**Fachverband für Strahlenschutz e. V.**

Mitgliedsgesellschaft der Internationalen Radiation Protection Association (IRPA)
für die Bundesrepublik Deutschland und die Schweiz

**Publikationsreihe**
**FORTSCHRITTE IM STRAHLENSCHUTZ**

**Publication Series**
**PROGRESS IN RADIATION PROTECTION**

---

**FS-98-101-AKE** **ISSN 1013-4506**

# Forum
Entsorgungsaspekte für radioaktive Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland

# Forum
Aspects of radioactive waste management and disposal in the Federal Republic of Germany

Organisation durch den Arbeitskreis Entsorgung (AKE)
Organized by the Working Group of
Waste Management and Disposal

November 1998

FS-98-101-AKE

zu beziehen durch den Sekretär des AKE:

Dr. Gerd Georg Eigenwillig
c/o Siemens AG, KWU NDM3
Postfach 10 10 63
D-63010 Offenbach

# ENDLAGERUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE IN DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND - VERGANGENHEIT UND GEGENWART
# FINAL DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE IN THE FEDERAL REPUBLIK OF GERMANY - PAST AND PRESENT

**G.G. Eigenwillig (Siemens KWU, Offenbach)**

**Zusammenfassung**
In der Bundesrepublik Deutschland gibt es das stillgelegte Versuchsendlager Asse II, das betriebsfähige Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) und die Endlagerprojekte Konrad und Gorleben. Diese Sachlage ist das Ergebnis langer wissenschaftlicher, technischer, gesetzlicher und politischer Entwicklungen.
**Summary**
In the Federal Republic of Germany exist the decommissioned experimental repository Asse II, the active Repository for Radioactive Waste in Morsleben (ERAM) and the repository projects Konrad and Gorleben. This state of affairs is the result of long lasting scientific, technological, legal and political processes.

## 1 Endlagerungskonzepte

Radioaktiver Abfall kann definiert werden als Material mit einem Gehalt oder mit einer Kontamination an Radionukliden oberhalb vorgegebener Freigrenzen und Freigabewerte, für das keine weitere Verwendung vorgesehen ist. Radioaktive Abfälle fallen an

- in Forschung, Medizin und Industrie
- in Landesammelstellen
- bei der Gewinnung und Verarbeitung von Rohstoffen und
- bei dem Betrieb und der Stillegung kerntechnischer Anlagen.

Das Management radioaktiver Abfälle wird mit dem Begriff Entsorgung bezeichnet. Dabei sind Vorstufen wie z. B. die Verarbeitung, Verpackung und Zwischenlagerung möglich oder notwendig. Enthalten die radioaktive Abfälle Radionuklide, die so langlebig sind, daß sie nicht in einer angemessenen Zwischenlagerungszeit zerfallen, so müssen die radioaktiven Abfälle zum Schutz der Biosphäre - Umwelt und Mensch - gezielt endgelagert werden. Die Endlagerung muß den Transport von radioaktiven Stoffen in die Biosphäre ausschließen oder wenigstens ausreichend begrenzen. Die Entsorgung ist also erst durch die Endlagerung abgeschlossen.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Institutionen verschiedener Staaten endlagern z. Z. überwiegend durch oberflächennahes Ablagern in Deponien oder Hohlräumen und gelegentlich durch Einbringen in tiefe geologische Formationen, d. h. in Endlagerbergwerken. Die Endlagerung im Ozean wurde mit Ausnahme der Einleitung von Abwässern eingestellt. Weltraum und Eis in der Antarktis waren nur Gegenstand von Studien.

Die Isolation von Radionukliden in radioaktiven Abfällen zum Schutz der Biosphäre kann bei der Endlagerung auf dem Festland durch einzelne Barrieren oder eine Kombination mehrerer Barrieren erreicht werden. Diese Barrieren sind: Rohabfall, Abfallprodukt, Verpackung, Verfüll-/Versatzmaterial, weitere technische Barrieren (Beton, Betonit u. a.), Wirtgestein und Nebengestein/Deckgebirge.

Aus politischen Gründen wurde von der Bundesregierung in den sechziger Jahren entschieden, radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen und nicht oberflächennah endzulagern.

In der Bundesrepublik Deutschland bestanden frühzeitig Pläne, Salzstöcke als Endlager zu nutzen. Diese Pläne waren von Arbeiten in den USA beeinflußt. Steinsalz weist auch ohne weiteren Ausbau für die Errichtung von Kavernen und Grubenräumen eine hinreichende Festigkeit auf, es besitzt eine gute Wärmeleitfähigkeit und bei Vorhandensein eines Gipshuts eine geringe Ablaugung durch Grundwasser. Salzstockbereiche mit Anhydritlagen und Kalisalz sind wegen möglicher Wasserführung und Instabilität zu meiden.

## 2 Versuchsendlager Asse

Von 1967 bis 1978 wurde das ehemalige Salzbergwerk Asse II in Niedersachsen als Versuchsendlager genutzt. In dieser Zeit wurden dort etwa 125 800 radioaktive Abfallgebinde eingelagert. Ferner war geplant, dort auch abgebrannte Brennelemente des gasgekühlten Reaktors in Jülich endzulagern. Betreiber des Versuchslagers war und ist das Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit (GSF).

Der Betrieb des Versuchsendlagers Asse II wurde nach Bergerecht (§§ 51 ff Bundesberggesetzt, BBergG) unter Einbeziehung des § 3 Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) als Handhabung radioaktiver Stoffe genehmigt. 1976 wurde nach der Novellierung des Atomgesetzes (AtG) ein Planfeststellungsverfahren (§ 9b AtG) notwendig. Da eine derartige Genehmigung nicht vorlag, wurde der Einlagerungsbetrieb im Dezember 1978 eingestellt. GSF beantragte nach Rücksprache mit den Regierungen von Niedersachsen und des Bundes 1979 die rückholbare Zwischenlagerung von radioaktiven Abfallgebinden im Versuchsendlager Asse II nach § 3 StrlSchV. Dieser Antrag wurde nach Stellungnahme der Reaktorsicherheitskommission (RSK) zur Langzeitstabilität der Asse II und zur Nuklidausbreitung über den Wasserpfad nach einem Störfall mit Wassereinbruch nicht weiter verfolgt. Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) stellt im August 1979 in Niedersachsen den Antrag, das Planfeststellungsverfahren nach § 9b AtG für die Errichtung eines Endlagers einzuleiten. Offensichtlich wurde dieser Antrag nicht weiter konkretisiert. Das Versuchsendlager Asse II wurde daher von GSF weiterhin als Forschungsstätte betrieben. Einzelbereiche des Bergwerks werden zur Verbesserung der Standfestigkeit mit Versatzmaterial verfüllt.

## 3 Entsorgungszentrum und Salzstock Gorleben

Das geplante nukleare Entsorgungszentrum in Niedersachsen sollte ursprünglich an einem Standort u. a. Brennelementzwischenlager, Wiederaufarbeitungsanlage und Endlager in einem Salzstock realisieren. 1976 begann die Suche nach einem geeigneten Salzstock für die

Aufnahme wärmeerzeugender radioaktiver Abfälle, die etwa 95 % der zu entsorgenden Radioaktivität und 5 % des radioaktiven Abfallvolumens darstellen. Diese Abfälle stammen überwiegend aus der nuklearen Energieerzeugung.

Grundlage für die Untersuchungen war ein Kriterienkatalog, der mit dem damaligen Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), der GSF, der Gesellschaft zur Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen, dem Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung und dem Deutschen Wetterdienst abgestimmt wurde. Durch eine Großraumuntersuchung der gesamten Gebiete der Bundesrepublik konnten insgesamt 26 Standorte zur Vorauswahl festgestellt werden. Durch eine geeignete Bewertung der Standortdaten wurden aus diesem Kreis 10 Standorte zur weiteren Untersuchung ausgewählt.

Für diese Standorte der engeren Wahl wurden Fachgutachten vom Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung sowie vom Deutschen Wetterdienst erarbeitet. Aufgrund der Resultate dieser Gutachten konnten drei Standorte benannt werden. Diese Standorte waren

- Wahn im Landkreis Aschendorf-Hümmling
- Lichtenmoor im Landkreis Fallingbostel
- Lutterloh im Landkreis Celle.

Überraschend legte die Niedersächsische Landesregierung im Februar 1977 den Standort Gorleben für das Entsorgungszentrum fest. Im Juli 1977 stellte PTB den Antrag auf Einleitung eines Planfeststellungsverfahrens, im Salzstock Gorleben ein Endlager zu errichten. Seither ist die Diskussion nicht verstummt, weitere Salzstöcke auf ihre Eignung für ein Endlager zu untersuchen. Vor allem deswegen, weil dem Salzstock Gorleben in der Gorlebener Rinne Teile des Gipshutes fehlen. Er ist allerdings entsprechend den Ergebnissen verschiedener Untersuchungen als eignungshöffig bezeichnet worden. Z. Z. läuft die unterirdische Erkundung.

Für den Fall, daß der Salzstock Gorleben nicht für ein Endlager geeignet sein sollte, ist eine Vorauswahl neuer Standorte auf der Grundlage vorliegender Kenntnisse getroffen worden. Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) befaßte sich im Auftrag des Bundesumweltministeriums (BMU) mit 41 Salzstöcken und 28 potentiellen Lagerstätten in anderem Gestein. Das Ergebnis wurde im August 1995 vorgelegt und festgestellt, daß auch die Salzstöcke von Waddekath in Sachsen-Anhalt, Wahn und Zwischenahn in Niedersachsen sowie von Gülze-Sumte in Mecklenburg-Vorpommern und Niedersachsen als Lagerorte potentiell untersuchungswürding seien. Von den anderen Gesteinsformationen gelten Standorte im Fichtelgebirge, im nördlichen Oberpfälzer Wald, der Saldenburg-Granit bei Freyung-Grafenau im Bayerischen Wald, das Erzgebirge, weitere Gebiete in Sachsen und die sogenannte Halle-Wittenberger Scholle als untersuchungswürdig.

## 4 Schachtanlage Konrad

Die Schachtanlage Konrad in Salzgitter ist für die Endlagerung radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeabgabe vorgesehen. Diese radioaktiven Abfälle enthalten etwa 5 % der zu entsorgenden Radioaktivität, stellen aber mehr als 95 % des Abfallvolumens dar. Sie stammen z. B. aus Forschung, Medizin, Industrie und Kerntechnik.

Die Schachtanlage Konrad förderte von 1965 bis 1976 Eisenerz. Als die Auflassung der Grube und die Entlassung der Beschäftigten drohten, hat der Betriebsrat damals dem BMFT die Schachtanlage für die Endlagerung von Stillegungsabfällen aus kerntechnischen Anlagen empfohlen.

Der Bund hat sich der Sache angenommen. GSF hat 1982 festgestellt, daß nach den vorliegenden Kenntnissen die Schachtanlage Konrad grundsätzlich als Endlager geeignet sein kann. PTB hat Ende August 1982 bei dem zuständigen niedersächsischen Ministerium und beim Bergamt das Planfeststellungsverfahren für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Schachtanlage Konrad beantragt. Es sollte 1988 abgeschlossen sein. Daß dies nicht so ist, hat sachliche und politische Gründe:

- Pilotprojekte (neues Genehmigungsverfahren: Planfeststellung) folgen nicht vorgegebenen Zeitabläufen und
- die zuständigen Landesregierungen verzögerten und verzögern notwendige Entscheidungen.

## 5 Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben

Das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) in einem ehemaligen Salzbergwerk wurde z. Z. der DDR eingerichtet. Die Standortzustimmung erfolgte 1972 und die Zustimmung zur Errichtung 1974, der Versuchsbetrieb begann 1979 und die erste Zustimmung zum Dauerbetrieb erfolgte 1981. Seit 1970 war das Bergwerk ein Betriebsteil des volkseigenen „Kombinats Kernkraftwerke Bruno Leuschner" in Greifswald (heute Energiewerke Nord, EWN). ERAM ist für die Aufnahme radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeabgabe zugelassen, wobei der zulässige Anteil an Radioaktivität - vor allem an Alpha-Strahlern - niedriger ist als für das Projekt Konrad.

Die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), RSK und SSK haben seit 1990 mehrfach die Sicherheit des ERAM bestätigt.

Im Zuge der Vereinigung 1990 wurde ERAM vom Bund übernommen. Entsprechend dem Einigungsvertrag von 1990 gilt es bis zum 30. Juni 2000 als planfestgestellt, d. h. als genehmigt. Durch die AtG-Novelle im April 1998 wurde die Frist auf den 30. Juni 2005 verlängert.

Das Oberverwaltungsgericht des Landes Sachsen-Anhalt hat am 25. September 1998 vorläufig beschlossen, daß die Einlagerung im Ostfeld bis zur Entscheidung in der Hauptsache untersagt ist, weil nach seiner Auffassung das Ostfeld des ERAM als Einlagerungsbereich nicht genehmigt ist. Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hat danach den gesamten Einlagerungsbetrieb eingestellt.

## 6 Zuständigkeiten und einige Regelungen

Seit der Novellierung des AtG 1976 ist nach § 23 AtG der Bund für die Endlagerung radioaktiver Abfälle zuständig. Zuerst nahm PTB und seit seiner Gründung das BfS die

Aufgaben des Bundes wahr und erhält Zielvorgaben überwiegend vom BMU und dessen Beratungsgremien RSK und SSK. Nach § 9b AtG wird ein Endlager in einem Planfeststellungsverfahren genehmigt, das sich aber nicht auf die Zulässigkeit des Vorhabens nach den Vorschriften des Berg- und Tiefspeicherrechts erstreckt. Die AtG-Novelle vom April 1998 regelt, daß durch ein Gesetz die Einrichtung von Endlagern auf eine Körperschaft des öffentlichen Rechts übertragen werden soll.

Das Abteufen der Schächte in den Salzstock Gorleben und seine untertägige Erkundung wurden nach Bergrecht genehmigt (§§ 51 ff BBergG). Das Bergrecht (§ 55 BBergG) enthält einen Rechtsanspruch auf Zulassung, wenn die Genehmigungsvoraussetzungen erfüllt sind. Ein Weisungsrecht des Bundes kennt das Bergrecht im Gegensatz zum Atomrecht nicht. Erst wenn die untertägige Erkundung des Salzstocks Gorleben erfolgreich war, wird das bereits 1977 beantragte Planfeststellungsverfahren nach § 9b AtG konkretisiert. Der vollständigen Erkundung standen bisher die Salzrechte von Grundstückseigentümern entgegen, die das Vorhaben ablehnen. Die AtG-Novelle vom April 1998 regelt dagegen jetzt allgemein die Möglichkeit der Enteignung, die Duldung von Vorarbeiten auf Grundstücken und die Ermächtigung für eine Rechsverordnung zur Durchsetzung einer Veränderungssperre gegen wertsteigernde oder die vorgesehene Endlagerung erschwerende Maßnahmen.

Für die Endlagerung radioaktivere Abfälle in einem Bergwerk hat die RSK im Dezember 1982 Sicherheitskriterien verabschiedet. Diese behandeln folgende Themen: Schutzziele, Maßnahmen zur Verwirklichung der Schutzziele, Standortanforderungen, Voraussetzungen für Errichtung und Betrieb eines Endlagers, Standortderkundung, Errichtung und Betrieb, Abfälle, Stillegung und Nachbetriebsphase.

# ENTSORGUNGSKONZEPTION FÜR RADIOAKTIVE ABFÄLLE IN DEUTSCHLAND - FRAGEN UND ANTWORTEN
# DISPOSAL CONCEPT FOR RADIOACTIVE WASTE IN GERMANY - QUESTIONS AND ANSWERS

**Arbeitskreis Entsorgung (AKE) im Fachverband für Strahlenschutz**

## Zusammenfassung

Schwach- und mittelradioaktive Abfälle sollten, soweit sie nicht freigegeben werden können, kontinuierlich einer Endlagerung zugeführt werden. Eine Verschiebung der Endlagerung ist aus Strahlenschutz-, Kosten- und ethischen Gründen nicht akzeptabel. Eine Zwischenlagerung hochradioaktiver Abfälle und abgebrannter Brennelemente ist dagegen unumgänglich.

Salz ist für wärmeentwickelnde Abfälle als Endlager-Wirtsgestein gut geeignet, Eisenerz oder ggf. anderes klüftiges Gestein besitzt Vorteile für Abfälle mit stärkerer langfristiger Gasbildung. Inwieweit eine gemeinsame Endlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen mit hochradioaktiven Abfällen und abgebrannten Brennelementen wie geplant im Salzstock Gorleben möglich ist, bedarf noch der weiteren Bearbeitung.

Die geplante maximale Endlagerkapazität in Deutschland übersteigt unter bestimmten Randbedingungen (Auslaufen der Kernenergienutzung, Umgang mit sonstigen radioaktiven Stoffen im bisherigen Umfang, günstige Annahmen über die Nutzung des Salzstockes Gorleben) das erwartete Abfallvolumen. Die tatsächliche Hohlraumerstellung wird allerdings dem konkreten Bedarf zeitlich angepaßt. Durch einheitliche gesetzliche Regelungen zur Freigabe schwach radioaktiver Abfälle aus dem Geltungsbereich des Atomrechts würde das Volumen der endzulagernden Abfälle weiter reduziert werden können.

Zentrale Endlager in Bergwerken sind gemäß dem relativ großen Kernenergieprogramm Deutschlands angemessen und erforderlich. Sie können im Gegensatz zu Deponien alle langlebigen Radionuklide aufnehmen. Multinationale oder europäische Lösungen wären bei angemessenen und vergleichbaren Sicherheitsstandards dabei vorteilhaft. Ein aus politischen Gründen gegebenenfalls erforderlicher Lastenausgleich im Sinne eines allgemeineren ALARA-Prinzips (ALARA = as low as reasonably achievable = so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar) müßte auf breiterer industrieller Basis vorgesehen und nicht auf den Entsorgungssektor beschränkt werden. Für begrenzte Inventare kurzlebiger radioaktiver Abfälle ist grundsätzlich eine Entsorgung in oberflächennahen Endlagern möglich.

Politische oder ideologische Einflüsse widersprechen dem ALARA-Prinzip des Strahlenschutzes, wenn sie zusätzliche Strahlenexpositionen und Kosten verursachen.

Der Abbau von Konservativitäten in den Sicherheitsanalysen durch stärkere Einbeziehung probabilistischer Methoden bei der Herleitung von Endlagerungsbedingungen ist aus Strahlenschutzgesichtspunkten zu fordern. Hypothetische Strahlenexpositionen, die für unwahrscheinliche Szenarien und

lange Zeiträume mit nicht verläßlichen oder nicht möglichen Prognosen berechnet wurden, können nicht zur Forderung von Maßnahmen herangezogen werden, die zu realen Mehr-Expositionen in der Gegenwart führen.

Umfang und Intensität der Abfallproduktkontrolle müssen die Verhältnismäßigkeit zwischen daraus resultierendem Sicherheitsgewinn und dem mit den Kontrollmaßnahmen verbundenen Risiko wahren.

Ein gestuftes Genehmigungsverfahren mit weniger Detailfestlegungen und mehr Verantwortung für den Genehmigungsinhaber würde dem langzeitigen Betrieb von Endlagern besser gerecht.

**Summary**

Low- and medium-radioactive waste should be transferred to disposal on an ongoing basis, unless it is possible to grant a release from the scope of the Atomic Energy Act in respect of such waste. Postponement of disposal is not acceptable, for reasons of radiological protection and cost, and on ethical grounds. Interim storage of highly radioactive waste and spent fuel assemblies is, however, inevitable.

Salt is highly suitable as a host rock for disposal of heat-generating waste. Iron ore, or if necessary another fissured rock, has advantages for waste with greater capacity for long-term gas formation. The feasibility of joint disposal of low- and medium-radioactive waste with highly radioactive waste and spent fuel assemblies, as planned in the Gorleben salt dome, requires further examination.

The planned maximum disposal capacity in Germany exceeds the expected waste volume given certain boundary conditions (phasing-out of the utilization of nuclear power, handling of other radioactive materials remaining at previous levels, favorable assumptions regarding the use of the Gorleben salt dome). However, actual preparation of disposal cavities will be adapted to concrete requirements as they arise. Standard legal regulations on the release of low-radioactive waste from the scope of the German Atomic Energy Act would enable further reduction of the volume of waste to be disposed.

Central disposal in mined geological repositories is, in view of Germany's relatively large nuclear power program, both appropriate and necessary. In contrast to surface disposal facilities, they are capable of receiving all long-lived radionuclides. Multinational or European solutions would be advantageous, if appropriate and comparable safety standards are given. A system for an evenly balanced distribution of radwaste, which may be necessary for political reasons, in accordance with a generally-applied ALARA principle (ALARA - as low as reasonably achievable) would have to be planned on a broader industrial basis, and not merely limited to the waste disposal sector. Near-surface disposal is possible in principle for limited inventories of short-lived radioactive waste.

Political or ideological influences conflict with the ALARA principle of radiological protection where they lead to additional radiation exposure and costs.

Reduced conservatism in safety analyses as a result of the increasing adoption of probabilistic methods in the derivation of disposal conditions is necessary from a radiological protection standpoint. Hypothetical radiation exposure levels, calculated for improbable scenarios and long periods using unreliable or impossible forecasts, cannot be used for specifying requirements which lead to a real increase in exposure at this point in time.

The scope of waste product control must strike a balance between the safety benefits arising from it and the risk associated with the control actions.

A graded licensing process with less detailed specifications and more responsibility for the licenseholder would be better-suited to the long-term operation of repositories.

## 1 Ist es erforderlich, ein Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle ständig zur Verfügung zu haben? Besitzt eine vorübergehende Zwischenlagerung sowohl für schwach- und mittelradioaktive Abfälle als auch für hochradioaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente Nachteile?

