies ist bedeutsam im Zusammenhang mit der möglichen Forderung, dass jede der geologischen Barrieren für sich und nicht nur ihre Summe die volle Schutzfunktion gewährleisten soll. Es ist nicht auszuschließen, dass sich zukünftig im Rahmen der internationalen Diskussion Einvernehmen herausbildet, dass das Versagen einer Barriere nicht dazu führen darf, dass Schutzziele nicht eingehalten werden und dass die bisher gültige Auffassung [2], die Schutzfunktion könne auch durch die Summe mehrerer Barrieren gewährleistet werden, aufgegeben wird. Demzufolge ergeben sich Zweifel an der Eignung von Gorleben, wenn die Einhaltung der Schutzziele an diesem Standort nach dem Stand von Wissenschaft und Technik [29] auch für den Fall nachgewiesen werden muss, dass die Barriere Salzstock versagt. Entsprechende Festlegungen sind in einer neuen wirtsgesteinspezifischen Bewertungsbasis unter Berücksichtigung des erforderlichen Nachweiszeitraums zu treffen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Schutzfunktionen der geologischen Barrieren nicht unabhängig voneinander sind.

2.13 Wirtsgesteine im Vergleich

Das Salzgestein in steiler Lagerung (Salzstock) war bislang das für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in Deutschland präferierte Wirtsgestein. Zukünftig sollen auch weitere Wirtsgesteine auf ihre Eignung für die Errichtung eines Endlagers vom Typ Gorleben vor dem Hintergrund der Erkenntnisse in anderen Ländern untersucht werden. Sämtliche vorstehend genannten Fragestellungen werden daher, soweit möglich, im Vergleich mit anderen Wirtsgesteinen wie Ton oder Granit bearbeitet.

3. Vorgehen zur Klärung der Einzelfragen

Für die Klärung der in Abschnitt 2 genannten sicherheitstechnischen Zweifelsfragen wird wie folgt vorgegangen:

- ◇ Zunächst sind konzeptionelle Grundsatzfragen zu klären und die Sicherheitskriterien sowie das Auswahlverfahren mit den zugehörigen Kriterien zu entwickeln und festzulegen. Informationen zur Entwicklung des Auswahlverfahrens sind unter der Internet-Adresse des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte AkEnd abrufbar (www.akend.de). Eine gorlebenspezifische Bearbeitung der Fragen ist erst anschließend sinnvoll. Daher wird die Klärung sämtlicher zum Standort Gorleben

- bekanntem und das Moratorium begründenden Zweifelsfragen so vorbereitet, dass diese Fragestellungen nach Möglichkeit wirtsgesteinsunabhängig geklärt werden.
- ◇ Über den Verbleib von Gorleben im Auswahlverfahren und über die Fortführung oder Beendigung des Moratoriums in Gorleben ist fortlaufend zu entscheiden. Eine erste gorlebenspezifische Prüfung ist erst dann zweckmäßig, wenn die Sicherheitskriterien und das Auswahlverfahren mit den zugehörigen Kriterien als Beurteilungsbasis festliegen. Nach derzeitiger Planung wird dies etwa 2004 der Fall sein. Wäre dann offensichtlich, dass die Kriterien am Standort Gorleben nicht erfüllt werden können, so wäre bereits zu diesem Zeitpunkt über eine Aufgabe des Projekts zu entscheiden. Andernfalls würde Gorleben in das anschließende Standortauswahlverfahren einbezogen.
 - ◇ Über die Wiederaufnahme der Erkundung von Gorleben kann - vorbehaltlich einer offensichtlichen Ungeeignetheit von Gorleben aufgrund einer zwischenzeitlichen Prüfung - erst am Ende des erst nach Festlegung der Auswahlkriterien durchführbaren Auswahlverfahrens entschieden werden. Deshalb führt die konsekutive im Vergleich mit der parallelen Vorgehensweise nicht zu einer Verlängerung der Moratoriumsdauer.

Auf der Grundlage von Leistungsbeschreibungen für die Bearbeitung der Einzelfragen durch externe Auftragnehmer soll die Vergabe dieser Arbeiten bis Mitte 2002, ihre Abarbeitung nach vorläufigen Schätzungen bis Ende 2004 erfolgen. Ein detaillierter Ablaufplan zur Abarbeitung dieser Einzelfragen ist als Anlage beigefügt.