### 1.1 Schwach- und mittelradioaktive Abfälle

Schwach- und mittelradioaktive Abfälle fallen ständig an. Es bietet sich an, diese gleichermaßen kontinuierlich endzulagern, soweit keine eingeschränkte oder uneingeschränkte Freigabe aus dem Geltungsbereich des Atomrechts in Betracht kommt. Nur dadurch werden eine erneute Handhabung dieser Abfälle und damit zusätzliche Strahlenexpositionen und Kosten vermieden. Dies betrifft sowohl die Handhabung im Zwischenlager als auch den Transport. Verpackungen von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen sind so ausgelegt, daß sie in einem Endlager keine Barrierenfunktion im Hinblick auf die Langzeitsicherheit haben. Diese Funktion übernehmen andere technische oder geologische Barrieren. In Zwischenlagern und Landessammelstellen wie auch bei der Handhabung während des Einlagerungsprozesses in einem Endlager ist jedoch eine intakte Verpackung erforderlich. Bei unbestimmt längerer Zwischenlagerung kann dies allerdings nicht in jedem Fall auf Dauer gewährleistet werden (z.B. Behälterkorrosion). Zwischenlager sind von ihrer Konzeption her nicht für eine längere Aufnahme der Abfälle ausgelegt und besitzen deshalb keine Langzeit-Sicherheitsbarrieren. Wenn ständig ein Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle zur Verfügung steht und betrieben wird, kann dies damit auch zur Erhöhung der Akzeptanz für die Entsorgungsaufgaben in der Öffentlichkeit beitragen.

Eine Zwischenlagerung verschiebt die Endlagerung nur, ersetzt sie jedoch nicht dauerhaft. Darüber hinaus widerspricht eine Verschiebung der Endlagerung dem ethischen Prinzip, nach dem künftigen Generationen keine unangemessenen Lasten aufzuerlegen sind. Da in Deutschland Möglichkeiten gegeben und geplant sind (Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben, Konrad, Gorleben), um solche Lasten zu vermeiden, ist eine längere Zwischenlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle eindeutig als eine unangemessene Last zu bezeichnen.

### 1.2 Hochradioaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente

Abgebrannte Brennelemente und verglaste hochradioaktive Abfälle müssen in der Regel aus technischen Gründen zwischengelagert werden, bis ihre Wärmeabgabe eine Endlagerung zuläßt. Diese Zwischenlagerung ist durch die erhebliche Nachzerfallswärme bedingt und damit praktisch unvermeidbar. Die Dauer dieser Zwischenlagerung hängt von mehreren zu optimierenden Aspekten ab und kann sich unter Umständen über Jahrzehnte erstrecken. Ein solcher Aspekt ist z.B. die mögliche Lagerungsdichte im Endlager im Hinblick auf die maximal zulässige Temperatur des Wirtsgesteins.

## 2 Sollte bei den in Frage kommenden Endlagervarianten eine Lagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen gemeinsam mit hochradioaktiven Abfällen und abgebrannten Brennelementen erfolgen oder ist es aus Sicherheits-Gesichtspunkten besser, eine Trennung zu bevorzugen?

### 2.1 Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM)

Das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben ist nur für schwach- und mittelradioaktive Abfälle geeignet und genehmigt.

### 2.2 Endlager Konrad

Das Planfeststellungsverfahren für das Endlager Konrad wurde auf schwach- und mittelradioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung beschränkt. Bei dieser Anlage befinden sich in der Umgebung des Einlagerungsgesteins mächtige Tonschichten mit einem Wassergehalt von 10-20 %. Diese sollten keinen Temperaturen > 100 °C ausgesetzt werden, da sonst die Tonmineralien ihre Eigenschaften ändern können. Stark wärmeentwickelnde Abfälle müßten räumlich weit verteilt und damit unwirtschaftlich eingelagert werden. Aussagen zur Endlagerung stark wärmeentwickelnder Abfälle im Hartgestein finden sich auch in der Konzeptstudie GEISHA des Forschungszentrums Karlsruhe.

Die Bildung von Wasserstoffgas durch anaerobe Korrosion der Abfallbehälter und Abfälle in der Nachbetriebsphase muß vor allem bei schwach- und mittelradioaktiven Abfällen wegen deren relativ großen Volumens berücksichtigt werden. Diese Gasbildung stellt im Endlager Konrad kein Problem dar, da das Wirtsgestein eine ausreichend hohe Gasdurchlässigkeit besitzt.

### 2.3 Gorleben

In Gorleben ist eine Endlagerung hochradioaktiver Abfälle gemeinsam mit schwach- und mittelradioaktiven Abfällen vorgesehen. Vorrangig bei hochradioaktiven Abfällen und abgebrannten Brennelementen wird aufgrund der sich einstellenden höheren Temperatur das Kriechen des Salzes und damit das relativ schnelle Verschließen des jeweiligen Einlagerungshohlraumes genutzt. Daher kommt der geologischen Barriere Salz die Hauptbedeutung in Bezug auf die Sicherheit dieser Anlage vor allem in der Nachbetriebsphase zu.

Bei den schwach- und mittelradioaktiven Abfällen muß die Wasserstoffgasbildung durch anaerobe Korrosion nach Abschluß der Einlagerungshohlräume im Gegensatz zum Endlager Konrad besonders beachtet werden. Da es bei thermisch beschleunigtem Verschließen der Resthohlräume infolge des Salzkriechens zu nicht akzeptierbaren hohen Gasdrücken kommen kann, ist technologisch sicherzustellen, daß der Wärmeeintrag durch die hochradioaktiven Abfälle und abgebrannten Brennelemente einerseits und die Gasbildung durch das große Volumen der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle

andererseits sich möglichst wenig gegenseitig beeinflussen. Dies ist bei der zu entwickelnden Endlagerungstechnologie in Gorleben entsprechend zu berücksichtigen. Inwieweit dies möglich ist, muß noch geprüft werden. Als Alternative ist ggf. eine aufwendigere Konditionierung oder andersartige Verpackung der Abfälle zu untersuchen, bei der die Gasbildung eine untergeordnete Rolle spielt.

## 2 Wie verhält sich das Volumen des zu entsorgenden radioaktiven Abfalles zum Volumen der Endlager bzw. Endlagerprojekte in den in Frage kommenden Varianten ihrer Nutzung?

Bis zum Jahr 2080 werden unter der Annahme des Auslaufens der Kernenergienutzung und des Umgangs mit sonstigen radioaktiven Stoffen im bisherigen Umfang folgende Mengen radioaktiver Abfälle einschließlich der Abfälle aus der Stillegung der KKW erwartet:

- schwach- und mittelradioaktive Abfälle etwa 400.000 m³
- hochradioaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente etwa 50.000 m³

Bei Berücksichtigung von Reststoffen, die noch nicht konditioniert sind, und bei Annahme einer langfristigen Nutzung der Kernenergie ergeben sich größere Mengen.

Den Mengenangaben sind folgende Volumenangaben gegenüberzustellen, die den Kapazitäten des betriebenen Endlagers Morsleben, des geplanten Endlagers Konrad und des konzipierten Endlagers Gorleben entsprechen:

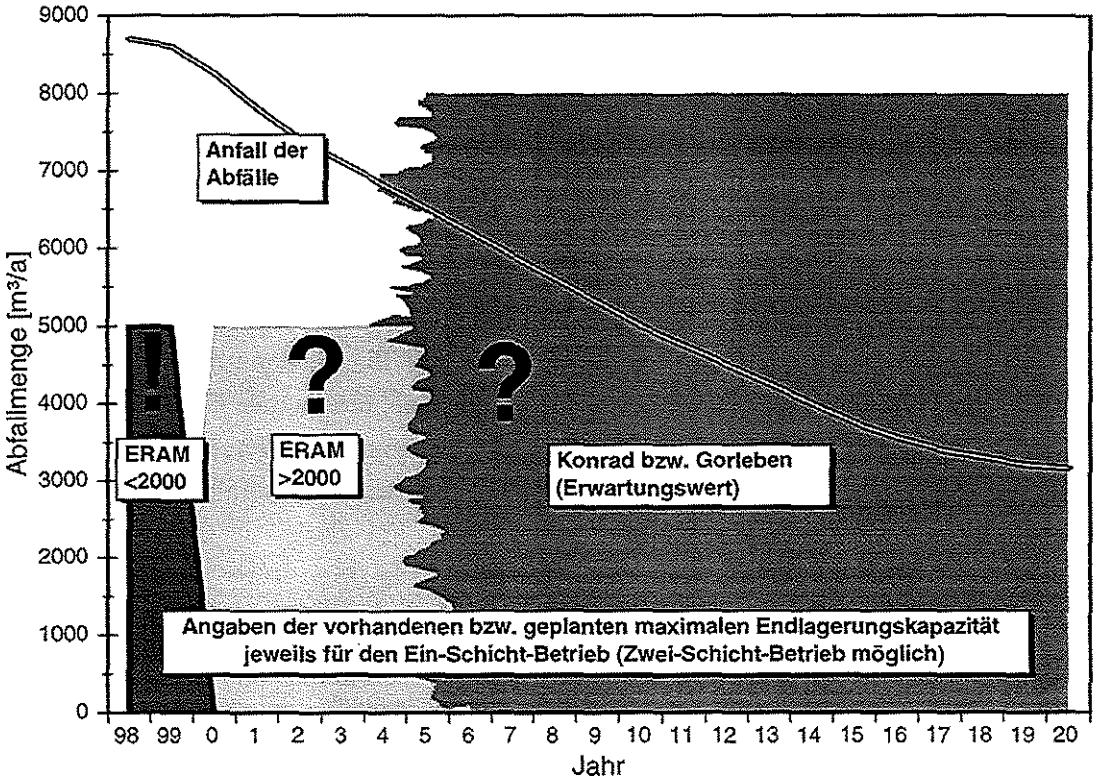
- ERAM (schwach- und mittelradioaktive Abfälle) 40.000 m³*) **)
- Konrad (schwach- und mittelradioaktive Abfälle) geplant bis zu 650.000 m³
- Gorleben (schwach-, mittel- und hochradioaktive Abfälle, abgebrannte Brennelemente planbar bis zu 1.000.000 m³

Die jährlich anfallenden Mengen für das o.a. Abfallszenario im Vergleich mit den maximalen jährlichen Kapazitäten der Endlager unter den oben diskutierten Randbedingungen sind in der Abbildung dargestellt.

---

*) Die Volumenangabe für das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben ist die zwischen dem Bund und den Abfalllieferern vertraglich vereinbarte Menge. Da für die Endlagersicherheit das Aktivitätsinventar und nicht das endgelagerte Volumen entscheidend ist, ist das unter technischen und Sicherheits-Gesichtspunkten mögliche Volumen größer.

**) zzgl. etwa 15000 m³ Abfälle, die vor der Wiederinbetriebnahme eingelagert wurden.




Der Vergleich zeigt, daß die Summe aus vorhandener, geplanter maximaler bzw. konzipierter maximaler Entsorgungskapazität für das Drei- bis Vierfache der o.a. Abfallmenge ausreichen würde, sofern die ca. 1 Mio m³ im Salzstock Gorleben nur den schwach- und mittelradioaktiven Abfällen zugerechnet werden. Die Frage, welcher Anteil davon für die hochradioaktiven Abfälle und die abgebrannten Brennelemente vorzusehen ist, bedarf noch der Prüfung. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, daß die tatsächliche Hohlraumerstellung in Konrad und Gorleben dem jeweiligen konkreten Hohlraumbedarf zeitlich angepaßt wird.

Einen nicht zu vernachlässigenden Einfluß auf die Volumenbilanz hat die eingeschränkte oder uneingeschränkte Freigabe schwach radioaktiver Abfälle aus dem Geltungsbereich des Atomrechts und deren Beseitigung oder Verwertung als konventionelle Abfälle. Eine solche Verfahrensweise wird bisher nur unzureichend genutzt, da die entsprechende einheitliche gesetzliche Basis fehlt.

## 4 Ist eine Konzeption, die zentrale Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle in ehemaligen Bergwerken und nicht in mehreren oberflächennahen Deponien vorsieht, sinnvoll und gemäß dem ALARA-Prinzip vertretbar?

Die Nutzung eines vorhandenen Bergwerkes als Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle ist vorteilhaft, da bereits ein hohes Maß an Kenntnissen über die geologische Struktur vorhanden ist und Kosten für eine Neuauffahrung entfallen. Bedingung ist jedoch, daß durch den vorangegangenen Bergbau die geologische Formation stabil geblieben ist.

Die Konzeption, Endlagerbergwerke im tiefen Untergrund für schwach- und mittelradioaktive Abfälle zu betreiben, ist vor allem für Abfallinventare mit hohen Anteilen an langlebigen Radionukliden sinnvoll. Deshalb hat Deutschland auf die Endlagerung im tiefen Untergrund orientiert*). In den übertägigen Deponien in Frankreich und Spanien sowie den oberflächennahen Endlagern in Schweden und Finnland ist das einlagerbare Inventar an langlebigen Radionukliden deutlich kleiner als z.B. im Endlager Konrad vorgesehen.

Das ALARA-Prinzip fordert die Abwägung des Vorteils einer Einsparung von Dosis gegen gleichzeitig auftretende Nachteile, u.a. auch Mehrkosten. Bei Abfallinventaren mit relativ hohen Anteilen an langlebigen Radionukliden ist eine Entsorgungskonzeption, die zentrale Endlagerbergwerke vorsieht, gemäß dem ALARA-Prinzip nicht ungünstiger als eine Konzeption von mehreren Deponien für Abfälle mit kurzlebigen Radionukliden und einem Tiefenendlager für Abfälle mit langlebigen Radionukliden und starker Wärmeentwicklung.

Bei reiner Betrachtung der Kosten sind mehrere Deponien möglicherweise günstiger als ein Endlagerbergwerk. Dafür würde eine Aufteilung des endzulagernden Inventars schwach- und mittelradioaktiver langlebiger Abfälle auf mehrere kleine oberflächennahe Endlager oder Deponien an diesen mehreren Standorten jedoch nach einigen hundert Jahren zu - wenn auch sehr geringen - Strahlenexpositionen in der Biosphäre führen. Ein Tiefenendlager für schwach- und mittelradioaktive langlebige Abfälle stellt dagegen eine ungleich bessere Isolation von der Biosphäre dar. Die Anforderungen an die Verarbeitung und Verpackung der Abfälle und damit die Kosten dürften bei Deponien vor dem Hintergrund der Begrenzung der Strahlenexposition zumindest in gleicher Höhe - wenn nicht höher - verglichen mit denen für ein Endlagerbergwerk liegen.

Für begrenzte Inventare kurzlebiger radioaktiver Abfälle ist eine Endlagerung in tiefen geologischen Formationen aus sicherheitstechnischer Sicht nicht unbedingt erforderlich. Dies betrifft im wesentlichen Abfälle aus den Bereichen Technik, Forschung und Medizin, die nicht kurzlebig genug für eine Abkling-Zwischenlagerung mit anschließender Freigabe sind. Für diese Kategorie von Abfällen würde sich wegen geringerer Kosten eine oberflächennahe, überwachte Endlagerung anbieten, die nach einer befristeten Zeit keinen Restriktionen mehr unterworfen sein muß. Ob die Gesamtkosten für die Endlagerung aller Abfälle dadurch niedriger werden, ist fraglich.

Zusätzliche Kosten, die nicht sicherheitstechnisch begründet sind, entstehen vor allem durch blockierende politische oder ideologische Einflüsse bei der Realisierung von Endlagern. Solche Einflüsse widersprechen dem ALARA-Prinzip des Strahlenschutzes in zweifacher Hinsicht. Durch eine unbestimmt längere Zwischenlagerung infolge erforderlich werdender zusätzlicher Handhabungs- und Konditionierungsschritte treten zusätzliche Strahlenexpositionen und Kosten auf. Darüber hinaus widersprechen solche Einflüsse dem Strahlenschutzgrundsatz der Vermeidung von Strahlenexpositionen. Über Mehrkosten hinaus treten beträchtliche weitere Kosten für das Offenhalten bereits erkundeter Standorte oder bereits in Betrieb befindlicher Endlager auf: So haben das Offenhalten von Konrad bisher oder der Stillstand des Endlagers Morsleben in den Jahren 1991 bis 1994 jeweils zu jährlichen Kosten von ca. 30 Mio DM geführt.

---

*) Entsorgungsbericht der Bundesregierung an den Bundestag.
Bundestags-Drucksache 1/1632 vom 13.01.1988.

Aus Gründen der praktischen Vernunft erscheint es sinnvoll, bei der Endlagerung in größeren zentralen Endlagern nicht nur die Abfälle aus dem eigenen Land in die Überlegungen einzubeziehen. Dabei sind Nachteile für das Entsorger-Land wie mehr Transporte und Sicherungsfragen im Sinne eines allgemeineren ALARA-Prinzips zu berücksichtigen. Um einen aus politischen Gründen gegebenenfalls erforderlichen Lastenausgleich zwischen den beteiligten Staaten zu erreichen, wäre zu untersuchen, welche Ausgleichsmöglichkeiten sich anbieten. So sollte eine Bewertung einer Europäisierung oder Internationalisierung der Entsorgung von radioaktiven Abfällen nicht nur diesen Aspekt, sondern auch andere Entsorgungspraktiken und industrielle Anlagen in die Untersuchungen einbeziehen, um die Fragen eines Ausgleichs zu lösen. Ein solches Vorgehen wäre geeignet, die Akzeptanz der Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Bevölkerung unter Beachtung der detaillierten und mit sehr hohem Sicherheitsstandard versehenen Vorgehensweise in der Kerntechnik zu erhöhen.

## 5 Sind extrem konservative Endlagerungsbedingungen dem Strahlenschutz dienlich?

Die wesentlichen Anforderungen an die Konditionierung der Abfälle und das Inventar von Endlagern werden mittels mehrfach konservativer deterministischer Methoden aus der Betrachtung von Störfällen, dem Wärmeeintrag in das Wirtsgestein, der Kritikalitätssicherheit und in geringerem Umfang aus Sicherheitsanalysen für den Normalbetrieb abgeleitet. Es wäre eine stärkere Einbeziehung probabilistischer Methoden sinnvoll, weil dadurch die tatsächlichen Randbedingungen der Eigenschaften der Abfälle und ihrer Handhabung realistischer berücksichtigt würden. Dies würde zu höheren zulässigen Aktivitätskonzentrationen in den Abfällen und somit zu einem geringeren Handhabungsaufwand sowie zu einer höheren Ausnutzung eines Endlagers führen. Eine solche Vorgehensweise entspricht allerdings nicht den derzeitigen deutschen Sicherheitsstrategien.

Für die Langzeitsicherheit werden mögliche Strahlenexpositionen in der Nachbetriebsphase nach dem Stand von Wissenschaft und Technik berechnet. Diese liefern, soweit nur von den geologischen Barrieren Kredit genommen wird, lediglich Aktivitätsbegrenzungen und keine sonstigen Anforderungen an Abfallgebinde. Die dazu durchzuführenden Berechnungen sollten möglichst auf realistischen Annahmen beruhen. Strahlenexpositionen, die für sehr unwahrscheinliche Szenarien oder für Zeiträume berechnet werden, zu denen keine verläßlichen oder sinnvollen Aussagen mehr gemacht werden können (z.B. ≈ 1 Mio a), sollten dabei nicht betrachtet werden. So führen z.B. bei Konrad die für 1 Mio a und mehr durchgeführten Langzeitsicherheitsanalysen zu restriktiven, nicht gerechtfertigten Inventarsbeschränkungen für I-129, U, Ra und Th, um die Einhaltung des Schutzzieles von 0,3 mSv/a Strahlendosis in der Umgebung auch für diese fernen Zeiträume formal mit konservativen Modellierungen rechnerisch belegen zu können. Es ist aber nicht im Sinne des Strahlenschutzes, geringe hypothetische Dosisreduzierungen in extrem ferner Zukunft mit realen Mehrdosen in der Gegenwart zu erkaufen. Diese zusätzlichen realen Strahlenexpositionen in der Gegenwart entstünden infolge des Mehraufwandes für die notwendige Zwischenlagerung und Handhabung der durch die Inventarsbeschränkungen von der Endlagerung ausgeschlossenen Abfälle.

Die restriktiven Aktivitätsbegrenzungen beim Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben basieren auf einem Szenario der Verfüllung des Endlagers ohne größere Rückhaltewirkung und berücksichti-

gen außerdem die Begrenzungen, die in der Dauerbetriebsgenehmigung des Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben enthalten sind.

## 6 Rechtfertigt eine intensive Produktkontrolle eine damit verbundene erhöhte Strahlenexposition?

Die Produktkontrolle überprüft die Einhaltung der Endlagerungsbedingungen, d.h. insbesondere der Anforderungen an die Abfallprodukte und Verpackungen.

Eine Produktkontrolle ist stets mit realen Strahlenexpositionen verbunden. Sie sollte daher in einem solchen Maße durchgeführt werden, daß die dabei applizierte Dosis für das Personal in einem vernünftigen Verhältnis zu der real auftretenden oder nur hypothetischen Dosis im Endlager oder seiner Umgebung steht, die aus eventuellen, nicht erkannten Unzulänglichkeiten der endgelagerten Abfälle entstehen könnte. Es liegt im Sinne des Strahlenschutzes, die realen Strahlenexpositionen und nicht die sehr unwahrscheinlichen Dosen zu begrenzen (ALARA-Prinzip). D.h., daß die Intensität und der Umfang der Produktkontrollmaßnahmen die Verhältnismäßigkeit zu der dabei entstehenden theoretischen Risikominderung wahren müssen.

## 7 Ist das atomrechtliche Genehmigungsverfahren in Deutschland (Planfeststellungsverfahren und damit verbundene Änderungsverfahren) in der Lage, einen praktischen Betrieb von Endlagern im Sinne eines optimalen Strahlenschutzes und angemessener Kosten zu ermöglichen?