4. Zusammenfassung

Die neuen - auch internationalen - langzeitsicherheitsrelevanten Erkenntnisse, Entwicklungen und Bewertungen mit den daraus resultierenden, in Abschnitt 2 erläuterten Zweifelsfragen zeigen, dass das bisher verfolgte nationale Endlagerkonzept nicht mehr auf einer zweifelsfrei verlässlichen Grundlage beruht und überprüft werden muss. Dies gilt insbesondere für den auf diesem Konzept basierenden Standort Gorleben, dessen Eignung umstritten ist.

Es gibt bis heute zwar keine geowissenschaftlichen Gründe, die seine Eignung nach dem derzeitigen Erkundungsstand definitiv ausschließen würden. Andererseits sind die oben angeführten neuen langzeitsicherheitsrelevanten Erkenntnisse, Entwicklungen und Bewertungen noch nicht umfassend in die bisherige Bewertung der Fachbehörden und Beratungsgremien des Bundes eingeflossen. Es ist daher fraglich, inwieweit die bisherigen Planungen für Gorleben noch auf einer verlässlichen Grundlage beruhen. Rückwirkungen auf das Erkundungsprogramm wären zudem im Falle seiner Fortsetzung nicht auszuschließen gewesen.

Die Weiterführung der Erkundungsarbeiten kann zur Klärung der Zweifelsfragen nichts Wesentliches beitragen. Für die Klärung der Zweifelsfragen sind die Gegebenheiten am Standort Gorleben hinreichend bekannt. Bei der Summe der zu klärenden Fragestellungen, bei deren Abarbeitung eine Fortsetzung der Erkundung keinen wesentlichen Beitrag leisten kann, sowie unter Berücksichtigung des durch die neuen Erkenntnisse und Bewertungen festgestellten erheblichen Eignungsrisikos für den Standort Gorleben hat sich auch bei Abwägung der wirtschaftlichen Gesichtspunkte das Moratorium aufgedrängt. Weitere erhebliche finanzielle Investitionen am Standort Gorleben sind ohne vorherige Klärung der vorgenannten konzeptionellen und sicherheitstechnischen Einzelfragen nicht gerechtfertigt. Für die Klärung der das Moratorium begründenden Fragen, die nach Möglichkeit wirtsgesteinsunabhängig erfolgen soll, ist mehrheitlich eine konsekutive Vorgehensweise zweckmäßig. Dabei ist über den Verbleib von Gorleben im Auswahlverfahren und über die Fortführung oder Beendigung des Moratoriums fortlaufend zu entscheiden. Über die

Wiederaufnahme der Erkundung kann erst am Ende des Auswahlverfahrens entschieden werden.

5. Literatur

- [1] Vereinbarung über die geordnete Beendigung der Nutzung der Kernenergie in Deutschland, Umwelt Nr. 7-8/2000, Sonderteil, BMU Berlin, Juni 2000
- [2] Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk, Bundesanzeiger 35 (5. Januar 1983), Nr. 2
- [3] Disposition of High-Level Waste and Spent Nuclear Fuel: The Continuing Societal and Technical Challenges, National Academy Press, Washington (2001)
- [4] Geological Disposal of Radioactive Waste: Reviews of Developments in the Last Decade, NEA/RWM/OECD, Paris (1999)
- [5] Confidence in the Long-Term Safety of Deep Geological Repositories - Its Development and Communication, NEA/RWM/OECD, Paris (1999)
- [6] Mitteilung und vierter Bericht der Kommission über die derzeitige Lage und die Aussichten auf dem Gebiet der Entsorgung radioaktiver Abfälle in der Europäischen Union vom 11. Januar 1999, Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Brüssel (1999)
- [7] ICRP (1998) Radiation Protection Recommendations as applied to the Disposal of Long-Lived Solid Radioactive Waste, ICRP Publication 81, Annals of the ICRP 28 (4)
- [8] Internationale Entwicklung zur Beurteilung der langzeitigen Sicherheit von Endlagern für HAW und abgebrannte Brennelemente, GRS-A-2813, GRS mbH, Köln, Juli 2000
- [9] Zeitrahmen für die Beurteilung der Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle. Gemeinsame Stellungnahme der Reaktorsicherheitskommission (RSK) und der Strahlenschutzkommission (SSK). 233. Sitzung der RSK am 22. Juni 1988, 84. Sitzung der SSK am 30. Juni 1988.
- [10] So z. B. A. G. Herrmann, H. Röthemeyer: Radioaktive Abfälle und Reststoffe in der Geosphäre. In "Umweltradioaktivität", Ernst & Sohn, Berlin (1996), S. 367-388
- [11] Bewertungsmaßstäbe für die Betriebs- und Langzeitsicherheit von geologischen Endlagern, GRS-A-2643, GRS mbH, Köln, Dezember 1998
- [12] Considering Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste, NEA/RWM/RETREV(2001)2, OECD Nuclear Energy Agency, Paris (2001)
- [13] W. E. Kastenber, L. J. Gratton: Hazards of Managing and Disposing of Nuclear Waste. Physics Today, Juni 1997; atw, März 1999, S. 156 ff.