Ein Planfeststellungsverfahren mit detaillierten Festlegungen über Jahrzehnte im voraus ist nicht praktikabel, vor allem bei der geforderten Beachtung des in diesen Zeiträumen jeweils aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik.

Ein gestuftes Verfahren, das, wie in der Schweiz oder vormals in der DDR, nach Standort-, Errichtungs-, Betriebs- und Stillegungsgenehmigung unterscheidet, ist besser geeignet, einen praktischen Betrieb von Endlagern im Sinne eines optimalen Strahlenschutzes und angemessener Kosten zu ermöglichen, weil die Erfahrungen aus der jeweils vorangegangenen Genehmigungsstufe bei den weiteren Stufen mit einfließen.

In einer Genehmigung sollte nach Möglichkeit immer nur das aus sicherheitstechnischer Sicht unbedingt Notwendige geregelt und damit festgeschrieben sein, um die bei der relativ langen Betriebszeit von Endlagern gegebenenfalls notwendigen Änderungen unverzüglich vornehmen zu können. Generell sollte in der Genehmigung immer dann die Verantwortung des Betreibers oder Genehmigungsinhabers im Vordergrund stehen, wenn es um die konkrete Ausgestaltung des gesetzlich zulässigen Genehmigungsspielraumes geht.

**Anlage 1**

1. **Nachteile der Zwischenlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle gegenüber deren Endlagerung:**

**Sicherheit beim Betrieb:**

- Zwischenlagerung verursacht unnötige Strahlenexpositionen durch nochmalige Handhabung und mehr Transportaufwand
- Erfahrungen in Morsleben und die Sicherheitsanalysen für Konrad zeigen, daß Endlagerung im Vergleich zu anderen Entsorgungsschritten zu nur sehr geringen Strahlenexpositionen führt

**Barrieren:**

In einem Zwischenlager fehlen die Barrieren, die ein Endlager im tiefen Untergrund allein schon durch die Natur bietet.
Für eine längere Zwischenlagerung müssen die Abfallgebinde selbst eine stärkere Barrierenwirkung haben.

**Minimierungsgebot:**

Zwischenlagerung schafft unnötige radioaktive Potentiale im Lebensbereich der Menschen

**Ethik:**

Zwischenlagerung bei gegebenen Möglichkeiten der Endlagerung verlagert heutige Probleme auf zukünftige Generationen und ist unakzeptabel, weil:

- Morsleben sofort weiter einlagern kann
- Konrad genehmigungsreif ist und innerhalb von 4 Jahren die Einlagerung übernehmen kann

**Anlage 2**

# FAZIT:

**Eine Verzögerung der Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle ist aus**

- **Strahlenschutzgründen**
- **ökonomischen Gründen und**
- **ethischen Gründen**

**nicht vertretbar!**

(Die Anlagen 1 bis 7 wurden aus dem AKE-Text nachträglich als Vortragsfolien erarbeitet.)

**Anlage 3**

**2. Gemeinsame oder getrennte Lagerung von LAW/MAW einerseits und HAW/BE andererseits?**

Gemeinsame Endlagerung derzeit noch nicht abschließend untersucht.

Bei getrennter Lagerung von
- LAW/MAW in Konrad (Kluftgestein) und
- HAW/BE in Gorleben (Salz)

ist jede Methode für sich schlüssig, d.h.:

⇒ Für Endlagerung von LAW/MAW in Konrad Nutzung
- der Isolation durch dichte Deckgebirgsschicht und
- der Stagnation von möglichem Grundwasser sowie
- der Gasspeichermöglichkeit im porösen Wirtsgestein

⇒ Für Endlagerung von HAW/BE in Gorleben Nutzung
- des dichten Einschlusses im Salz

**Anlage 4**

**3. Wie verhält sich das Volumen des anfallenden Abfalles zum Volumen der deutschen Endlagerprojekte?**

- ca. 400.000 m³ LAW/MAW-Abfall
- 650.000 m³ maximale Konrad-Kapazität

Diese Mengenbilanz geht auf, zumal der Konrad-Ausbau auf die aktuelle Menge angepaßt werden kann.

- ca. 50.000 m³ HAW/BE-Abfall

Dafür ist Gorleben konzipiert, aber es sollte darüberhinaus weiterhin für die gemeinsame Endlagerung von HAW/BE + LAW/MAW erkundet werden.

Inwieweit die maximale Konrad-Kapazität für LAW/MAW ausgebaut wird oder Gorleben auch für LAW/MAW genutzt wird, muß zukünftigen Entscheidungen (z.B. bzgl. einer eventuellen Internationalisierung der Entsorgung) vorbehalten bleiben.

## 4. Ein zentrales Endlager in einem ehemaligen Bergwerk oder mehrere Oberflächen-(nahe)-Deponien?

Ein relativ großes Inventar an längerlebigen Nukliden wie z.B. in Deutschland erfordert die Tiefenlagerung.

Länder mit Oberflächen-(nahen)-Deponien planen außerdem ein Tiefenlager (Schweden, Finnland, Frankreich). Dadurch werden die Gesamtkosten gegenüber dem deutschen Konzept nicht geringer.

Strahlendosen in der Umgebung sind bei Oberflächen-(nahen)-Deponien in relativ kurzer Zeit schon nach wenigen hundert Jahren zu erwarten.

Die relativ hohen Kosten der deutschen Projekte sind vor allem durch die politische Blockade entstanden.

Eine Kostenverringerung wäre vor allem durch eine Internationalisierung von Umweltschutz-Projekten, wie z.B. Endlager zu erreichen.



## 5. + 6. Dienen konservative Endlagerungsbedingungen und eine intensive Produktkontrolle dem Strahlenschutz?

Bei isolierter Betrachtung nur des Endlagers: **Ja!** Aber:

Konservative Endlagerungsbedingungen bzgl. der Aktivität führen zu:

- höherem Handhabungsaufwand bei der Konditionierung,

  **d.h. höhere Strahlendosen!**
- geringerer Auslastung vorhandener Endlager, d.h. Zwischenlagerung,

  **d.h. höhere Strahlendosen!**
- höheren Kosten.

D.h. wenn für ein zu betrachtendes Endlager zu konservative Szenarien angesetzt werden, die dann wiederum zu konservativen Endlagerungsbedingungen führen, verursacht dies höhere Strahlendosen und Kosten in der Realität.

Eine zu intensive Produktkontrolle führt zu:

- höherem Handhabungsaufwand bei der Kontrolle,

  **d.h. höhere Strahlendosen!**
- höheren Kosten.

**In diesem Gesamtzusammenhang gesehen sind zu konservative Endlagerungsbedingungen und eine zu intensive Produktkontrolle dem Strahlenschutz nicht dienlich!**

**7. Ermöglicht das Planfeststellungsverfahren einen praktischen und effektiven Betrieb von Endlagern und einen optimalen Strahlenschutz?**

Alle deutschen Endlager und Endlagerprojekte sind mehrstufig ausbaubar. Dem sollte auch das Genehmigungsverfahren angepaßt werden.

Vorteile eines gestuften Genehmigungsverfahrens:

- Sicherheit kann für jede Stufe einzeln und damit sehr realistisch nachgewiesen werden.
- Neuester Stand von Wissenschaft und Technik kann bei jeder Genehmigungsstufe aktuell einfließen.

# SICHERHEITS- UND KOSTENASPEKTE BEI DER ENTSORGUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE IN DEUTSCHLAND - SCHWERPUNKT ENDLAGERUNG

# ASPECTS OF SAFETY AND COSTS FOR RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT IN GERMANY - FOCUS ON FINAL DISPOSAL

**D. Ehrlich (Bundesamt für Strahlenschutz)**


## Zusammenfassung

Es werden die verschiedenen Endlagerkonzepte auf dem Festland, die in Deutschland verfolgt oder diskutiert werden, im Hinblick auf ihre sicherheitstechnischen Merkmale und ihre Verwendungsmöglichkeiten charakterisiert. Daran schließt sich eine vergleichende sicherheitstechnische Bewertung unter verschiedenen Gesichtspunkten an. Diese umfaßt neben rein radiologischen auch nichtradiologische Fragestellungen wie Abfallaufkommen, Endlagerkapazität, Bedeutung der Gasbildung , Chemotoxizität u.a.m. Damit soll einerseits dem Verständnis des Strahlenschutzes als lediglich eines Teils eines breiten Spektrums von Schutzmaßnahmen und andererseits dem Gesamtzusammenhang, in dem alle Fragestellungen miteinander verknüpft sind, Rechnung getragen werden.

Nach einem Aufzeigen von Konservativitäten in den Sicherheitsanalysen (Tiefenendlager) und betrieblichen Erfahrungen sowie einem Überblick über die Kosten der einzelnen Entsorgungsschritte wird versucht, auf der Basis einer breiter angelegten Optimierung einige Schlußfolgerungen im Hinblick auf die Weiterentwicklung speziell der Endlagerung radioaktiver Abfällen in Deutschland zu ziehen.

## Summary

The different concepts for final disposal on land pursued or discussed in Germany are characterized with regard to their safety related aspects and their possibilities of application. This is followed by a comparative assessment under different radiological and non radiological aspects as waste arising, disposal capacity, gas generation, chemical toxicity etc. By this, on the one hand, radiation protection as only one part of a broad spectrum of protection measures, and , on the other hand, the whole context in which all these questions are involved, is taken into account.

After describing the reserves in the safety analyses (repositories in deep geological formations) and the experiences gained during operation and after giving an overview on the costs of the different steps of waste management, it is attempted on a broader optimization basis to draw some conclusions with respect to further development of final disposal of radioactive waste in Germany.

Inhalt

**I. Einleitung**

**II. Endlagerkonzepte (Festland) und ihre Sicherheitsaspekte**

**II. 1 Tiefe geologische Formationen**
II 1.1 Salz (GORLEBEN)
II 1.2 Klüftiges Gestein (KONRAD)

**II. 2 Alternative Endlagerkonzepte**
II 2.1 Oberflächennahe Endlager
II 2.2 Zwischenlager zum Abklingenlassen
II 2.3 Deponie oder Verbrennungsanlagen für konventionelle Abfälle
II 2.4 Umwelt

**III. Sicherheitstechnische Bewertung der Endlagerkonzepte**

**III.1 Aktivitätsbegrenzungen der Endlagerkonzepte**
**III.2 Abfallaufkommen, Endlagerkapazität, Freigabe**
**III.3 Strahlung und Aktivitätsfreisetzung (Betriebsphase), Wärmeeintrag**
**III.4 Gasbildung und Gastransport**
**III.5 Langzeitsicherheit**
III 5.1 Schutz des Menschen vor den radiologischen Auswirkungen
III 5.2 Schutz der Umwelt vor den radiologischen und konventionellen Auswirkungen

**IV. Betriebliche Erfahrungen und Abbau von Konservativitäten**

**IV.1 Bestimmungsgemäßer Betrieb (KONRAD, ERAM)**
**IV.2 Störfälle (KONRAD, ERAM)**
**IV.3 Wärmeeintrag (KONRAD)**
**IV.4 Langzeitsicherheit (Gesamtinventar, KONRAD)**

**V. Kosten**

**V.1 Konditionierung**
**V.2 Zwischenlager**
**V.3 Produktkontrolle**
**V.4 Endlager**

**VI. Ergebnisse und Schlußfolgerungen**

**VII. Zitierte Literatur**

**Anlagen**
**Abbildungen**

## I. Einleitung

In diesem Beitrag sollen vorrangig die wichtigsten Sicherheitsaspekte bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle behandelt werden, wie sie sich heute darstellen. In diesem Zusammenhang wird vor allem auf die Gesamtdarstellung der mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle verknüpften Fragestellungen /RÖT 91/ und auf den Beitrag /ARS 97/ verwiesen, welcher sich speziell mit den neueren Entwicklungen in der Sicherheitsbewertung von Endlagern befaßt. In vorliegendem Beitrag wird im wesentlichen auf die deutschen Verhältnisse zurückgegriffen. Soweit das nicht möglich ist, werden auch Daten aus dem Ausland herangezogen.

Das Thema "Sicherheitsaspekte" wird allerdings nicht ausschließlich auf radiologische Fragestellungen beschränkt. Damit soll dem Verständnis des Strahlenschutzes als lediglich eines **Teils** eines breiten Spektrums von Schutz-Maßnahmen Rechnung getragen werden. So werden neben radiotoxischen auch chemotoxische Stoffe und neben Aktivitäten auch Mengen und Volumina sowie Kosten behandelt. Über das verallgemeinerte ALARA-Prinzip sind diese Fragen alle miteinander verknüpft. Deshalb wird am Schluß neben einer Zusammenfassung ein Ausblick gegeben, welche Schlußfolgerungen unter ALARA-Gesichtspunkten im Hinblick auf die Weiterentwicklung der Entsorgung gezogen werden sollten.

## II. Endlagerkonzepte (Festland) und ihre Sicherheitsaspekte

### II.1 Tiefe geologische Formationen

II.1.1 Salz (GORLEBEN) (Anl. 1; Abb. 1-3)

Die übertägige Standorterkundung wurde 1979 begonnen und 1985 im wesentlichen abgeschlossen. Nach anschließendem Abteufen zweier Schächte erfolgt derzeit die untertägige Erkundung.

Der Salzstock Gorleben weist eine für einen Salzstock typische Struktur von gefalteten Gesteinsformationen auf und ist von einem komplexen, grundwasserführenden Deckgebirge überlagert. Der Salzstock selbst verfügt in seinem Inneren über größere zusammenhängende Partien reinen Steinsalzes. Diese sind seit 250 Millionen Jahren von außen durch Grundwässer nicht beeinflußt worden.

Bei der Endlagerung von Abfällen in Salzformationen kommt es darauf an, die besonders unter Wärmeentwicklung verstärkt auftretenden plastischen Eigenschaften des Steinsalzes für den dichten Einschluß der Abfälle zu nutzen. Dabei muß allerdings gewährleistet sein, daß es - durch wärmebedingte oder gasdruckbedingte Spannungsumlagerungen im Gebirge - nicht zu Klüften oder Rissen und somit zu potentiellen Wegsamkeiten zu wasserführenden Schichten kommt (Referenzszenarium, **"dichter Einschluß"**). Um die Einhaltung der radiologischen und nichtradiologischen Schutzziele auch für unwahrscheinlichere Szenarien zu gewährleisten, bedarf es der sehr genauen Erkundung des Salzstockes. Nach diesen Kenntnissen richtet sich das Abschlußkonzept, das für solche **unwahrscheinlichen Szenarien** - so sie zu unterstellen sind - die erforderlichen **Freisetzungsbegrenzungen** bewirkt.

Bei den bisherigen Erkundungsmaßnahmen haben sich keine Befunde gezeigt, die gegen eine Nutzung des Salzstockes als Endlager für stark wärmeentwickelnde Abfälle sprechen.

Auf die Endlager bzw. Versuchsendlager im Salz ERAM und ASSE wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen. Auf die generell im Salz besonders relevanten Probleme der Gasbildung, auf die Bedeutung der chemotoxischen Bestandteile und auf die Nachweisproblematik für lange Zeiträume wird unter III. eingegangen.

II.1.2 Klüftiges Gestein (KONRAD) (Anl. 2; Abb. 4-5)

Das Eisenerzbergwerk KONRAD einschließlich der beiden Schächte wurde im Zeitraum 1957 bis 1962 aufgefahren. Der Förderbetrieb erfolgte von 1960 bis 1976. Die während der Abteuf- und Auffahrarbeiten gewonnenen grundlegenden standortspezifischen Kenntnisse wurden im Zeitraum 1976 bis 1982 durch zusätzliche Erkundungsmaßnahmen im Hinblick auf eine mögliche Endlagerung radioaktiver Abfälle vervollständigt.

Der Einlagerungshorizont ist eine nur einige zehn Meter mächtige Eisenerzformation (Korallenoolith) in ca. 1000 m Tiefe, eingebettet in eine als gering wasserdurchlässig anzusehende Gesteinsformation (Oxford). Diese erstreckt sich von Salzgitter aus in nordöstlicher Richtung über ca. 30 km bis in den Gifhorner Raum. Auf der gesamten Ausdehnung ist diese Formation von mehreren hundert Meter mächtigen Tonschichten überlagert, die einen dichten Abschluß zur darüberliegenden Biosphäre gewährleisten. Erst in ca. 30 km Entfernung vom Endlager kommt es zum Kontakt des Oxford mit oberflächennahen Grundwässern. Die im Oxford anstehenden Tiefengrundwässer (Formationswässer) stagnieren nach den heutigen Kenntnissen seit ihrer Entstehung vor ca. 160 Millionen Jahren (Bewegung weniger als 1 cm in $10^3$ Jahren oder weniger als 100 m in $10^7$ Jahren). Schadstoffe können nur über diffusive Transportprozesse in das oberflächennahe Grundwasser gelangen. Modellmäßig wurde im Planfeststellungsverfahren allerdings konservativ eine Tiefengrundwasserbewegung angesetzt. Danach fließt Grundwasser aus dem Einlagerungsbereich in $3{,}3 \cdot 10^5$ Jahren bis an die Oberfläche.

Für die Betriebsphase ist die Einhaltung der radiologischen Schutzziele gemäß §§ 44, 45, 49, 28(3) StrlSchV sowie der Ausschluß von Ansammlungen zündfähiger Gasgemische in größeren zusammenhängenden Hohlräumen (hydraulisch abbindender Pumpversatz) zu gewährleisten. Für die Betriebs- und Nachbetriebsphase waren die Kritikalitätssicherheit und die Begrenzung der Temperaturerhöhung der Endlagerformation infolge der Wärmeproduktion der Abfälle auf 3 K nachzuweisen. In der Nachbetriebsphase wurde im Planfeststellungsverfahren die (rechnerische) Einhaltung der Dosisgrenzwerte des § 45 StrlSchV über Zeiträume von einigen $10^7$ Jahren (!) sowie eine Sicherheitsbetrachtung über das Inventar an chemotoxischen Bestandteilen (Grundwasserverordnung /GWV 97/) gefordert. Aus den zuletzt genannten Sicherheitsbetrachtungen ergaben sich keine gesonderten Anforderungen an die Abfallgebinde. Aus den übrigen Anforderungen ergaben sich nuklidspezifische Aktivitätsbegrenzungen für die einzelnen Abfallgebinde, für mit Abfällen befüllte, aber noch unversetzte Einlagerungsbereiche sowie für das Gesamtinventar.

Eine Bewertung der unterschiedlichen Anforderungen wird in Kap. III. vorgenommen. Aufgrund der Klüftigkeit und Durchlässigkeit des Oxford (ca. 100 m mächtig, 2-3 km breit, ca. 30 km lang, s.o.) spielt die Gasproblematik in der Nachbetriebsphase keine Rolle. Es können sich keine unzulässig hohen Drücke aufbauen; die Radioaktivität in der Gasphase (C-14) verteilt sich, so daß niedrige Konzentrationen resultieren.

## II.2 Alternative Konzepte (prinzipiell als Ergänzung zur Tiefenlagerung)

II.2.1 Oberflächennahe Endlager (Anl. 3, Abb. 6)

Solche Endlager werden z.B. in Frankreich, England, USA betrieben. Sie bewirken eine Isolierung der Abfälle von der Biosphäre für einige 100 Jahre.

Sie sind wie eine besonders gute Deponie aufgebaut, indem zusätzliche Barrieren vorgesehen sind (Abfallverpackung, Einbetonierung) und das ggf. in einem Drainagesystem anfallende Wasser kontrolliert freigegeben wird. Solche Endlager sind für Abfälle mit Radionukliden mit kurzen Halbwertszeiten bis ca. 50 a geeignet. Langlebige Radionuklide dürfen nur in geringen Konzentrationen enthalten sein. Das Endlager steht i. A. nach Abschluß noch einige 100 Jahre unter Aufsicht.

In Deutschland gibt es kein oberflächennahes Endlager. Bei einem unterstellten oberflächennahen Endlager in Deutschland wären als radiologische Schutzziele die betr. Dosisgrenzwerte der Strahlenschutzverordnung für die Betriebs- und Nachbetriebsphase einzuhalten. Aus diesen Dosisgrenzwerten wären standortspezifisch sekundäre Grenzwerte in Form von nuklidspezifischen Aktivitätskonzentrationen im Abfall herzuleiten. Die zu betrachtenden Expositionspfade ähneln denen, die bei der konventionellen Deponie (Kap. II. 2.3) zu beachten sind. Auf einige sekundäre Grenzwerte wird in Kap. III. eingegangen.

II.2.2 Zwischenlager (oberirdische Gebäude) zum Abklingenlassen

Die Isolierung der Abfälle (durch ihre Verpackung) beträgt maximal einige 10 Jahre. Solche Lager sind geeignet für schwachradioaktive Abfälle, deren Aktivität in dieser Zeit auf unbedenkliche Werte abklingt (Halbwertszeiten bis ca. 10 a; z.B. Cs-134, Co-60, S-35, eventuell H-3). Anschließend kann eine Freigabe aus der Strahlenschutzüberwachung erfolgen (vgl. II.2.3, II. 2.4). Die Technik des Abklingens wird z.B. in Krankenhäusern oder in der medizinischen Forschung, aber auch in der Kerntechnik (z.B. Zwischenlager Nord) praktiziert. Wichtig ist, daß keine Vermischung mit größeren Mengen längerlebiger Radionuklide vorliegt.

II.2.3 Deponie oder Verbrennungsanlagen für konventionelle Abfälle (Anl. 4 )

Eine solche Deponie weist nur für eine sehr begrenzte Zeit eine Isolation vom Grundwasser auf und bedarf vor allem keiner Radioaktivitätsüberwachung. Daher können dort nur radioaktive Abfälle mit einer sehr geringen Aktivitätskonzentration oder Aktivität endgelagert werden. Sie müssen behördlich freigegeben werden ("bedingte oder eingeschränkte Freigabe").

Diese Freigabe, die eine "Freigabe zur Beseitigung" im Sinne des Kreislaufwirtschafts- und Abfall-Gesetzes (KWA 95) dargestellt, basiert (wie die uneingeschränkte Freigabe) auf dem de-minimis-Konzept. Eine stoffliche Verwertung oder Wiederverwendung der Stoffe muß ausgeschlossen sein.

In Deutschland hat die SSK kürzlich /SSK 98/ für ein "abdeckendes Szenario Deponie/Verbrennungsanlage" (vgl. Anlage 4) aus dem Schutzziel 10 µSv/a nuklidspezifische Sekundär-Grenzwerte für die spezifische Aktivität abgeleitet. Auf diese Werte wird in Beispielen in Kap. III.1 eingegangen.

II.2.4 Umwelt (Anl. 4)

Man kann die Umwelt als "Endlager" für radioaktive Substanzen mit äußerst geringen Aktivitätskonzentrationen bzw. Aktivitäten ansehen, für deren Handhabung, Verwendung oder Verwertung es keinerlei Einschränkungen gibt. Sofern die radioaktiven Substanzen vorher einer atomrechtlichen Aufsicht unterlagen, müssen sie behördlich zum uneingeschränkten Umgang freigegeben werden ("bedingungslose oder uneingeschränkte Freigabe").

Die "Sicherheitskonzeption" besteht darin, daß bei der uneingeschränkten Freigabe aus der atomrechtlichen Aufsicht diese Stoffe zu einer vernachlässigbaren zusätzlichen Dosis führen (sog. de-minimis Konzept, 10 µSv/a Effektivdosis für eine Einzelperson pro "Anwendungsbereich" = bedingungslose Freigabe hier). An die stoffliche Beschaffenheit der Feststoffe werden keine Anforderungen gestellt.

In Deutschland hat die SSK kürzlich /SSK 98/ für ein "abdeckendes Szenario" (vgl. Anlage 4) aus dem Schutzziel 10 µSv/a allgemein gültige, nuklidspezifische Sekundär-Grenzwerte für die spezifische Aktivität abgeleitet. Auf diese Werte wird in Beispielen in Kap. III. eingegangen.

## III. Sicherheitstechnische Bewertung der Endlagerkonzepte

### III.1 Aktivitätsbegrenzungen der Endlagerkonzepte (Anl. 5)

In Anlage 5 sind einige aus den Sicherheitsanalysen der jeweiligen Endlagerkonzepte berechnete Aktivitätsbegrenzungen aufgeführt. Dabei ist als erstes zu beachten, daß bei den Freigabewerten (Spalten 2 und 3; Schutzziel 10 µSv/a) sowie bei den oberflächennahen Endlagern (Spalten 4 und 5) das Schutzziel bereits bei Ausschöpfung der Aktivitätsbegrenzung für ein Radionuklid erreicht wird. Dagegen wird für die Tiefenendlager das (Langzeit-) Schutzziel von < 0,30 mSv/a bei Ausschöpfung der Begrenzungen aller langzeitrelevanter Radionuklide erreicht. Des weiteren ist zu beachten, daß ein Tiefenendlager i.a. deutlich mehr radioaktive Abfälle aufnehmen kann (KONRAD) als ein oberflächennahes Endlager, eine konventionelle Deponie bzw. - de facto - die Umwelt bei der bedingungslosen Freigabe.

Bei Berücksichtigung dieser beiden Gesichtspunkte wird die **Zunahme der einlagerbaren Aktivität von der Freigabe über die oberflächennahe Endlagerung bis zur Tiefenendlagerung deutlich.** Auffällig sind allerdings die relativ niedrigen Werte für die langlebigen Radionuklide I-129, U-238, Th-232 bei KONRAD. Die Ursache liegt in einer extrem konservativen Sicherheitsanalyse, auf die in Kap. IV. 4 eingegangen wird. Für die Entsorgung der übrigen, weniger langlebigen Radionuklide wie etwa H-3, Co-60, Sr-90, Cs-137 richtet sich der Verbleib allerdings nicht nur danach, ob ihre Konzentration im Abfall genügend niedrig ist, sondern auch danach, in welchem Umfang langlebige Radionuklide beigemischt sind. Beispiele für "einfache" Entsorgungswege werden im folgenden Kapitel gegeben.

## III.2 Abfallaufkomen, Endlagerkapazität, Freigabe (Anl. 6)

Verstärkt wird in letzter Zeit das vorhandene bzw. geplante Endlagervolumen in Deutschland (ERAM, KONRAD, GORLEBEN) vor dem Hintergrund des offenbar niedriger ausfallenden Abfallvolumens und der damit einhergehenden Kostensteigerung pro Abfallvolumeneinheit (vgl. Kap. V) diskutiert. Unter der Annahme des Auslaufens der derzeitig in Betrieb befindlichen Kraftwerke und des Abfallaufkommens sonstiger Herkunft in Industrie, Medizin, Wissenschaft und Forschung in bisherigem Umfang /BFS 97a/ werden bis zum Jahre 2080 ca. 450.000 $m^3$ Abfall, davon etwas mehr als 10% stark Wärme entwickelnder Abfall erwartet (vgl.
Anlage 6). Dem steht eine durch Verträge festgelegte (ERAM), maximal geplante (KONRAD) bzw. maximal konzipierte (GORLEBEN) Endlagerkapazität von insgesamt über 1,6 Mill. $m^3$ gegenüber. Diese (3-4)-fache Endlagerkapazität bedarf jedoch der Kommentierung: Zum einen wird im geplanten Endlager KONRAD nicht von vornherein ein für 650.000 $m^3$ Abfall ausreichender Endlagerhohlraum, sondern immer nur soviel Hohlraum aufgefahren, wie aktuell erforderlich ist. Zum anderen bedarf es noch der Untersuchung, in welchem Umfang im Salzstock Gorleben, von dem nur die nordöstliche Hälfte zur Verfügung steht, Endlagervolumen tatsächlich für Abfälle mit geringer Wärmeentwicklung (LAW/MAW) zur Verfügung steht bzw. in welchem Umfang Volumen für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle erforderlich ist. Auf die für diese Untersuchungen entscheidende Bedeutung der Gasbildung wird in Kap. III. 4 eingegangen. Trotz dieser aus Endlagersicht wesentlichen Relativierung des Vergleichs Abfallaufkommen - Endlagerkapazität - Endlagerkosten pro Abfallvolumeneinheit (vgl. Kap. V) ist die Frage nach einer möglichst kostengünstigen Entsorgung für einige Abfallströme aus Abfallverursachersicht berechtigt. Im folgenden wird daher für einige Abfallströme einer möglichen Freigabe nach den neuen SSK-Kriterien /SSK 98/ nachgegangen.

Die Aktivitätsbegrenzungen zur bedingungslosen bzw. bedingten Freigabe (Kap. II. 2.4 und II. 2.3) gelten für kontaminierte oder aktivierte Feststoffe

- Anlagenteile, Gegenstände und Geräte,
- Stahl- und Eisenschrott,
- Nichteisenmetallschrott,
- Bauschutt und Baureststoffe,
- sonstige feste Baustoffe (z.B. Glas, Kunststoffe, Glaswolle, Asbest).

Dieses sind Bestandteile vieler leichtradioaktiver Abfallgebinde, wie sie derzeit ins ERAM angeliefert werden. In vielen Fällen werden die Abfälle ohne Konditionierung in ein Faß eingebracht. In solchen Fällen könnte eine Anwendung der o.g. Freigabekriterien direkt erfolgen. In allen anderen Fällen, in denen eine Fixierung, z.B. durch Zement, zur Vergrößerung des Abfallvolumens beiträgt, müßte zur Ermittlung der spezifischen Aktivität des eigentlichen Abfalles vorher die Masse des Fixiermaterials subtrahiert werden. Sofern solche Korrekturen unterbleiben, weil nicht genügend Informationsmaterial vorliegt, erhält man für den Anteil des prinzipiell freigebbaren Abfalls zu hohe Werte.

In Anlage 6 sind für die im Zeitraum 1994-1997 im ERAM eingelagerten leichtradioaktiven Abfälle die Ergebnisse bei einer einfachen , d.h. unkorrigierten Anwendung der o.g. Freigabekriterien aufgelistet. Danach hätten einige % der Abfälle, verteilt auf das gesamte Spektrum der Abfallablieferer, über eine Freigabe entsorgt werden können. Daß dies nicht erfolgt ist, hat

seine Gründe vermutlich in den nicht einheitlichen, d.h. restriktiveren Genehmigungen und Regelungen einzelnen Verursacher.

### III. 3 Strahlung und Aktivitätsfreisetzung (Betriebsphase), Wärmeeintrag

Durch die Begrenzung der ODL der Abfallgebinde bzw. Transportbehälter und die Abschirmung von Arbeitsplätzen im Endlager sind die Schutzziele der §§ 44, 49 StrlSchV immer einhaltbar.

Hinsichtlich einer Aktivitätsfreisetzung im bestimmungsgemäßen Betrieb spielen nur Radionuklide in flüchtiger Form eine Rolle wie H-3, C-14, eventuell Kr-85, I-129, Radon. Durch eine Begrenzung des einlagerbaren Inventars i.V. mit den Rückhalteeigenschaften des Versatzmaterials

- Braunkohlefilterasche, Salzgrus (ERAM) für HTO, C-14$O_2$, Radon
- Hydraulisch abbindender Versatz (KONRAD) für HTO, C-14$O_2$, Radon, I 129

sind die Schutzziele der §§ 45, 49 StrlSchV immer einhaltbar. Sinngemäß gilt das ebenso für oberflächennahe Endlager.

Bei Störfällen kann es zur Aerosolbildung und -freisetzung fester radioaktiver Stoffe und zur Freisetzung radioaktiver Gase kommen. In den untertägigen Strecken und im ausziehenden Schacht werden lungengängige Partikel nur in geringem Umfang zurückgehalten. Der Einsatz von Filtern ist problematisch. Das Schutzziel des § 28(3) StrlSchV ist jedoch immer einhaltbar durch

- ein System von Aktivitätsbegrenzungen pro Abfallgebinde i.V.m. Auslegungsanforderungen an Abfallgebinde und sicherheitstechnisch wichtige Systeme.

Der Wärmeeintrag in die Endlagerformation kann

- durch Aktivitätsbegrenzungen in Einlagerungsräumen i.V.m. Mindestabständen von Einlagerungsräumen (HAW!)

immer so begrenzt werden, daß es zu keinen (KONRAD) oder zu keinen nicht kalkulierbaren Strukturveränderungen (GORLEBEN) bzw. zu keinen unzulässigen thermomechanischen Gebirgsspannungen (Rißbildung) kommen kann. Das Schutzziel der Erhaltung der Barrierenwirkung/Standfestigkeit ist also immer einhaltbar.

### III. 4 Gasbildung und Gastransport (Anl. 7-10)

Zur Gasbildung in einem Endlager kommt es durch

- aerobe und (langfristige) anaerobe Korrosion von Metallen,
- mikrobielle Zersetzung organischer Materialien,
- radiolytische Zersetzung von Wasser, Salz und anderen Stoffen bei hohen Strahlendosen.

Während die aerobe Korrosion praktisch nur in der Betriebsphase eine Rolle spielt, treten die anderen Bildungsmechanismen vor allem in der Nachbetriebsphase auf. Bei Endlagerkonzep-

ten, die wesentlich auf dem Prinzip des dichten Einschlusses basieren wie Salz, besteht die Hauptanforderung in der Vermeidung zu hoher Gasdrücke, die eine Gefährdung der Barrierenintegrität des Salzgebirges bedeuten. Dieses Problem stellt sich im Endlager Konrad nicht, da
das Gas sich im porösen und klüftigen Korallenoolith ausbreiten kann. Neben einem Druckaufbau kann die Gasbildung folgende Prozesse beeinflussen bzw. initiieren:

- die Freisetzung radioaktiver Gase,
- die Behinderung eines Lösungszutrittes in das Endlager (Salz),
- die Auspressung radioaktiv kontaminierter Salzlösungen,
- die Entstehung explosionsfähiger Gasgemische.

Der Entstehung großvolumiger explosionsfähiger Gasgemische kann durch Vermeidung großer Hohlräume (Versatz) begegnet werden. Die Freisetzung radioaktiver Gase bezieht sich i.W. auf C-14. Beim ERAM und bei KONRAD resultieren hieraus vernachlässigbar kleine Dosiswerte in der Nachbetriebsphase. Bei GORLEBEN mit einem entsprechend höheren C-14-Inventar muß die Relevanz dieses Freisetzungspfades noch untersucht werden.

Der Einfluß auf den Zutritt (unkontaminierter) bzw. die Auspressung von (kontaminierten) Salzlösungen in Verbindung mit dem zu vermeidenden Aufsprengen (Fracen) der geologischen Endlagerformation bei Überschreiten des frac-Druckes stellt eine Hauptfragestellung bei der Endlagerung im Salinar dar. Die Anlagen 7-10 zeigen eine Übersicht der Gasentstehungsprozesse, der sicherheitstechnischen Fragestellungen, möglicher Maßnahmen und eine Bewertung anhand einiger modellmäßiger Abschätzungen. Während die maximal bildbaren Gasmengen relativ genau angebbar sind, hängen die Gasbildungsraten für Korrosion und mikrobielle Zersetzung von zahlreichen physikalisch-chemischen Randbedingungen ab. Sie müssen abfall- und endlagerspezifisch möglichst realistisch ermittelt werden, da die sichere Handhabung großer Gasmengen im Salz sehr aufwendig, d.h. kostenintensiv ist. Erste konservative Abschätzungen für die Einlagerung im dichten Salz zeigen, daß bei der Streckenlagerung von Brennelementen der Versatz die entstehenden Gasmengen aufnehmen kann. Bei der Endlagerung von LAW in der heute üblichen Form liegen die Verhältnisse in jedem Fall sehr viel ungünstiger.

## III. 5 Langzeitsicherheit (Anl. 11-13)

### III.5.1 Schutz des Menschen vor den radiologischen Auswirkungen

Das wesentliche Schutzziel ist die Begrenzung der radiologischen Auswirkungen für spätere Generationen auf Werte, die auch heute akzeptiert werden /ICRP 85/. In Deutschland sind das z. Zt. die Grenzwerte des § 45 StrlSchV (effektive Dosis 0,3 mSv/a). Das Basisszenario für eine Endlagerung im Salz ist der dichte Einschluß, d.h. die Nullfreisetzung. Der o.g. Grenzwert gilt also für Szenarien, für die eine Freisetzung nicht vollständig ausschließbar ist. Anders bei klüftigem Gestein wie KONRAD: Hier gibt es den dichten Einschluß nicht. Das Basisszenario ist der "wasserdurchströmte Einlagerungshorizont". Wie bereits unter II. 1.2 erwähnt, ist die Tiefenwasserbewegung am Standort KONRAD allerdings sehr gering (nur diffusiv). Im Planfeststellungsverfahren wurde konservativ mit Wasserlaufzeiten von $3{,}3 \cdot 10^5$ a gerechnet.

Schon seit einiger Zeit hat sich die wissenschaftliche Erkenntnis durchgesetzt, daß für Zeiträume weit jenseits von 10000 Jahren berechnete Individualdosen nicht der alleinige Maßstab

für die Sicherheitsbewertung eines Endlagers sein können und daß die mit der Zeit anwachsenden Unsicherheiten in den Berechnungen einen quantitativen Nachweis der Langzeitsicherheit nur noch eingeschränkt zulassen. Deshalb wird seit einiger Zeit nach ergänzenden Bewertungsmaßstäben gesucht. Solche Bewertungsmaßstäbe beruhen auf Befunden in der Natur, die direkt oder indirekt geeignet sind, bestimmte Aspekte der **Sicherheit** eines Endlagersystems **aufzuzeigen**. Man spricht deshalb von **Sicherheitsindikatoren.**

Eine Charakterisierung des international einheitlichen Verständnisses bei der Beurteilung der Langzeitsicherheit findet sich in /OECD-NEA 91/ und /IAEA 94/. In /IAEA 97/ wird der Rahmen für eine solche Vorgehensweise ("Nukleare Entsorgungskonvention") verbindlich gemacht. In Deutschland ist ein diesbezüglicher Gesetzesentwurf über die "Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle" in der Beratung. In /RÖT 94/ erfolgt eine ausführliche Diskussion verschiedener Sicherheitsindikatoren und Bewertungsmaßstäbe hinsichtlich ihrer Hierarchie, d.h. ihrer Zuordnung zu den Teilen des "Endlagersystems" wie Mensch, Biosphäre, Lithosphäre, Endlagerbereich, Abfall, ihrer Vor- und Nachteile sowie ihrer Anwendung auf die deutschen Verhältnisse.

Wichtige Sicherheitsindikatoren basieren auf Naturbeobachtungen, die z.B. etwas über die Rückhaltung von natürlichen Barrieren sagen. Man versucht, sie mit den Barrieren des Endlagerstandortes zu vergleichen. Anlage 11 gibt einige Beispiele an. So bilden beim Salzstock GORLEBEN Lösungseinschlüsse im Salz und ihr unveränderter Stoffbestand seit ihrer Entstehung vor ca. 200 Mill. Jahren einen wichtigen Bewertungsmaßstab. Bei KONRAD ist es die Stagnation der Tiefenwässer seit ca. 160 Mill. Jahren.

Andere Sicherheitsindikatoren oder Bewertungsmaßstäbe können die Gehalte natürlich vorkommender Radionuklide an einem Standort sein. Gerade für diese Radionuklide wie Thorium, Uran, Radium können sich wegen ihrer langen Halbwertszeiten bzw. ihrer Nachbildung für lange Zeiträume rechnerisch die höchsten "Dosiswerte" (Planfeststellungsverfahren Konrad) ergeben.

Standortunabhängig, d.h. für extrem lange Zeiträume, für die man von einem Verlust jeglicher Barrieren ausgehen muß (z.B. infolge Subrosion eines Salzstocks), kann die verbliebene Radiotoxizität des Abfalls eine zu bewertende Größe darstellen. Als Bewertungsmaßstab bietet sich hier die Radiotoxizität der natürlichen radioaktiven Stoffe am Standort in der Geo- und Biosphäre an (Anlage 11). Es wurde auch der Versuch unternommen, die Radiotoxizität der Abfälle mit der Chemotoxizität geologischer Formationen zu vergleichen /EHR 86/. Auf die Chemotoxizität der Abfälle selbst und ihre Bewertung wird unter III. 5.2 eingegangen.

Insgesamt gesehen wird heute ein Endlager für Zeiträume bis $10^4$ - $10^5$ Jahre durch quantitative Sicherheitsanalysen, danach mehr und mehr qualitativ mit Hilfe von Sicherheitsindikatoren (Risikobewertung) beurteilt. Von einem Langzeitsicherheitsnachweis kann dann nicht mehr gesprochen werden. Sicherheitsanalysen und Risikobewertung werden zusammen als vertrauensbildende Maßnahmen bezeichnet. Sie haben zu der Feststellung beigetragen, daß von sorgfältig konzipierten Endlagern auch über sehr lange Zeiträume mit begründeter Sicherheit keine Gefährdung des Menschen ausgeht.

### III.5.2 Schutz der Umwelt vor den radiologischen und konventionellen Auswirkungen (Anl. 12-13)

Die am Schluß des letzten Kapitels getroffene Feststellung bezieht sich auf die Sicherheit im Hinblick auf Auswirkungen durch **ionisierende Strahlung auf den Menschen**. Zwei weitere Punkte gewinnen zunehmend an Bedeutung (Anl. 12): Neben dem Schutz der menschlichen Gesundheit wird auch der **Schutz der Umwelt** und neben der Analyse der Auswirkungen durch ionisierende Strahlung wird auch die Einschätzung der Auswirkungen chemotoxischer Bestandteile in den Abfällen gefordert. Man kann dies als eine Anwendung des Gesetzes zur Prüfung der Umweltverträglichkeit /UVPG 94/ auch auf die Langzeitauswirkungen eines Endlagers ansehen. Neben dem "Schutzgut Mensch" sind hier die **Schutzgüter Tiere, Pflanzen, Wasser, Boden, Luft, Bodenschätze** zu betrachten. Grundlage für eine Umweltverträglichkeit ist grundsätzlich die Einhaltung der fachgesetzlichen Schutzziele.

Konkrete Schutzziele für die Schutzgüter im Hinblick auf Endlager sind bisher in Deutschland in den Kriterien nicht formuliert worden. In letzter Zeit zeichnet sich jedoch für das "Schutzgut Wasser" ein solches Schutzziel ab (Anl. 13).

Im Hinblick auf die Wirkung durch ionisierende Strahlung auf das Schutzgut Wasser wird der Gehalt natürlich vorkommender Radionuklide (oder ihr radiotoxisches Äquivalent, sofern nicht natürlich vorkommende Radionuklide bewertet werden,) im nutzbaren Grundwasser als Bewertungsmaßstab herangezogen. Sofern eine nur geringfügige Erhöhung im Rahmen der natürlicherweise auftretenden Schwankungen der natürlichen Vorkommen durch das Endlager verursacht wird, ist von einer Einhaltung des Schutzzieles für das Grundwasser durch die ionisierende Strahlung bzw. von einer diesbezüglichen Umweltverträglichkeit auszugehen.

Im Hinblick auf die Wirkung nichtradioaktiver, chemotoxischer Stoffe in den Abfällen auf das Schutzgut Wasser sind konkrete Vorgaben in der Grundwasserverordnung /GWV 97/ und den einschlägigen Regelwerken formuliert.

In den endzulagernden Abfallgebinden mit radioaktivem Abfall sind nur vergleichweise geringe Massen an Radionukliden, jedoch große Massen an nichtradioaktiven Materialien enthalten. Diese wiederum können ihrerseits chemotoxische Stoffe enthalten oder selbst daraus bestehen. Die chemotoxischen Stoffe können Bestandteile des

- Abfallbehälters (z. B. Blei als Innenauskleidung),
- des Fixierungsmittels (z. B. Chromate im Zementstein) oder
- des radioaktiven Abfalls selbst (z. B. Cadmium in Steuerstäben oder Bleisulfat in Kabelisolationen)

bilden.