- [14] Kritikalitätsanalysen zur Nachbetriebsphase eines Endlagers für abgebrannte Brennelemente, GRS-A- 2880, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, München, Januar 2001
- [15] Abschlussbericht der Deutschen Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE) zur Aktualisierung des Konzepts "Endlager Gorleben" vom 13. März 1998, Peine (1998)
- [16] Research into Gas Generation and Migration in Radioactive Waste Repository Systems (Progress Report), European Commission, EU19133 EN, Brüssel, 2000
- [17] Erzeugung und Verbleib von Gasen in einem Endlager für radioaktive Abfälle, Bericht über den GRS-Workshop vom 29. und 30. Mai 1996, GRS-129, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, Januar 1997
- [18] W. Müller: Status zur Gasbildung, Workshop "Stilllegungskonzept und Langzeitsicherheit ERAM", Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, 21. -22. April 1998
- [19] Prüfung und Bewertung einer möglichen Verschmutzung des Grundwassers durch bestimmte gefährliche Stoffe, Interner ET-Bericht ET-IB-94, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Salzgitter (1998)
- [20] Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk - Diskussionsgrundlage, GRS-A-2764, GRS mbH, Köln, März 2000
- [21] Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (Abl. EG Nr. L 327 S. 1)
- [22] Abschlußbericht zum BMU-Vertrag "Sicherheit im Nachbetrieb von Endlagern für Radioaktive Abfälle", GRS-A-2256, GRS mbH, Köln, April 1995;
- [23] Radionuclide Transport through the Geosphere into the Biosphere. Review Study of the Project Mirage. EUR 16489 EN, Europäische Kommission, Brüssel - Luxemburg (1995);
- [24] Die Bedeutung von natürlichen Analogien für die Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Stoffe, GRS-A-2118, GRS mbH, Köln, Februar 1994;
- [25] Studie zur Entwicklung von Grundlagen für ein Verfahren zur Auswahl von Endlagerstandorten und Beurteilung ihrer Langzeitsicherheit, Abschlußbericht, Erstellt im Auftrag des Niedersächsischen Umweltministeriums, Gruppe Ökologie, Hannover, November 1994
- [26] Safety Indicators, Complementary to Dose and Risk, for the Assessment of Radioactive Waste Disposal. Draft Report, Working Document, Version 1, August 1999, IAEA, Wien (1999)

- [27] Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen für Grundwasser- und Transportmodelle auf der Basis geostatistischer Untersuchungen, GRS - A - 2724, GRS mbH, Köln, Juli 1999
- [28] Stochastic and Deterministic Analyses for a generic Repository in Rock Salt in the EU-Project SPA „Spent Fuel Performance Assessment“, GRS – A – 2716, GRS mbH, Köln, Juli 1999
- [29] So z. B. Environmental Protection Agency, 10 CFR Part 63 (Entwurf 1998, momentan in Überarbeitung)

Herausgeber:

Bundesumweltministerium
Abteilung RS
Postfach 12 06 29
53048 Bonn
Tel.: 01888-305-0
Fax: 01888-305-3965