Zur Sicherheitsbewertung können die **anorganischen** chemotoxischen Stoffe (z. B. Blei) in den Abfallgebinden eines Endlagers hinsichtlich ihrer Toxizität verglichen werden mit

- der Radiotoxizität der Abfallgebinde des Endlagers,
- der Radiotoxizität einer Uranerzlagerstätte (z. B. 3 % Natururan) gleichen Volumens oder
- der Chemotoxizität der Sedimente des Einlagerungshorizontes.

Im Planfeststellungsverfahren für das Endlager KONRAD wurden alle drei Vergleiche durchgeführt mit dem Ergebnis:

Die Chemotoxizität der Abfallgebinde ist für ca. 10.000 Jahre klein gegen ihre Radiotoxizität und im Zeitraum $10^5$ bis $10^7$ vergleichbar. In bezug auf die Chemotoxizität des Einlagerungshorizontes bringen die Abfallgebinde nur eine geringfügige Erhöhung mit sich.

Darüber hinaus wurde eine konservative Modellbetrachtung, welche die Ausbreitung chemotoxischer Stoffe aus dem Einlagerungshorizont in die Biosphäre innerhalb von $3 \cdot 10^5$ Jahren ohne Rückhaltung in den geologischen Formationen vorsieht und lediglich von einer Verdünnung in den Tiefenwässern ausgeht, durchgeführt. Sie zeigte, daß eine solche Verdünnung aufgrund der vorhandenen Wassermengen zu Konzentrationen in den oberflächennahen, nutzbaren Grundwässern führt, die z. T. um mehrere Größenordnungen unter den einschlägigen Grenzkonzentrationen liegen /TWVO 90, LAWA 93, DVGW 96/.

Für die **organischen** chemotoxischen Stoffe ist es naheliegend, ihre Umwandlung durch chemische und strahlenchemische Reaktionen unter den Gegebenheiten des Standorts zu untersuchen. Bei einer Stoffumwandlung, die schnell gegenüber einem möglichen Transport in die Biosphäre erfolgt, kann von einer Verträglichkeit für den Menschen ausgegangen werden. Wegen der langen Laufzeiten ist das beim Standort KONRAD mit Sicherheit der Fall.

Aber selbst ohne Berücksichtigung dieser Umwandlungen konnte mit denselben, konservativen Modellannahmen wie für die anorganischen chemotoxischen Stoffe gezeigt werden, daß die Begrenzungen in den einschlägigen Regelwerken um z.T. um mehreren Größenordnungen unterschritten werden.

Anlage 13 zeigt die zusammengefaßte Bewertung der Auswirkungen auf die Schutzgüter Wasser und Bodenschätze am Beispiel KONRAD mit Hilfe der im Planfeststellungsverfahren verwendeten sehr konservativen Modelle. Danach werden die nutzbaren Grundwässer am Standort Konrad durch die radioaktiven und chemotoxischen Bestandteile der endgelagerten Abfälle praktisch nicht beeinflußt. Die Eisenerz-Bodenschätze des Korallenoolith im Abstromgebiet werden durch die chemotoxischen Abfallbestandteile nicht und durch die radioaktiven Bestandteile der eingelagerten Abfälle nur unwesentlich beeinflußt.

Zum Schluß dieses Kapitels soll auf das Thema "Unbeabsichtigtes Eindringen in das Endlagersystem durch menschliche Aktivitäten" kurz eingegangen werden. Derartige Aktivitäten, die eng mit der Thematik "Nutzung von Bodenschätzen" bzw. dem Schutzgut Bodenschätze verknüpft sind, können weder ihrer Art noch ihren Auswirkungen nach prognostiziert werden. Sinnvoll ist es deshalb, Standorte mit einem Einlagerungshorizont in großen Tiefen und mit möglichst wenig relevanten Rohstoffvorkommen zu wählen. International wird diskutiert, eine Konsequenzenanalyse für die heute bekannten menschlichen Aktivitäten, wie etwa die Suche nach Rohstoffen durch Erkundungsbohrungen, als Bestandteil einer Sicherheitsbewertung vorzusehen. Beabsichtigte Einwirkungen können jedoch nicht bewertet werden.

## IV. Betriebliche Erfahrungen und Abbau von Konservativitäten

### IV.1 Bestimmungsgemäßer Betrieb (KONRAD, ERAM) (Anl. 14)

Im bestimmungsgemäßen Betrieb ist die Strahlenexposition durch äußere Bestrahlung weitgehend nicht vermeidbar. Ab einer gewissen Schwelle würde eine stärkere Abschirmung der Abfallgebinde - bei gleicher Aktivität pro Gebinde - wegen der Massenerhöhung zu aufwendigeren Handhabungsschritten, oder - bei geringerer Aktivität pro Abfallgebinde - wegen der dann erhöhten Anzahl der Gebinde zu mehr Handhabungsschritten, in beiden Fällen also im Endlager zu einer höheren Dosis pro eingelagerter Aktivität führen. Auch bei der Konditionierung und Handhabung beim Abfallverursacher würden sich ab einer Schwelle höhere Dosen für das Personal ergeben. Diese Schwellen sind abhängig von Art, Konditionierung und Verpackung des Abfalls und ergeben sich nur aus der Erfahrung.

Die Erfahrung hat bisher gezeigt, daß die durch die Transportbestimmungen festgelegten Grenzwerte für die Dosisleistung, die im wesentlichen für die Endlager übernommen wurden, zusammen mit den möglichen Abschirmmaßnahmen im Endlager eine gute Basis bilden, auf welcher akzeptable Dosen resultieren. Dabei treten nach den bisherigen Erfahrungen die höheren Dosen bei der Abfallkonditionierung auf /FEI 97/. Im Endlager Morsleben wurden seit der Wiederaufnahme des Einlagerungsbetriebs 1994 bei einem mittleren Ausschöpfungsgrad der Dosisleistungsgrenzwerte der Abfallgebinde von ca. 10% mittlere Werte der individuellen äußeren Exposition des unmittelbar betroffenen Personals (ca. 20 Personen) von ca. 1 mSv/a und maximale Individualdosen von ca. 2,4 mSv ermittelt /EHR 97/. Es ergibt sich, daß hinsichtlich der äußeren Bestrahlung bei möglichen höheren ODL-Ausschöpfungsgraden unter der Annahme gleichbleibender Handhabungsabläufe nur geringe Sicherheitsreserven vorhanden wären. Bei Bedarf könnten hier jedoch die Handhabungsabläufe weiter optimiert werden.

Hinsichtlich der inneren Exposition durch Inhalation flüchtiger Radionuklide bzw. hinsichtlich der Ableitung flüchtiger Radionuklide in die Umgebung ergibt sich folgendes Bild: Die innere Strahlenexposition bzw. die Ableitung flüchtiger Radionuklide ist weitgehend vermeidbar, weil sowohl gebindespezifische (Abfallmatrix, Verpackung) als auch endlagerspezifische (Versatz) Barrieren für eine wirksame Rückhaltung sorgen.

Die mit 1% (KONRAD) bzw. mit 10% (ERAM) der Dosisgrenzwerte für beruflich Strahlenexponierte, Kategorie A, angesetzten Planungswerte für die innere Dosis führen zu Ableitungen über den Luftpfad in einer Höhe, der Strahlenexpositionen gemäß Berechnung nach /AVV 90/ von ca. 1-10% der Grenzwerte nach § 45 StrlSchV entsprechen, je nachdem, wie konservativ gerechnet wird. Die Konservativität bestand im wesentlichen darin, daß anfangs keine standortspezifischen meteorologischen Ausbreitungsklassenstatistiken vorlagen und daher der Einfluß einer Abluftfahnenüberhöhung nicht berücksichtigt werden konnte. Die inzwischen durchgeführten standortspezifischen Rechnungen ergeben für die für die Dosisberechnung für die flüchtigen Radionuklide wesentlichen Langzeitausbreitungsfaktoren Maximalwerte, die um ca. eine Größenordnung niedriger sind als ohne Berücksichtigung einer Überhöhung (Anl. 14). Die in der Dauerbetriebsgenehmigung (ERAM) bzw. im konzipierten Planfeststellungsbeschluß (KONRAD) festgelegten Maximalwerte für die jährliche Ableitung flüchtiger radioaktiver Stoffe über den Luftpfad ergeben somit effektive Dosiswerte am ungünstigsten Aufpunkt von ca. 20 µSv/a (ERAM) bzw. ca. 3 µSv/a (KONRAD) entsprechend ca. 6% bzw. 1% des Dosisgrenzwertes nach § 45 StrlSchV.

Hinsichtlich der Dosis in der Umgebung bestehen also beträchtliche Reserven bei beiden Endlagern. Hinsichtlich der einlagerbaren Aktivität flüchtiger Radionuklide, die in den Sicherheitsanalysen modellhaft aus den maximalen Ableitungen hergeleitet wurden, bestehen somit dieselben beträchtlichen Sicherheitsreserven. Eine weitere Konservativität betrifft die relativen Freisetzungsraten aus Abfallgebinden. Diese für z.B. HTO mit 5%/a angesetzten Werte werden in der Praxis nicht erreicht, wie die Erfahrungen im ERAM seit 1994 zeigen. Das gilt ebenfalls für C-14 in flüchtger Form (Anl. 14).

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß hinsichtlich der Endlagerung von Abfällen mit flüchtigen Radionukliden in Bergwerken Sicherheitsreserven von deutlich mehr als 1 Größenordnung bestehnen.

**IV. 2 Störfälle (KONRAD, ERAM) (Anl. 15)**

Für die zu betrachtenden Störfälle wurden im Planfeststellungsverfahren KONRAD und ebenso in der nachträglichen Störfallanalyse für den Betrieb des ERAM ab 1994 für Planungszwecke die Dosiswerte des § 28 (3) StrlSchV zugrunde gelegt. Für wenige abdeckende Ereignisse wie etwa thermische Einwirkungen auf Abfallgebinde infolge Brand eines Transportfahrzeuges unter Tage wurde in einer "Rückwertsrechnung" aus den Dosiswerten des § 28 (3) StrlSchV auf maximal zulässige Aktivitätswerte in den Abfallgebinden geschlossen. Diese Vorgehensweise der Ableitung sekundärer Grenzwerte über konservative Szenarien entspricht einer etablierten Praxis im analytischen Strahlenschutz /LAN 97/. Bei der Herleitung dieser sekundären Standards in Form von gebinde- und nuklidspezifischen Aktivitätsbegrenzungen als Teil der Endlagerungsbedingungen wurde sowohl bei KONRAD als auch beim ERAM von einer Abluftfahnenüberhöhung kein Kredit genommen. Ferner wurde gemäß den Störfallberechnungsgrundlagen /SBG 94/ **deterministisch** vorgegangen. Bei einer Verwendung der standortspezifischen meteorologischen Daten und **probabilistischer** Vorgehensweise gemäß /SBG 94/ kann eine thermische Abluftfahnenüberhöhung exakt berücksichtigt werden, weil für jede gemessene Wettersituation auch die Außentemperatur sowie die Abwettertemperatur bekannt ist.

Das Ergebnis der auf diese Weise durchgeführten Rechnungen /BFS 95, BFS 97/ zeigt, daß bei **KONRAD um Faktoren 20-30**, beim **ERAM um Faktoren 6-30,** je nach Radionuklid, niedrigere Störfalldosen in der Umgebung auftreten als ohne Berücksichtigung einer Abluftfahnenüberhöhung und deterministischer Vorgehensweise. Bei realistischer Betrachtungsweise ergeben sich also für die einlagerbare Aktivität um den Faktor 6-30 (ERAM) bzw. 20-30 (KONRAD) höhere Werte pro Abfallgebinde (Anl. 15).

Weitere Reserven im Hinblick auf die maximalen Aktivitätsgehalte pro Abfallgebinde resultieren aus der Überschätzung der **relativen Freisetzungsanteile im Störfall.** Dieser Überschätzungsfaktor ist für Störfälle mit thermischen Einwirkungen (Brand unter Tage) derzeit nicht quantifizierbar, dürfte aber in vielen Fällen eine Größenordnung betragen. Bei Störfällen mit mechanischen Einwirkungen (Absturz etc. von Abfallgebinden), die jedoch in den meisten Fällen nicht grenzwertbestimmend sind, sind nach heutigen Erkenntnissen Überschätzungen um mindestens drei Größenordnungen vorhanden (Anl. 15).

## IV.3 Wärmeeintrag (KONRAD)

Bei der Festlegung des maximal zulässigen Wärmeeintrags in die Eisenerzformation beim geplanten Endlager KONRAD wurde von einer maximal zulässigen Temperaturerhöhung am Stoß der Einlagerungsstrecken von 3 K ausgegangen. Eine Temperaturerhöhung in dieser Größe liegt im Bereich der durch Bewetterungsvorgänge im Grubengebäude auftretenden Temperaturabsenkungen, die lokal auch höher sein können. Ungünstige Einwirkungen auf das Eisenerzgestein im Hinblick auf Standfestigkeit oder Rißbilung können somit ohne Einzelnachweis ausgeschlossen werden. Auch größere Temperaturerhöhungen von etwa 10 K würden vermutlich von dem Eisenerzgestein ohne nachteilige Wirkung ertragen werden. Eine Zunahme der Temperatur um 10 K tritt im natürlichen Temperaturfeld bei einer Teufendifferenz von ca. 300 m auf. Das geplante Endlager bzw. bereits bestehende Bergwerk erstreckt sich über einen Teufenbereich von 800 m bis 1300 m. Es gibt keinerlei Hinweise auf Standsicherheitsprobleme.

Die Bedeutung eines höheren Wärmeeintrages ist beim geplanten Endlager KONRAD allerdings gering, da die aus der 3 K-Begrenzung abgeleiteten Aktivitätsbegrenzungen praktisch durchweg weniger restriktiv als andere Begrenzungen sind. Ein Abbau von Konservativitäten durch Zulassung höherer Temperaturen des Wirtsgesteins hätte daher eine praktische Bedeutung erst dann, wenn daraus erheblich höhere einlagerbare Inventare resultieren würden.

## IV.4 Langzeitsicherheit (Gesamtinventar, KONRAD) (Anl. 16)

Im Planfeststellungsverfahren KONRAD wurde modellmäßig konservativ eine Bewegung der Tiefengrundwässer unterstellt. Als Antriebsmechanismus dient in diesem Modell der Höhenunterschied zwischen dem Salzgitterhöhenzug im Südwesten des Endlagers und dem Gebiet um Gifhorn ca. 30 km nordöstlich des Endlagers (ungünstigster Fall). Die hydraulische Verbindung des Oxford (siehe Kap. II. 1.2) mit oberflächennahen Grundwässern ist für den Raum um Gifhorn direkt, für den Salzgitterhöhenzug nicht unmittelbar gegeben (konservative Vorgehensweise). Diese modellmäßige Betrachtung führt zu Laufzeiten der Tiefenwässer aus dem Endlager bis in die Biosphäre von mindestens 330000 Jahren. Der heutige Wissensstand, basierend auf isotopen-geochemischen Altersbestimmungen und anderen geologischen Befunden, geht dagegen von einem Alter der Tiefenwässer in KONRAD von 160 Millionen Jahren, also von einem Verbleib der Wässer an ihrem Ort seit der Ablagerung der Schichten aus (Stagnation).

Im Planfeststellungsverfahren KONRAD wurden mit dem genannten Modell nuklidspezifische Laufzeiten bis in die Biosphäre unter Berücksichtigung konservativ gewählter Retardationsfaktoren berechnet. Für wichtige Radionuklide ergaben sich folgende Mindestlaufzeiten:

| | |
|---|---|
| I-129 | $3{,}3 \cdot 10^5$ a |
| U-235, U-238, Ra-226 | $1{,}1 \cdot 10^7$ a |
| Np-237 | $> 5{,}0 \cdot 10^7$ a |
| Th-232 | $4{,}0 \cdot 10^8$ a |

Die zu diesen Zeitpunkten (außer für Th-232) auftretenden "maximalen Dosiswerte", berechnet aus den Aktivitätskonzentrationen in den oberflächennahen Grundwässern mit einem erweiterten AVV-Modell, wurden von der Planfeststellungsbehörde so begrenzt, daß sie in jedem der drei Zeitpunkte die Werte des § 45 StrlSchV unterschreiten. Daraus ergeben sich restriktive Begrenzungen der langlebigen Radionuklide I-129, U-238 und Ra-226, Pu-239 und U-235 und U-236 für das gesamte Endlager. Für Th-232 erfolgte die Festlegung für die einla-

gerbare Aktivität aufgrund des Erwartungswertes für das Inventar, das von den Ablieferungspflichtigen bzw. Abfallverursachern seinerzeit gemeldet worden war (Bei einer formalen Ausschöpfung der Grenzwerte des § 45 StrlSchV wären für Th-232 um mehr als zwei Größenordnungen höhere Inventare möglich).

Die Umrechnung auf die mittlere spezifische Aktivität im Abfall liefert für die auch natürlicherweise auftretenden Radionuklide Werte von einigen Bq/g. Ein Vergleich mit Werten natürlicher Vorkommen im Konrad-Eisenerz, in Böden sowie mit den Grenzwerten zur bedingungslosen bzw. bedingten Freigabe /SSK 98/ ist aus der Anlage 16 zu ersehen. Danach liegen die Endlager-Langzeitgrenzwerte für Th-232 (U-238)

- nur um einen Faktor 10 (17) höher als die natürlichen Gehalte in der Endlagerformation selbst,
- um einen Faktor 1,3 (3,4) niedriger als die SSK-Werte zur bedingten Freigabe,
- nur um einen Faktor 26 (5) höher als die SSK-Werte zur bedingungslosen Freigabe und
- nur um einen Faktor 20-140 (100-500) höher als die natürlichen Gehalte in Böden.

Aus diesen Befunden ergibt sich, daß die im Planfeststellungsverfahren von der Behörde festgelegte Vorgehensweise auf der Basis des oben beschriebenen geohydrologischen Transportmodells in keiner Weise gerechtfertigt ist. Bei einem realistischen Vorgehen, das das Alter und die Stagnation der Tiefenwässer berücksichtigt, macht es - vgl. Kap. III.5.1 - allerdings keinen Sinn mehr, von Dosiswerten auszugehen und durch Rückwärtsrechnung auf eine Inventarsbeschränkung zu schließen. Unter der Voraussetzung, daß die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse sich nur unwesentlich ändern, hätte allenfalls ein Modell Sinn, welches die enormen Sicherheitsreserven aufzeigt. Zu modellieren wäre eine Lösung bzw. Ausfällung der chemischen Verbindungen, in denen die Radionuklide vorliegen, und deren diffusiver Transport in die oberflächennahen, nutzbaren Grundwässer. Die sich dort einstellenden zusätzlichen Radionuklidgehalte bzw. Radiotoxizitäten könnten an den bereits natürlicherweise vorhandenen Gehalten bzw. Radiotoxizitäten bewertet werden.

Da jedoch die diffusiven Ausbreitungsvorgänge derart langsam verlaufen, daß nennenswerte Effekte erst weit jenseits von $10^6$ a auftreten, hätten solche Ergebnisse aufgrund der dann einsetzenden Einflüsse durch Plattentektonik und Vulkanismus einen sehr spekulativen Charakter. Die Schlußfolgerung ist, daß es eigentlich keine belastbar begründete Forderung gibt, eine Beschränkung des endzulagernden Inventars überhaupt vorzunehmen, da es keine bessere Entsorgungsalternative gibt. De facto ist allerdings von einer Beschränkung auszugehen, die durch andere Anforderungen (Wärmebegrenzung, Kritikalitätssicherheit) oder in der Endlichkeit des vorhandenen Abfallinventars begründet ist.

## V. Kosten

### V.1. Konditionierung (Anl. 17)

Anlage 17 zeigt für zwei typische Abfallablieferer (KKW-Abfälle, Abfälle aus Forschung, Medizin und Industrie) die Konditionierungskosten für einige Abfallströme und Konditionierungstechniken /GNS 98, AMBU 98/. Sie variieren im Bereich von ca. 15.000 DM/m³ bis ca. 700.000 DM/m³ Endlagergebinde-Volumen. In den Preisen sind neben den Material-, Konditionierungs- und Dokumentationskosten auch die Transportkosten enthalten. Diese schlagen bei externer Konditionierung mit ggf. erforderlichen Schiffstransporten (Verbrennung in

Schweden) erheblich zu Buche, zahlen sich aber wegen der enormen Volumenreduktion (Faktor 40) aus.
Bei einem Vergleich der auf das Endlagergebindevolumen bezogenen mit den auf den $m^3$ Rohabfall bezogenen Kosten, deren Verhältnis den tatsächlich erreichten Volumenreduktionsfaktor darstellt, fällt einerseits die geringe Volumenenreduktion von ca. 14% beim Trocknen der Verdamperkonzentrate (VDK) und andererseits die Volumenerhöhung um den Faktor 2,5 bei der Rückentleerung von Harzen aus MOSAIK-Behältern mit anschließender Zementierung auf. Im Falle der Trocknung der VDK findet wegen des Feststoffanteils von ca. 25% bis 30% eine Volumenreduktion statt. Diese wird aber infolge der aus ODL-Gründen erforderlichen Einstellung des Fasses in eine Verlorene Betonabschirmung (VBA) fast wieder kompensiert. Trotzdem scheint sich das Verfahren zu rentieren. Im Falle der Harze werden die Abfallvolumenerhöhung und damit höhere Endlagerungskosten offenbar in Kauf genommen, weil auf der anderen Seite Zwischenlagerungskosten (s.V.2) eingespart werden. Das gilt ebenso für die in Anlage 17 weiterhin aufgeführten Kosten für eine "Umkonditionierung" von z.B. Pellets aus großen KONRAD-Containern in 200 l-Fässer /GEI 98/. Sie liegen in derselben Größe wie die Endlagerungskosten für das ERAM und machen die offenbar vorhandene "Lukrativität" der Endlagerung im ERAM unter den gegebenen, d.h. vertraglich fixierten Randbedingungen deutlich, sonst würde keine Verdopplung der Kosten in Kauf genommen (Verringerung der Zwischenlagerungskosten!)

Solange die Endlagerungskosten nur volumenspezifisch in Rechnung gestellt werden bzw. in Verträgen festgelegt sind, ergeben sich für den Ablieferer Optimierungsmöglichkeiten abhängig von der absoluten Höhe des $m^3$-Preises und der Menge einer bestimmten Abfallart. Sofern aber das gesamte Kostensystem Konditionierung-Produktkontrolle-Zwischenlagerung-Endlagerung (Verursacherprinzip!) für einen oder alle Abfallablieferer optimiert werden soll, müßte eine Kostenanalyse des Gesamtsystems Konditionierung-Produktkontrolle-Zwischenlagerung-Endlagerung erfolgen. Solche Analysen sind bisher nicht oder nur in Teilen durchgeführt.

## V.2 Zwischenlagerung

In Anlage 17 sind außerdem die jährlichen volumenbezogenen Kosten für eine Zwischenlagerung am Kraftwerksstandort oder in einem zentralen Zwischenlager aufgeführt /GEI 98/. Danach ergeben sich also bei einer ca. 10-jährigen Zwischenlagerung bereits Kosten in Höhe der Endlagerungskosten (ERAM-Basis), d.h. es tritt eine Kostenverdopplung ein.

## V. 3 Produktkontrolle

Anlage 17 zeigt die im Zeitraum 1994 - 1997 aufgelaufenen Produktkontrollkosten für die ins ERAM verbrachten Abfallgebinde /BFS 98/. Der mittlere Wert liegt mit ca. 1.274 DM/$m^3$ erheblich unter den Konditionierungskosten. Entsprechend dem stark schwankenden Aufwand können Produktkontrollkosten in Einzelfällen allerdings auch niedriger oder höher (z. B. 1.000 DM/200-l-Faß) liegen.

## V.4 Endlager (Anl. 18)

Für das ERAM wurde zu Beginn der 90er Jahre in Verhandlungen zwischen dem Bund und den Verursachern ein Preis für 40.000 $m^3$ Abfälle in Höhe von 500 Mill. DM festgelegt. Dieser Preis (12.500 DM/$m^3$ Abfall) entspricht nicht den tatsächlichen Endlagerungskosten und umfaßt insbesondere nicht die Stillegungskosten.

Für KONRAD ist die Preisentwicklung von Stand Dez. 1994 bis Stand Jan. 1997 in der Anlage 18 dargestellt /BFS 98/. Die Erhöhung der absoluten Kosten auf das ca. 1,57-fache des Wertes von 1994 ist zurückzuführen auf die

- Verzögerungen im Planfeststellungsverfahren (1/3) bzw. 2,7 %/a und die
- Erhöhung der Betriebszeit des Endlagers (2/3) bzw. 1,3 %/a.

Aufgrund des um den Faktor 1,8 niedriger anzusetzenden Abfallaufkommens (vgl. Kap. III.2) erhöht sich der $m^3$-Preis insgesamt um den Faktor $1{,}57 \cdot 1{,}8 = 2{,}8$. Er liegt damit über den unteren $m^3$-Preisen für die Konditionierung und über dem $m^3$-Preis für ERAM. Bei voller Ausschöpfung der Endlagerkapazität für $6{,}5 \cdot 10^5$ $m^3$ Abfälle würde sich ein $m^3$-Preis von nur ca. 13.000 DM/$m^3$ ergeben, der dem Wert vom ERAM entspricht. Hier wird die Problematik der Aufkonzentrierung (= Abfallvolumenminimierung) sichtbar: Bei einem Abbau von Konservativitäten in den Sicherheitsananlysen ist eine bessere Hohlraumnutzung im Endlager möglich. Dies führt jedoch nur dann zu nicht höheren $m^3$-Preisen der Endlagerung, wenn die gesamte Endlagerkapazität (bei möglichst nicht längerer Betriebszeit) auch wirklich genutzt wird. Hier drängt sich unwillkührlich der Gedanke auf, auch Abfälle aus dem Ausland in die Überlegungen zum weiteren Vorgehen bei der Endlagerung in Deutschland einzubeziehen

Für GORLEBEN gibt es Schätzwerte für die insgesamt einschließlich Errichtung zu erwartenden Projektkosten, für die zukünftigen Betriebskosten sowie für die Stillegungskosten (Anl. 18). Eine Aufteilung auf die verschiedenen Abfallvolumina und Abfallarten ist derzeit nicht möglich.

## VI. Ergebnisse und Schlußfolgerungen

### 1. Aktivitätsbegrenzungen für LAW/MAW

In Deutschland wird bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle die Tiefenlagerung im Salz (GORLEBEN, ERAM) und in Lockergestein (KONRAD) verfolgt. **Oberflächennahe Endlager** sind nicht Konzept der Bundesregierung gewesen, da diese eine **viel zu geringe Kapazität für langlebige Radionuklide** bieten würden. Ob deshalb die relativ hohen Endlagerungskosten für Abfälle mit weniger langlebigen Radionukliden gerechtfertigt sind, ist eine Frage, auf die am Schluß eingegangen wird.

KONRAD weist für Abfälle mit **langlebigen Radionukliden** aufgrund seiner **exzellenten Isolationseigenschaften erhebliche Reserven** auf. Die relativ restriktiven Aktivitätsbegrenzungen für I-129, U-238 und Th-232 haben ihre Ursache in den **aufgrund des heutigen Wissenstandes unangemessenen, extrem konservativen Langzeit-Sicherheitsanalysen**, die im Planfeststellungsverfahren verwendet und im (fertig vorliegenden, aber bisher nicht erlassenen) Planfeststellungsbeschluß festgeschrieben wurden. Ebenso bestehen aufgrund der **Überkonservativität der Sicherheitsanalysen für die Betriebsphase** hinsichtlich der einlagerbaren **Inventare an weniger langlebigen Radionukliden** und insbesondere auch für **Abfälle mit flüchtigen radioaktiven Stoffen** wie H-3 und C-14 **erhebliche Reserven** (KONRAD, ERAM) von weit über 1 Größenordnung bei gleichbleibend hohem Sicherheitsniveau (sehr niedrige Dosiswerte!). Auf die Schlußfolgerungen bezüglich der Situation extrem konservativer Sicherheitsanalysen wird am Schluß eingegangen.

## 2. Endlagerkapazität (Abfallvolumen) für LAW/MAW

Es ist gut ausreichende Endlager-Volumenkapazität vorhanden in den existierenden (ERAM) und planfeststellungsreifen (KONRAD) Endlagern in Deutschland.

Die Reserve beträgt **weniger als einen Faktor 2** (ERAM + KONRAD) und wird durch den Weg der Freigabe nur geringfügig erhöht.
Bei GORLEBEN steht gegenüber den ursprünglichen Planungen derzeit der gesamte für LAW/MAW vorgesehene (SW-) Flügel nicht zur Verfügung. **Die ursprünglich auf diese Weise geplante räumliche Trennung des LAW/MAW vom HAW/BE entfällt somit.** Ob überhaupt bzw. in welchem Umfang eine Zusammenlagerung im NO-Flügel unter sicherheitstechnischen Gesichtspunkten vertretbar ist, bedarf noch der Klärung (vgl. Punkt 3).

## 3. Wärmeentwicklung und Gasbildung

Wegen der **besonders guten Abdichtungseigenschaften von Salz bei höheren Temperaturen** sollte **GORLEBEN grundsätzlich prioritär** für **stark wärmeentwickelnde Abfälle vorgesehen und weitererkundet werden.** Für die **relativ große Menge des LAW/MAW** stellt die **Gasbildung eine entscheidende sicherheitsrelevante Einflußgröße im Endlagermedium Salz** dar, weil sie unmittelbar auf die geologische Barriere Salz, die den dichten Einschluß der Abfälle langzeitlich gewährleistet, einwirkt. Insofern **wirkt** sie der den dichten Einschluß beschleunigenden **Wärmeentwicklung von HAW/BE entgegen**. Eine **Entkopplung** dieser beiden Einflußgrößen ist in einem gewissen Ausmaß **erforderlich** (Druckbegrenzung) und **erfordert zusätzliche Gas-Puffervolumina (Gasspeicher)**, je nach Ausmaß der Gasentwicklung, und damit zusätzlichen Endlagerhohlraum und somit zusätzliche **Kosten**. Hinzu kommt, daß der Temperatureinfluß auf das Verhalten der erforderlichen Gasspeicher nicht voll erforscht ist.

Eine prinzipiell mögliche Reduzierung der Gasentwicklung würde eine aufwendigere Abfallbehandlung (Inertisierung) bedeuten und die Kosten auf die Konditionierungsseite verlagern.

## 4. Kosten

Bei den Kosten stehen die **Abfallkonditionierungskosten** mit im **Mittel mehreren 10.000 DM/m$^3$** Endlagergebinde an erster Stelle, gefolgt an zweiter Stelle von den **Endlagerungskosten mit 12.500 DM/m$^3$ bis ca. 24.000 DM/m$^3$**. Hinzuzurechnen sind hierbei noch die **Zwischenlagerungskosten mit ca. 1.500 DM/m$^3$ · a.** Diese führen demnach z. B. in 8-16 Jahren zu einer Verdopplung der gesamten Lagerkosten! An 3. Stelle liegen die Produktkontrollkosten mit im Mittel 10% bis 5% der Endlagerungskosten.

## 5. ALARA-Prinzip

Dieses im Strahlenschutz verwendete Prinzip besagt, die Dosis einer Anwendung oder Tätigkeit so gering wie vernünftigerweise erreichbar zu halten. Bei der Findung der optimalen Lösung sind also - allgemeiner gesprochen - die **Vorteile** einer niedrigeren Dosis gegen die damit verbundenen **Nachteile** wie andere Risiken (negative Auswirkungen) und Kosten gegeneinander abzuwägen. Diese Optimierung im Strahlenschutz erfolgt also fachübergreifend und sollte deshalb auch bei der Auffindung des einzuschlagenden Entsorgungsweges fachübergreifend Anwendung finden. **D. h.,** es sind **bei der Optimierung nicht nur der Strahlenschutz, nicht nur die Transportfragen oder nicht nur die Standortfragen z.B von Entsorgungsanlagen jeweils für sich, sondern im Zusammenwirken zu betrachten.** Darüber hinaus

darf die Frage der Entsorgung radioaktiver Abfälle nicht isoliert für sich, sondern muß in **größerem Zusammenhang** unter Einschluß insbesondere anderer Entsorgungsanlagen, aber auch anderer Industrieanlagen mit Auswirkungen auf die Umwelt, gesehen werden. Diese **breitere Sicht der Dinge** ist auch Basis eines neueren **Programms der IAEA**, bei dem es um eine vergleichende Bewertung von Energieerzeugungssystemen geht. Dabei wird jedes System als Kette von der Quelle bis zum Verbraucher einschließlich des Abfalls betrachtet.

## 6. Schlußfolgerungen

Vor diesem Hintergrund des skizzierten **verallgemeinerten ALARA-Prinzips** lassen sich aus den unter Punkt 1. bis 4. zusammengefaßten Ausführungen folgende **Schlußfolgerungen** ziehen:

- Für die **Gesamtheit des LAW/MAW-Abfall in Deutschland** steht auf sehr hohem Sicherheitsniveau sowohl hinsichtlich der radiologischen als auch der konventionellen Auswirkungen **Kapazität in KONRAD** hinsichtlich **Volumen mit einer Reserve von ca. einem Faktor 2** (bis ca. 2080) und **hinsichtlich der Aktivität mit einem Reservefaktor > 10** zur Verfügung.

- **Diese Reserven können** - und sie sollten es unter **ALARA-Gesichtspunkten - längerfristig** zur **Endlagerung weiteren LAW/MAW-Abfalls (binational, europäisch)** genutzt werden. Dazu müßten die Sicherheitsanalysen längerfristig aktualisiert werden. Ob dafür das gegenwärtig vorgeschriebene **Planfeststellungsverfahren** einen praktikablen Rahmen darstellt oder ob einem **gestuften Vorgehen** wie im Bergrecht der Vorzug zu geben ist, wäre zu untersuchen.

  Bei der Abwägung des Für und Wider einer **längerfristigen Ausdehnung der Abfalleinlagerung** wären **sämtliche Lasten- und Vorteils-Ausgleichsgesichtspunkte auf allen Seiten in die Überlegungen einzubeziehen**, wie Dosis bei Endlagerung und Transport, Entsorgungs- und andere vergleichbare Industrieanlagen, Kosten im Aufnahme- und Abgabeland u.a.

- **Salz (GORLEBEN)** sollte wegen seiner **hervorragenden Eigenschaften vorzugsweise für stark wärmeentwickelnde Abfälle vorgesehen werden.**

  Eine **Zusammenlagerung** von **LAW/MAW mit HAW/BE im Salz** (GORLEBEN) ist gegen eine getrennte Lagerung (KONRAD, GORLEBEN) **unter ALARA -Gesichtspunkten abzuwägen.** D. h. neben Sicherheitsgesichtspunkten sind auch Kostenfragen unter Einschluß von Konditionierungskosten , Zwischenlagerdauer und Endlagerbetriebsdauer zu berücksichtigen.

- Bei der Festlegung der **Endlagerungskosten** für Abfallablieferer sollte unter ALARA-Gesichtspunkten neben dem **Volumen der Abfälle** auch der **Nutzen der Tätigkeit**, welcher die Abfälle entstammen, in die Überlegungen einbezogen werden. So sind Abfälle aus einem Dienstleistungsbetrieb wie einem Meßlabor sicher anders zu bewerten als Abfälle eines Energieerzeugungsunternehmens oder auch der medizinischen Forschung. Auch die unterschiedliche **Radio- und Chemotoxizität** der Abfälle sollte berücksichtigt werden. Auf diese Weise würde dem Argument Rechnung getragen, daß für weniger toxische bzw. weniger langlebiger Abfälle eine (kostenintensivere) Tiefenlagerung nicht unbedingt erforderlich ist.

Schließlich wäre unter ALARA-Gesichtspunkten eine Untersuchung des **Zusammenhangs zwischen Konditionierungs-, Zwischenlagerungs- und Endlagerungskosten** wünschenswert mit dem Ziel, für die gesamten Entsorgungskosten eine optimale Lösung zu erreichen.

## VII. Zitierte Literatur


/AMBU 98/ Schreiben/Fax: Amersham Buchler GmbH u. Co. KG, Environmental Services vom 06.05.98 an BfS

/ARS 97/ G. Arens, P. Brennecke, D. Ehrlich:
"'Entwicklungen und Fortschritte bei der Risikobewertung von Endlagern für radioaktive Abfälle" in:Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät "Fortschritte-Risiken-Fehlbeurteilungen, Teil II, Band 17, Jahrgang 1997 Heft 2, S. 85-108.

/AVV 90/ Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen. Banz. 42 Nr. 64a (1990).

/BFS 95/ "Probabilistische Ausbreitungsrechnungen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge störfallbedingter Aktivitätsfreisetzungen über den Luftpfad nach den Vorschriften der Störfallberechnungsgrundlagen". D. Ehrlich (Proj.Ltg.) in: Jahresbericht 1995, Bundesamt für Strahlenschutz, S. 295-297. ISSN 0940-7650.

/BFS 97a/ P. Brennecke, A. Hollmann: Anfall radioaktiver
Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland. Abfallerhebung für das Jahr 1995. BfS-ET-25/97. ISSN 0937-4434.

/BFS 97b/ „Langzeit-Ausbreitungs- und -Ablagerungsfaktoren unter Berücksichtigung der thermischen und mechanischen Kaminüberhöhung auf der Basis der Wetterdaten 1986-1993 vom Standort Konrad. „Langzeit-Ausbreitungs- und -Ablagerungsfaktoren unter Berücksichtigung der Orografie und der thermischen und mechanischen Kaminüberhöhung auf der Basis der Wetterdaten1995 vom Standort des ERAM".
„Probabilistische Kurzzeitausbreitungsrechnungen gemäß den Vorschriften der Störfallberechnungsgrundlagen (SBG) unter Berücksichtigung der Orografie und der thermischen und mechanischen Kaminüberhöhung auf der Bais der Wetterdaten 1995 vom Standort des ERAM".
D. Ehrlich (Proj.Ltg.) in: Jahresbericht 1997, Bundesamt für Strahlenschutz. ISSN 0940-7650.

/BFS 98/ BfS-interne Daten. Inverner Vermerk Mai 1998.

/DVGW 96/ Deutscher Verein von Gas-und Wasserfachmännern e.V.
"Eignung von Fließgewässern für die Trinkwasserversorung"
DVGW-Regelwerk, Technische Mitteilung Merkblatt W 251, Stand: August 1996

/EHR 86/ D. Ehrlich, H. Röthemeyer, G. Stier-Friedland, B. Thomauske: "Langzeitsicherheit von Endlagern" in: Atomwirtschaft-Atomtechnik 31 (1986), Nr. 5, S. 231-236.

/EHR 97/ D. Ehrlich, Th. Ibach, V. Kunze, H. Schulze: "Flüchtige radioaktive Stoffe in einem Endlager". Strahlenschutz-Praxis 3/97, S. 37-41. ISSN 0947-434 X

/ERA 86/ "Genehmigung zum Dauerbetrieb des Endlagers für radioaktive Abfälle": Staatliches Amt für Atomsicherheit und Strahlenschutz beim Ministerrat der DDR. Berlin, 24. April 1986.

/FEI 97/ J. Feinhals, V. Kunze: "Schritte der Entsorgung und Strahlenexposition". Strahlenschutz-Praxis 3/97, S. 6-10. ISSN-0947-434 X.

/GEI 98/ Vortrag Dr. Geiser/WTI im BfS Juli 1998

/GNS 98/ Schreiben/Telefax: GNS Dr. Theis vom 15.05.98 an BfS

/GWV 97/ "Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 80/68/EWG des Rates vom 17. Dezember 1979 über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe (Grundwasserverordnung) vom 18. März 1997" Bundesgesetzblatt, Jahrgang 1997, Teil I, Nr. 18, S. 542-544

/IAEA 89/ International Atomic Energy Agency "Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High Level Radioactive Wastes". Safety Series No. 99, IAEA, Vienna (1989)

/IAEA 94/ "Safety Indicators in Different Time Frames for the Safety Assessment of Underground Radioactive Waste Repositories", IAEA-TECDoc-767, Vienna (1994).

/IAEA 97/ "Nukleare Entsorgungskonvention (1997). Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle". Erarbeitet durch Experten von Mitgliedsstaaten der IAEA 1995-1997. Verabschiedung auf diplomatischer Konferenz im September 1997. Auflegung zur Zeichnung am 29. Sept. 1997.

/ICRP 85/ International Commission on Radiological Protection, Publication No. 46: "Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste". Annals of the ICRP 15 /1985/,4.

/KWA 95/ Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz) vom 27.09.1994 (BGBl. I S. 2705), geänd. durch Art. 3 Genehmigungsverfahrensbeschleunigungs G v. 12.9.1996 (BGBl. I. S. 1354).

/LAN 97/ F. Lange, H.P. Berg, D. Ehrlich: "Dosisgrenzwerte - Aktivitätsgrenzwerte - Minimierungsgebot". Diskussion der Vorgehensweise bei den Sicherheitsanalysen für das Endlager Konrad. Jahrestagung Kerntechnik 13.-15. Mai 1997, Aachen; Tagungsbericht, S. 319. ISSN 0720-9207.

/LAWA 93/ Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
"Empfehlungen für die Erkundung, Bewertung und Behandlung von Grundwasserschäden"
Stand: Oktober 1993

/LAWA 96/ LAWA-Arbeitsgruppe 'Grundwasserschutz bei Abfallverwertung und Produkteinsatz' "Aktualisierte Prüfwerte der LAWA-Empfehlungen für die Erkundung, Bewertung und Behandlung von Grundwasserschäden"
Stand: 02. Dezember 1996

/NUR 78/ J.A. Adam, V. L. Rogers: "A Classification System for Radioactive Waste Disposal. - What Waste Goes Where?" NUREG - 0456, June 1978.

/NRC 82/ Nucl. Regul. Comm. (NRC) 10 Code of Federal Regulations, Part 61 (10 CF 61) "Licensing Requirements of Land Disposal of Radioactive Waste", Federal Register 47 (248), pp. 57463 - 57482, 27. Dec. 1982.

/OECD-NEA 91/ "Disposal of Radioactive Waste: Can Long-Term Safety be Evaluated?" A Collective Opinion. OECD/NEA, Paris (1991).

/RÖT 91/ H. Röthemeyer (Hrsg.):
"Endlagerung radioaktiver Abfälle - Wegweiser für eine verantwortungsbewußte Entsorgung in der Industriegesellschaft". VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim (1991).

/RÖT 94/ H. Röthemeyer: "Langzeitsicherheit von Endlagern". Sicherheitsindikatoren und natürliche Analoga. Atw 39, 1994, S. 136-139.

/SBG 94/ Störfallberechnungsgrundlagen für die Leitlinien zur Beurteilung der Auslegung von Kernkraftwerken mit DWR gemäß § 28 Abs. 3 StrlSchV v. 18.10.1983, Neufassung des Kapitels 4 "Berechnung der Strahlenexposition" v. 29.6.1994 (BAnz. 1994, Nr. 222 a).

/SSK 98/ "Freigabe von Materialien, Gebäuden und Bodenflächen mit geringfügiger Radioaktivität aus anzeige- oder genehmigungspflichtigem Umgang". Empfehlung der Strahlenschutzkommission, Entwurf Stand 4.2.1998.

/TWV 90/ "Bekanntmachung der Neufassung der Trinkwasserverordnung vom 5. Dezember 1990" Brundesgesetzblatt, Jahrgang 1990, Teil I, Nr. 66, S. 2612-2629.

/UVPG 90/ Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung vom 12.2.1990 BGBl. I S. 205 (BGBl. III 2129-20).

# Sicherheitskonzeption (I)

## Konzipiertes, in Erkundung und Planung befindliches Endlager Gorleben -G-

**Wesentliche Standorteigenschaften:**

- **Salzstock** mit typischer Struktur von steilstehenden, z.T. gefalteten Gesteinsformationen an seinen Rändern [bedingt durch das Aufsteigen des spezifisch leichteren Salzes].
  **Im Inneren große Partien reinen älteren** und kleinere Partien jüngeren **Steinsalzes für Einlagerungshohlräume**
- **komplexes Deckgebirge** mit wasserführenden und wasserhemmenden Schichten [des Tertiär und Quartär], genau erkundet. **Fließzeiten der oberflächennahen Grundwässer** bis 150 m unter Gelände bis in die Biospähre von **4.000-17.000 Jahren**. Fließzeiten der versalzenen Tiefenwässer unter 150 m Tiefe unter Gelände bis in die Biospäre heute noch nicht angebbar
- **Lösungseinschlüsse im Salzgestein: Alter 250 Mill. Jahre, also keine Wanderung**
- **Salzstockaufstieg 0,01 - 0,02 mm/Jahr ≙ 10-20 m/1 Mill. Jahre**
- **Mittlere Ablaugungsrate 0,04 mm/Jahr ≙ 40 m/ 1 Mill. Jahre**

**Sicherheitskonzeption:**

- **Schutzziele Betriebsphase**

  § 44, 45, 49; 28(3) StrlSchV; Kritikalitätssicherheit; Ausschluß von Auswirkungen zündfähiger Gasgemische; Begrenzung der Temperatur des Salzgesteins (auch Nachbetr. Phase)

  Endlagerungsbedingungen; Anforderungen an Abfälle, Endlager und Betrieb
- **Schutzziele Nachbetriebsphase**

  Langzeitliche Isolierung der Abfälle von der Biosphäre **durch dichten Einschluß (Nullfreisetzung)**

  **Ausschluß zu hoher Gasdrücke** (Dichtwirkung des Salzes), Ausschluß von Auswirkungen zündfähiger Gasgemische

  **§ 45 StrlSchV für unwahrscheinliche Entwicklungen**; Grundwasserverordnung, Kritikalitätssicherheit
- **Abschlußkonzept**

  Versetzen aller Hohlräume, **langzeitstabile Speicherräume für Gase, dichter Einschluß durch hohe Konvergenzraten**, Vefüllung der Schächte

**Endlagertyp:**

**Konzentrieren, sehr lange Isolieren durch dichten Einschluß,**
Verdünnung auf **niedrige Konzentration bei unwahrscheinlichen Entwicklungen.**



# Sicherheitskonzeption (II)

## Geplantes (planfeststellbares), planfeststellungsreifes Endlager Konrad - K -

**Wesentliche Standorteigenschaften:**

- **Einlagerungshorizont in 800 m - 1300 m Teufe, einige zehn Meter mächtige Eisenerzformation (sog. Korallenoolith).** Eingebettet in **geringdurchlässigen Wasserleiter (Oxford), gasdurchlässig,**
  ca. 100 m mächtig, 2-3 km breit, ca. 30 km lang SW-NO-Richtung
- **Einige 100 m mächtige, großflächige Tonschichten über Einlagerungshorizont**
- Kontakt Oxford zur Biosphäre erst in 30 km Entfernung vom Endlager
- **Nur diffusiver Transport (<100 m in $10^7$ a), möglicherweise Stagnation der Formations-Tiefenwässer (Oxford)** seit Ablagerung des Oxford **(160 Mill. Jahre); Planfeststellungsverfahren**: Kontakt Tiefenwässer mit **Biosphäre konservativ nach $3{,}3 \cdot 10^5$ a.**

**Sicherheitskonzeption:**

**Schutzziele Betriebsphase**

- §§ 44, 45, 49; 28(3) StrlSchV; Kritikalitätssicherheit; Ausschluß von Auswirkungen zündfähiger Gasgemische; Begrenzung des Wärmeeintrags in die Endlagerformation

  Endlagerungsbedingungen; Anforderungen an Abfälle, Endlager und Betrieb

**Schutzziele Nachbetriebsphase**

- Sehr lange Isolierung der Abfälle von der Biosphäre; Niedrige Schadstoffkonz. durch Verteilung im Oxford; § 45 StrlSchV; Kritikalitätssicherheit; Grundwasserverordnung; Begrenzung des Wärmeeintrags in die Endlagerformation

  Inventarsbegrenzung?

**Abschlußkonzept**

- Vollständige Verfüllung aller Hohlräume, der Schächte

**Endlagertyp:**

**Konzentrieren, sehr lange Isolieren (Diffusion),** durch räumliche Verteilung langfristig niedrige Konzentration der Schadstoffe. **Kein dichter Einschluß von Gasen.**

## Sicherheitskonzeption (III)

**Oberflächennahes Endlager (fiktiv für Deutschland)**

- **Radiologische Schutzziele § 44, 45, 49 StlSchV**
  Betriebsphase, Nachbetriebsphase

- **Standortspezifische Herleitung nuklidspezifischer maximaler Aktivitätskonzentrationen im Abfall** aus den rad. Schutzzielen

- **Expositionspfade**
  (Beispiel Großbritannien; ca. $6 \cdot 10^5$ $m^3$ Abfall)
  - Direktstrahlung (Co-60; Cs-137)
  - Oberflächenerosion (wenig begrenzend)
  - Inhalation (Wiederbesiedlung) (wenig begrenzend)
  - Brunnenwasser/Grundwasser (H-3; Sr-90)
  - Nahrungskette (C-14; Sr-90; Cs-137)
  - Ähnlichkeit zu "eingeschränkter Freigabe" [Deponie] )

- **Radiolog. Überwachung noch einige 100 a nach Abschluß**



## Sicherheitskonzeption (IV)

**Freigabe fester Stoffe**

| bedingungslos/uneingeschränkt (Umwelt) | bedingt/eingeschränkt (Deponie/Verbrennungsanlage) |
|---|---|
| **Keine Anforderungen an stoffliche Beschaffenheit** | **Ausschluß stoffliche Verwertung/Verwendung** |

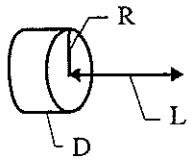
**Radiolog. Schutzziel** = "de minimis"-Dosis **10µSv/a** pro Anwendungsfall

**Freigabe durch behördliches Verfahren**

Einmalige (standortunabhängige) Herleitung **nuklidspezifischer Sekundär-Grenzwerte** für die spezifische Aktivität/(Aktivität) aus dem Schutzziel; SSK 1998

**Betrachtete Expositionspfade/ "abdeckendes Szenarium":**

- **äußere Bestrahlung**




R = 0,5 m
L = 1 m
D = 0,5 m

1800 h/a "aktiviertes Großgerät" (Eisen)

- **Inhalation:**
  1800 h/a, Atemrate 1,2 $m^3$/h,
  1 mg/$m^3$ Staubgehalt Luft
- **Ingestion:**
  inkorporierte Menge 20 g/a
  ohne Vermischung, mit Aufkonzentrationsfaktor 10

**Wesentliche Expositionspfade/ "abdeckendes Szenarium Deponie/Verbrennungsanlage":**

- **äußere γ-Bestrahlung des Deponiepersonals**

- **Inhalation des Staubes auf der Deponie**
- **Exposition durch Radionuklide,** die aus der Deponie ins **Grundwasser** gelangen
- **Exposition** durch **Radionuklide** aus der **Abluft der Verbrennungsanlage**

## Sicherheitstechnische Bewertung der Endlagerkonzepte (I)

### Aktivitätsbegrenzungen der Endlagerkonzepte (Abstufung)

### spezifische Aktivität in Bq/g

| Radio-nuklid | Freigabe (SSK 98) | | oberflächennahe Endlager | | Tiefenendlager Mittelwert aus Lanzeitsicherheitsanalyse | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | bedin-gungslos | bedingt | NUREG[1] (NUR 78) | NRC/USA (NRC 82) | ERAM | KONRAD |
| H-3 | 1,0E+03 | 1,0E+03 | 3,3E+04 | 1,5E+06 | bis 9,3E+03[2] | bis 9,3E+06[2]<br>9,2E+05[4] |
| C-14 | 8,0E+01 | 2,0E+03 | 5,3E+01 | 3,0E+05 | bis 2,6E+05[2]<br>9,6E+01 | bis 2,0E+04[2]<br>6,2E+02 |
| Co-60 | 1,0E-01 | 4,0E+00 | 1,2E+08 | 2,6E+07 | bis 3,1E+08[3] | bis ~1E+09[3] |
| Sr-90 | 2,0E+00 | 2,0E+00 | 3,8E+02 | 1,5E+03 | bis 5,9E+07[3] | bis ~1E+08[3] |
| Tc-99 | 1,0E+01 | 1,0E+01 | | 1,1E+05 | 1,1E+02 | |
| **I-129** | **4,0E-01** | **4,0E-01** | | **3,0E+03** | **1,6E+00** | **1,1E+00** |
| Cs-137 | 5,0E-01 | 1,0E+01 | 1,9E+04 | 3,7E+04 | bis 2,9E+08[3] | bis ~1E+09[3] |
| Pu-241 | 2,0E+00 | 1,0E+02 | | 1,3E+05 | 1,8E+04 | 3,1E+05 |
| **U-238** | **6,0E-01** | **1,0E+01** | | | **3,1E-01** | **2,9E+00** |
| Am-241 | 5,0E-02 | 1,0E+00 | | 3,7E+03 | 1,0E+02 | |
| Pu-239 | 4,0E-02 | 1,0E+00 | | 3,7E+03 | 2,2E+00 | 3,1E+03 |
| **Th-232** | **3,0E-02** | **1,0E+00** | | | **7,3E-02** | **7,7E-01** |
| | | ca. 2000 t rad. Abfälle | | | Gesamtes Abfall-Vol. $\approx 5{,}5 \cdot 10^4$ m³ | Gesamtes Abfall-Vol. $6{,}5 \cdot 10^5$ m³ |
| | Schutzziel 10 µSv/a | | Schutzziel [mSv/a] 0,3 \| 0,25 | | Schutzziel de facto < 0,3 mSv/a | |
| | pro Einzelradionuklid; bei Gemisch Summenformel | | | | wird für Radionuklid-Gemisch erreicht | |
| | | | Annahme einer mittleren Abfallgebindedichte 1 g/cm³ | | | |

1) Umrechnung von Schutzziel 5 mSv/a auf 0,3 mSv/a

2) HTO/C-14 flüchtig Sicherheitsanalyse bestimmungsgemäßer Betrieb

3) für einzelne Abfallgebinde aus Störfallanalyse

4) Ende der Betriebsphase



## Sicherheitstechnische Bewertung der Endlagerkonzepte (II)

### Abfallaufkommen - Endlagerkapazität - Freigabe

| | |
|---|---|
| **Abfallaufkommen bis 2080** | (Ungünstige Annahme: Auslaufen KKW; Anwender in bisherigem Umfang) |
| **ca. 400.000 m³** | mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung **(LAW/MAW)** |
| **ca. 50.000 m³** | mit nicht vernachlässigbarer Wärmeentwicklung **(HAW, MAW(Q), BE)** |

**Endlagerkapazität (LAW/MAW ≙ Abfälle mit geringer Wärmeentwicklung)**

| | |
|---|---|
| **40.000 m³** | ERAM; für **LAW/MAW**; vertragliche Festlegung |
| **bis zu 650.000 m³** geplant | KONRAD; für **LAW/MAW**; Hohlraum wird nach aktuellem Erfordernis erstellt |
| ursprünglich für bis zu ca. 1 Mill. m³ LAW/MAW konzipiert (ges. Salzstock) | GORLEBEN; für HAW/MAW(Q)/BE LAW/MAW |

**z.Zt. nur NO-Hälfte des Salzstocks zur Verfügung. Wieviel Hohlraum für LAW/MAW zur Verfügung steht bzw. wieviel Hohlraum für HAW/BE erforderlich ist, bedarf noch der Untersuchung (Gasbildung)**

**Die Aussage, "die vorhandene/geplante/konzipierte Endlagerkapazität sei viel zu groß" (Faktor 4), ist in dieser simplifizierenden Weise so nicht richtig! Die Kapazität ist jedoch in jedem Falle ausreichend.**

**Freigabe** (SSK-Kriterien Kap. II.2.3 und II.2.4)

- Anwendung auf konditionierte Abfälle liefert zu hohe freigebbare Anteile (!) wegen "Verdünnung" durch Verpackung, Zementierung usw.
- ERAM, unkorrigierte Anwendung auf sämtliche 1994-1997 eingelagerten Abfälle
  ca. 2,7% bedingungslos freigebbar ("Umwelt")
  ca. 12% bedingt freigebbar ("Deponie")
- Fazit: Die Anwendung der SSK-Kriterien kann zur Verminderung des tiefenendzulagernden Abfallvolumens um einige Prozent führen.

## Sicherheitstechnische Bewertung der Endlagerkonzepte (III)

**Gasbildung und Gastransport** — **1. Übersicht Gasbildung**

| Bestandteile der rad. Abfallgebinde/ des Versatzmaterials/der Endlagerformation | Gasbildungs-Prozeß | entstehende Gase | Bilanz | Mittlere Zeitdauer für vollst. Umsetzung (ERAM) (Reaktions-Raten) |
|---|---|---|---|---|
| **Metalle** (v.a. Eisen) | **Korrosion** (langfristig anaerob) | **$H_2$** (bei genügend Wasserangebot) | 1 kg Eisen ↓ 0,57 $m^3$ $H_2$ (Nomalbedgg.) Verbrauch von 0,43 $m^3$ $H_2O$ | **$10^3$-$10^4$ a** (LAW) (0,1-1 µm/a) |
| **Zellstoff, Holz** | **Mikrobielle Zersetzung** | **$CO_2$, $CH_4$ $C_2H_6$** u.a. | 1 kg Zellulose ↓ 0,37 $m^3$ $CH_4$ +0,37 $m^3$ $CO_2$ (Normalbedgg.) | **200-700 a** (LAW) |
| **andere organische Stoffe** | | **$CH_4$** | 1kg and. org. Stoffe ↓ 1,6 $m^3$ $CH_4$ (Normalbedgg.) Verbrauch von 1,3 kg $H_2O$ | **$2 \cdot 10^4$ a** |
| **Zemente, Aschen, organ. Stoffe $H_2O$/Salzlauge/Salz** | **Radiolyse** | **$H_2$** ($O_2$ wird gebunden) andere Gase | z.B. zementierte Filterrückstände 0,1-0,2 Moleküle $H_2$ pro100 eV Strahlungsenergie [2,5-5 ml/(kg Abfall $\cdot 10^4$Gy)] | abhängig von Halbwertszeiten der Radionuklide im Abfall |

**Korrosion:** Hohe pH-Werte → sehr kleine Korrosionsraten (bis 0.001 µm/a)
Wesentlicher Prozeß bei LAW/MAW

**Mikrobielle Zersetzung:** Abhängigkeit von Wasserangebot, Milieu, Temperatur und Druck, Nährstoffangebot und Nährstoffzusammensetzung (Abfälle, Versatz!)
Wesentlicher Prozeß bei organischen Abfällen (LAW/MAW)

**Radiolyse:** Wesentlicher Prozeß bei MAW(Q) und HAW/BE (hohe Dosis)



## Sicherheitstechnische Bewertung der Endlagerkonzepte (IV)

**Gasbildung und Gastransport** — **2. Sicherheitstechnische Fragestellungen**

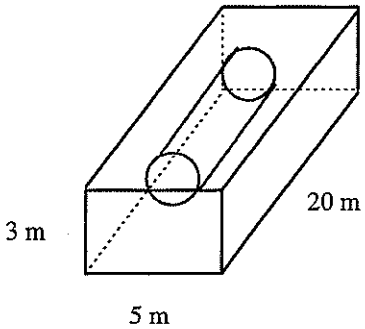
| Sicherheitstechnische Fragestellung | Relevanz für Salz (G, M) bzw. klüftiges Gestein (K) | Präventiv- bzw. Gegenmaßnahmen |
|---|---|---|
| **Vermeidung zu hoher Gasdrücke** zur Gewährleistung der Barrierenintegrität | G, M | Trocknung der Abfälle<br>Technische Ausnutzung der kontrollierten Knallgasreaktion $2H_2 + 0_2 \rightarrow 2H_2O$ durch Zugabe von Oxidationsmitteln.<br>Speicher-Hohlräume im Endlager |
| Entstehung **explos.-fähiger Gasgemische** | G, M, K | Vermeidung großer zusammenhängender Hohlräume durch lückenlosen Versatz (Porenhohlräume) |
| **Freisetzung radioakt. Gase** | G, M, K | Nur für C-14 wichtig.<br>Verhinderung des Austrags für ca. $10^4$ a, z.B. durch Konditionierung des Abfalls, im Salz durch dichten Einschluß |
| **Behinderung eines Lösungszutritts** ins Endlager durch Gasbildung | G, M | Unter Umständen ausnutzbar bei sicherer Begrenzung des Gasdrucks (Lösungszutritt muß langsamer erfolgen als Gasbildung)<br>ERAM: Kapselung für > $10^3$ a |
| **Auspressung kontaminierter Salzlösungen** | G, M | Bei Gasbildung langsamer als Laugen zutritt. Berechnung der ausgepreßten Salzlösungsmenge mit Zweiphasen-strömungs-Modell (in Entwicklung) |

G GORLEBEN ] Salz
M ERAM ]
K KONRAD

## Sicherheitstechnische Bewertung der Endlagerkonzepte (V)

**Gasbildung und Gastransport** — **3. Beispielhafte Modellrechnungen**

- Korrosion, Abfälle ohne organ. Bestandteile, ohne Feuchtigkeit, hier BE
- Eisen in Form des Abschirmbehälters
- Einlagerungsstrecke für BE in Behältern




- Haftwassergehalt 0,1 l $H_2O/m^3$ Salz
- Diffusions-Konstante Salzgrus (Kompaktiert) $D = 10^{-12}\ m^2/s$
- $10^4\ a = t_{Diff} = x^2/2D \rightarrow x = 1\ m$
- Wanderung von Wasser aus 1 m dicker Salzschicht an die Abfälle ≙ ≈ 50 l Wasser → Korrosion von ≈100 kg Eisen

- Gasbildung → ≤ 60 $m^3$ $H_2$ (Normalbedingungen)
  ≙ **0,3 $m^3$** bei 20 MPa (500 m-Teufe)

- Versatz
  - Kompaktierter Versatz, Porosität 0,1 % ≙ **0,3 $m^3$**

- Fazit
  - **Für $10^4$ a Gasspeicherung möglich. Kein Fracen (Aufsprengen) des Salzes**
  - Konservative Betrachtungsweise; wie konservativ?



## Sicherheitstechnische Bewertung der Endlagerkonzepte (VI)

**Gasbildung und Gastransport** — **3. Beispielhafte Modellrechnungen - Fortsetzung -**

a)
- Korrosion, Abfälle mit Feuchte (Restfeuchte, Beton, Versatz)
- Eisen in Form von Fässern (ca. 80 kg/$m^3$), VBA, Container, Schrott (ca. 4000 kg/$m^3$ Abfall)
- Einlagerungskammer Hohlraum V, Abfälle 0,5 V, Versatz 0,5 V
  - * Feuchte: Annahme 1-10% ≙ 10-100 kg $H_2O/m^3$ Abfallgebinde
  - * Gasbildung ≙ 13-130 $m^3$ $H_2$ (Normalbedgg.)/$m^3$ Abfallgebinde (Eisen ausreichend vorhanden)
    ≙ **0,065-0,65 $m^3$ $H_2$ bei 20 MPa** (500 m Teufe)/**$m^3$ Abfallgeb.** in $10^3$-$10^4$ a

oder b)
- Mikrobielle Zersetzung, zellulosehaltige Abfälle
- 80 kg Zellulose/$m^3$ Abfallgebinde (ERAM) → Bildung von
  - * 60 $m^3$ Gas ($CH_4$, $CO_2$) unter Normalbedingungen/$m^3$ Abfallgebinde
    ≙ **0,3 $m^3$ Gas bei 20 MPa/$m^3$ Abfallgebinde** in 200-700 a

Versatz: 1 $m^3$ Versatz/ 1 $m^3$ Abfallgebinde
Porosität 1%→0,1% ≙ Porenhohlraum 0,01-0,001 $m^3/m^3$ Versatz
= **0,01-0,001 $m^3/m^3$ Abfallgeb.**

Fazit
- **Porenhohlraum des Versatzes nicht ausreichend zur Aufnahme der Korrosionsgase/Zersetzungsgase → Gas-Speicherhohlräume erforderlich** (ERAM; GORLEBEN?)
- Konservative Betrachtungsweise, wie konservativ?

# Bewertung der Endlagerkonzepte (VII)

## Langzeitsicherheit-Schutzziele-Prognosemöglichkeiten (Radiologie)

| Zu bewertende(r) Größe (Befund) | Bewertungsmaßstab/ Schutzziel | Szenario/ Endlagerformation | Prognosemöglichkeit Standortentwicklung | Nachweis Einhaltg. Schutz-ziel/Bemerkung |
|---|---|---|---|---|
| **Individual-Dosis (quantitativer Sicherheitsnachweis)** | **"Nullfreisetzung" G** | Basisszenario "dichter Einschluß" | **ja $\lesssim 10^6$ a** unsicher $\gtrsim 10^6$ a ] für Salz | **quantitativer Nachweis der Einhaltung der § 45-Werte sinnvoll für ca. $10^4$ a.** |
| | **§ 45 StrlSchV G** | Laugenzufluß/Salz $\lesssim 10^3$ a | **ja für $10^4$-$10^5$a unsicher $\gtrsim 10^5$ a** ] für Deckgeb. | |
| | **§ 45 StlSchV K** | Kontakt der Abfälle mit Formationswässern/ KONRAD > $10^3$ a | **ja $\lesssim 10^6$ a** (große Tiefe!) **unsicher $\gtrsim 10^5$ a** Deckgeb. | **Danach Unsicherheiten bzgl. Standortentwicklung zu hoch.** |
| Natürliche Analoga*) **Sicherheitsindikatoren (qualitative Sicherheitsbetrachtungen)** | | | | |
| • **Mikroeinschlüsse Salzlösungen (G)** | mögl. langer Bestand der Mikroeinschlüsse | dichter Einschluß der Abfälle trotz Salzlösungen | ab $10^6$ a spekulativ? (Plattentektonik, Vulkanismus) | **Alter ≈ 200 Mill. a, enorme Barrierewirkung des Salzes** |
| • **Salzstockaufstiegsrate /Subrosionsrate (G)** | nach Möglichkeit gering | Freilegen der Abfälle | bis ≈ $10^7$a | |
| • **Stagnation Tiefengrundwässer (K)**<br>• **Lineare Zunahme Salzgehalt der Wässer mit Tiefe (K)**<br>• **400 m Tonschichten ober- und unterhalb Endlager (K)** | möglichst lange währender Zustand | Kontakt der Abfälle mit Formationswässern > ca. $10^3$ a | ab $10^6$ a spekulativ? (Plattentektonik, Vulkanismus) | **Alter der Wässer ≈ 160 Mill. a Nur diffusiver Stofftransport > ca. 1000 m** |
| **Aktivitätskonzentration /Radiotoxizität der Abfälle** | Aktivitätskonzentration/Radiotoxizität natürlich vorkommender Radionulkide in Endlagerformation/ Geosphäre/U-Erz-Lager | | quantitativ | **Sinnvoll für Zeiträume, für die vom Verlust aller Barrieren auszugehen ist.** |

*) Naturbeobachtungen, die etwas über die Rückhaltewirkung von natürlichen Barrieren gegenüber Grundwasser bzw. Schadstoffen aussagen; Vergleich mit Barrieren des Endlagersystems

G = Gorleben K = Konrad

# Sicherheitstechnische Bewertung der Endlagerkonzepte (VIII)

## Schutz der Umwelt/Erweiterung der Sicherheitsuntersuchungen

**Erweiterung der "Schutzgüter"**

- Mensch
- Pflanzen, Tiere
- Wasser, Boden, Luft
- Bodenschätze

Anwendung des Gesetzes zur Umweltverträglichkeitsprüfung auf die Langzeitauswirkungen eines Endlagers

**Erweiterung der zu betrachtenden "Wirkfaktoren"**

- Radiotoxizität der Abfälle
- Chemotoxizität des Abfalls (anorgan. und organ. Bestandteile von Behälter, Fixierungsmittel, Abfall)

**Grundsätzliche** Forderung der Einhaltung **fachgesetzlicher Schutzziele.**

Bisher keine Festlegung konkreter Schutzziele für die Schutzgüter im Hinblick auf Endlager.

Jedoch:

**Schutzgüter Pflanzen und Tiere: Schutz der Arten** am Standort

Untersuchungen IAEA 1992/ UNSCEAR 1996 zur radiologischen Wirkung: Bei Schutz des Menschen mit 1 mSv/a Individualdosis: Schutz der Arten von Flora und Fauna gegeben

**Schutzgut Wasser: (nutzbares Grundwasser)**

Radiotoxizität: Bewertungsmaßstab = **natürlicherweise auftretende Schwankung der Radiotoxizität** von nutzbarem Grundwasser

Chemotoxizität: Bewertungsmaßstab = **schadstoffspezifische** Grenzkonzentrationen*)

**Schutzgut Bodenschätze** (Einschränkung Rohstoffnutzung):

Wahl einer Endlagerformation
- mit keinen wesentlichen Rohstoffvorkommen
- in ausreichender Tiefe
- auch in Hinblick auf das Schutzgut Mensch (Eindringen durch menschliche Aktivitäten)

Mögliche Vergleichsmaßstäbe:
- Radiotoxizität im Umfeld der Endlagerformation
- Chemotoxizität im Umfeld der Endlagerformation (anorgan. Bestandteile)

*) (Grundwasserverordnung, Trinkwasserverordndung, Regelwerk des Vereins von Gas- u. Wasserfachmännern, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser)



# Sicherheitstechnische Bewertung der Endlagerkonzepte (IX)

## Schutzgüter Wasser und Bodenschätze am Beispiel KONRAD

| | Radioaktive Stoffe | Chemotoxische Stoffe |
|---|---|---|
| Schutzziel in nutzbarem **Grundwasser** | Aktivitätskonzentrationen<br>$C^{Rad.}_{Abf.} \approx \Delta C^{Rad.}_{Nat.}$ | Schadstoffkonzentrationen<br>$C^{Chem.}_{Abf.} < C^{Chem.}_{Grenz}$<br>von Fachgesetzen, Verordnungen usw. |
| Modell (extrem konservativ) | $\geq 3 \cdot 10^5$ a Laufzeit des Tiefengrundwassers in das nutzbare Grundwasser.Verdünnung. | |
| Ergebnis | Verzögerung einiger Radio nuklide in geolog. Formationen<br>**in nutzbarem Grundwasser**<br>Abfälle / Natürlich Bq/m³<br>U-238 ≈ 2 / 1…400<br>Ra-226 ≈ 2 / 1…400<br>Th-232 ≈ 0,008 / 0,4…70 | Keine Verzögerung der Schadstoffe angesetzt<br>**in nutzbarem Grundwasser:**<br>$C^{Chem.}_{Abf.} < C^{Chem.}_{Grenz}$<br>1-8 Größenordnungen |
| Mögliche Vergleichs-maßstäbe für **Bodenschätze** | Radiotoxizität<br>$T^{Rad.}_{Bodenschätze}$ im Korallenoolith (Oxford);<br>$T^{Rad.}_{U.-Erz}$ (z. B. Lagerstätte 3 % U) | Chemotoxizität<br>$T^{Chem.}_{Bodenschätze}$ im Korallenoolith (Oxford);<br>auch Radiotoxizitäten<br>$T^{Rad.}_{Abf.}$ und $T^{Rad.}_{U.-Erz}$ |
| Ergebnis | keine wesentliche Erhöhung<br>$T^{Rad.}_{Bodenschätze}$ | $T^{Chem.}_{Abf.} \ll T^{Chem.}_{Bd.sch.}$<br>$T^{Chem.}_{Abf.} \ll T^{Rad.}_{Abf.}$ $t \leq 10^4$ a<br>$\approx T^{Rad.}_{Abf.}$ $t \geq 10^5$ a |

Fazit: Umweltverträglichkeit für Schutzgut Wasser und Bodenschätze gegeben.

# Betriebliche Erfahrungen, Abbau von Konservativitäten I

## Analyse Bestimmungsgemäßer Betrieb

| Vorgang | Kommentierung | Mögliche Maßnahme | Konsequenzen | Fazit |
|---|---|---|---|---|
| **1. Äußere Bestrahlung (Personal)** | Weitgehend nicht vermeidbar<br><br>Mittlere Ausschöpfung ODL-Grenzwerte bei ca. 10 % (ERAM) | Stärk. Abschirmung Abfallgeb. bei gleicher Aktivität (a)<br>oder<br>Verteilung der Aktivität auf mehr Abfallgeb. mit geringerer ODL (b)<br><br>Erhöhung des Ausschöpfungsgrades um Faktor < 10 zur Erhöhung der Aktivität | aufwendigere Handhabung (Masse) (a)<br>oder<br>mehr Handhabungsschritte (b)<br>höhere Indiv.-Dosen pro eingelagerter Aktivität (ab gewisser "Schwelle" der Maßnahme) im Endlager, auch bei Konditionierer (a, b)<br><br>Erhöhung der mittleren Indiv.-Dosen von z. Z. 1 mSv/a um entsprechenden Faktor (bei gleichem Gebindedurchsatz und unveränderter Handhabung) | |
| **2. Freisetzung flüchtiger Radionuklide**<br>Herleitung nuklidspezifischer Aktivitätsbegrenzungen (H-3, C-14, Ra-226) durch "Rückwärtsrechnungen" aus Dosiswerten/ Umgebung unter Beachtung Dosis/Personal | Innere Strahlenexpos./ Personal bzw. Dosis/Umgebung infolge Ableitung weitgehend vermeidbar (wirksame Barrieren Abfallmatrix, Verpackung, Versatz) | **Abbau von Konservativitäten:**<br>1. **Standortspezifische Ausbreitungsrechnungen mit Fahnenüberhöhung** statt mit Wetterdaten Braunschweig ohne Überhöhung<br>2. **Realistischere (kleinere) Freisetzungsanteile aufgrund Erfahrung** (ERAM)<br>3. **Realistischere Szenarien für Menge der unversetzt lagernden Abfälle** | 1. Bei gleicher Dosis/Personal (1% der Grenzwerte Konrad, 10% der Grenzwerte ERAM) bzw. bei gleichen Quelltermen **niedrigere Dosis/Umgebung**<br>Faktor 20 Konrad (< 1 µSv/a)<br>Faktor 10 ERAM (< 4 µSv/a)<br>2. **Größere einlagerbare Inventare flüchtiger Radionuklide** bei gleichen Quelltermen, gleicher Dosis/Personal und gleicher Dosis/Umgebung wie unter 1. (HTO Faktor 2-7; C-14 Faktor 1-50; Ra-226 Faktor 1-16 (ERAM))<br>3. wie 2., jedoch Faktor 4-8 (KONRAD) | **enorme Reserven >> Faktor 20 (KONRAD) hinsichtlich einlagerbarer Mengen flüchtiger Radionuklide** |



# Betriebliche Erfahrungen, Abbau von Konservativitäten II

## Störfall-Analyse

| Vorgang | Kommentierung | Mögliche Maßnahmen | Konsequenzen | Fazit |
|---|---|---|---|---|
| Herleitung nuklidspezif. Aktivitäts-Begrenzungen durch "Rückwärtsrechnungen" aus den Grenzwerten § 28 (3) StrlSchV mit konservativem Modell | Vorgehensweise der Herleitung sekundärer Grenzwerte aus primären Grenzwerten entspricht etablierter Praxis im analytischen Strahlenschutz | **Abbau von Konservativitäten:**<br>1. **standortspezif. Ausbreitungsrechnung** (= probabilistisch nach SBG) statt standortunabhängiger Ausbreitungsrechnung (= deterministisch nach SBG)<br>2. durch **bessere Experimente und Modelle geringere relative Freisetzungsraten.** Beispiel KONRAD, mechanische Lastfälle (diese jedoch nicht dosisbestimmend): Um Faktor $10^3$-$10^6$ niedrigere Freisetzungsanteile | Für jede Wettersituation exakte Berücksichtigung der Abwetterfahnenüberhöhung<br>→ **Faktor 20-30 (KONRAD)**<br>**Faktor 6-30 (ERAM)**<br>niedrigere Störfalldosen bzw. entsprechend höhere mögliche Inventare<br><br>Zur Zeit noch nicht sicher quantifizierbar, **Erwartung: bis Faktor 10 niedrigere Störfalldosen bzw. höhere Inventare**<br>(thermische Lastfälle maßgeblich) | **enorme Reserven** hinsichtlich der maximalen **Aktivitätsinventare für Abfallgebinde** |

# Betriebliche Erfahrungen, Abbau von Konservativitäten III

## Langzeitsicherheit/Gesamtinventarsbegrenzung (KONRAD)

| Vorgang | Kommentierung | | | Mögliche Maßnahmen | Konsequenzen / Fazit |
|---|---|---|---|---|---|
| Konservatives Modell: | Hydraulische Verbindung Tiefenwässer des Oxford mit oberflächennahen Grundwässern:<br>Salzgitter-Höhenzug: indirekt<br>Raum Gifhorn: direkt. | | | Verwendung des heutigen Wissensstandes: | Im Langzeitgleichgewicht **$t >> 10^6$ a:** |
| **Bewegung der Tiefenwässer: 30 km in $3{,}3 \cdot 10^5$ a** | **1. Forderung Planfeststellungsverfahren:**<br>Begrenzung Inventare so, daß<br>**D < 0,3 mSv/a zu jedem Zeitpunkt bis einige $10^7$ a** | | | **Alter Oxford-Tiefenwässer: $1{,}6 \cdot 10^8$ a, stagnierend.** | **Abnahme $C_{Abf.}^{Kaa.}$ mit abnehmender Tiefe** (Salzgehalt Wässer: **1 : 1000**)<br>**Dosis kein Bewertungsmaßstab mehr.** |
| **Nuklidlaufzeiten:** | **2. Ergebnis:**<br>**Mittlere spezifische Aktivität im Endlager**, verglichen mit | **Th-232** | **U-238** | **Nur vertikaler Schadstoffaustausch (Diffusion) durch 400 m Tonschichten ins nutzbare Grundwasser (x ≈ 1000 m)** | **Keine bessere Entsorgungsalternative → Keine begründbare Forderung nach einer Begrenzung der einlagerbaren Inventare aus Gründen der Langzeitsicherheit** |
| **$3{,}3 \cdot 10^5$ a I-129** | | **Faktor** | | | |
| **$1{,}1 \cdot 10^7$ a U-235 U-238 Ra-226** | natürl. Gehalten der Endlagerformation | 10 | 17 | | |
| **>$5 \cdot 10^7$ a Np-237** | **SSK-Werten bedingte Freigabe** | **0,8** | **0,3** | | |
| **$4 \cdot 10^8$ a Th-232** | SSK-Werten bedingungslose Freigabe | 26 | 5 | | (Große Reserven; Begrenzung durch andere Anforderungen) |
| | natürl. Gehalten von Böden | 20-140 | 100-500 | | |

# Kosten (I)

## Konditionierung, Zwischenlagerung, Produktkontrolle (ERAM-Abfälle)

| Kosten für Konditionierung | Abfallart / Konditionierung | Konzentrationsfaktor | DM / m³ Endlagergebinde | DM / m³ Rohabfall |
|---|---|---|---|---|
| Abfälle aus Forschung, Medizin, Industrie | Strahlenquellen, Abfälle aus Deko-Maßnahmen; Zementierung | | **21.750** | |
| | Schredder- und preßbare Abfälle;Hochdruckverpressung | | **15.150** | |
| Abfälle aus KKW | Mischabfälle; Hochdruckverpressung, Trocknung | 3 - 5 | **33.000** | 8.400 |
| | Mischabfälle; Verbrennung Hochdruckverpressung | 20 - 50 | **700.000** | 17.500 |
| | Verdampferkonzentrate; ext. FAVORIT-Trocknungsanlage | ca. 5 | **80.000** | 70.000 |
| | Harze; Rückentleerung von MOSAIK an ext. Standort, Zementierung | ca. 0,5 | **76.000** | 190.000 |
| | Pellets: Rückentleerung aus KONRAD-Containern in 200l-Faß (Umpacken) | | **ca. 12.000** | |

| Kosten für Produktkontrolle | Zeitraum | Mill.DM | Ins ERAM eingel. Menge 1994-97 [m³] | Mittl. Kosten DM/m³ Endlagergebinde |
|---|---|---|---|---|
| Durchf. Stelle | | | | |
| TÜV | 1993-97 | 15,83 | | |
| PKS | 1994-97 | 6,12*) | | |
| | | 21,97 | 17.243 | **1.274** |
| **Kosten für Zwischenlagerung** | | | | **DM/m³ Jahr** |
| KKW oder zentral | | | | **1.500** |

*) enthalten auch VLV-pflichtige Kosten (Investitionen)



# Kosten (II)

## Entwicklung der Endlagerkosten

| **1. ERAM** | 500 Mill. DM für 40.000m³ Abfall = **12.500 DM/m³** (Verhandlungspreis) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **2. KONRAD** | Stand | 04/90 | 12/94 | 01/97 | Bemerkungen |
| **Termine** | | | | | Verzögerungen im Planfeststellungs-verfahren (PFV) |
| Planfeststellungs-Beschluß (PFB) | | 12/91 | 06/95 | 06/97 | |
| Inbetriebnahme (IBN) | | 12/94 | 06/98 | 12/01 | |
| **Kosten in Mill. DM** | | | | | |
| Proj.Kosten bis IBN inkl. Errichtung | | 1.510 | 2.441 (≈45%) | 2.735 (≈30%) | i.w. Verzögerung PFV |
| Betriebsjahre | | 40 | 40 | 80* | * wegen geringerer Abfallmengen |
| Jährl. Betriebskosten | | 45 | 68 | 68 | |
| Betriebskosten gesamt | | 1.800 | 2.720 (≈55%) | 5.440 (≈70%) | |
| Stillegungskosten | | ≈ 200 | 220 | 274 | |
| **Gesamtkosten** | | 3.510 | 5.381 | **8.449** | |
| **Abfallmengen in m³** | | 650.000 | 650.000 | 360.000 * | |
| **Preis in DM/m³** | | **5.400** | **≈ 8.280** | **≈ 23.470 *** | |
| **3. GORLEBEN** | Stand | 11/89 | | 97/98 | |
| **Termine** | PFV | 06/03 | | ca. 2008 | |
| | IBN | 01/08 | | ca. 2013 | |
| **Kosten in Mill. DM** | | | | | |
| Projektkosten bis IBN inkl. Errichtung | | 3.350 | | 4.000** | |
| Jährl. Betriebskosten | | 120 | | | |
| Betriebskosten (bis ca. 2080) | | | | ca. 7.000** | ** Nordostteil des Salzstocks |
| Stillegungskosten | | | | ca. 1.000** | |
| **Gesamtkosten** | | | | **ca. 12.000**** | |

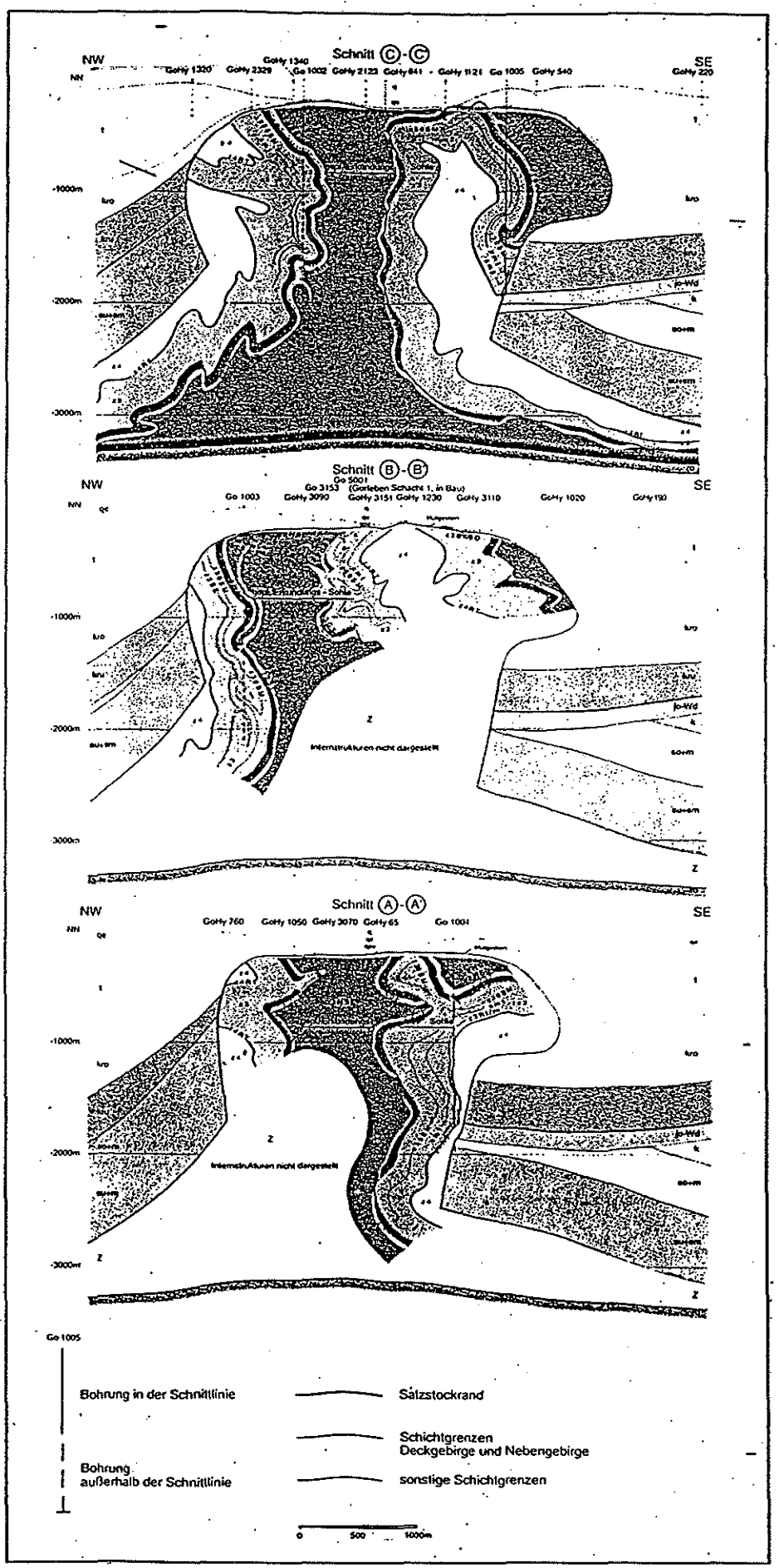



**Abb. 1 Querschnitte durch den Salzstock Gorleben**

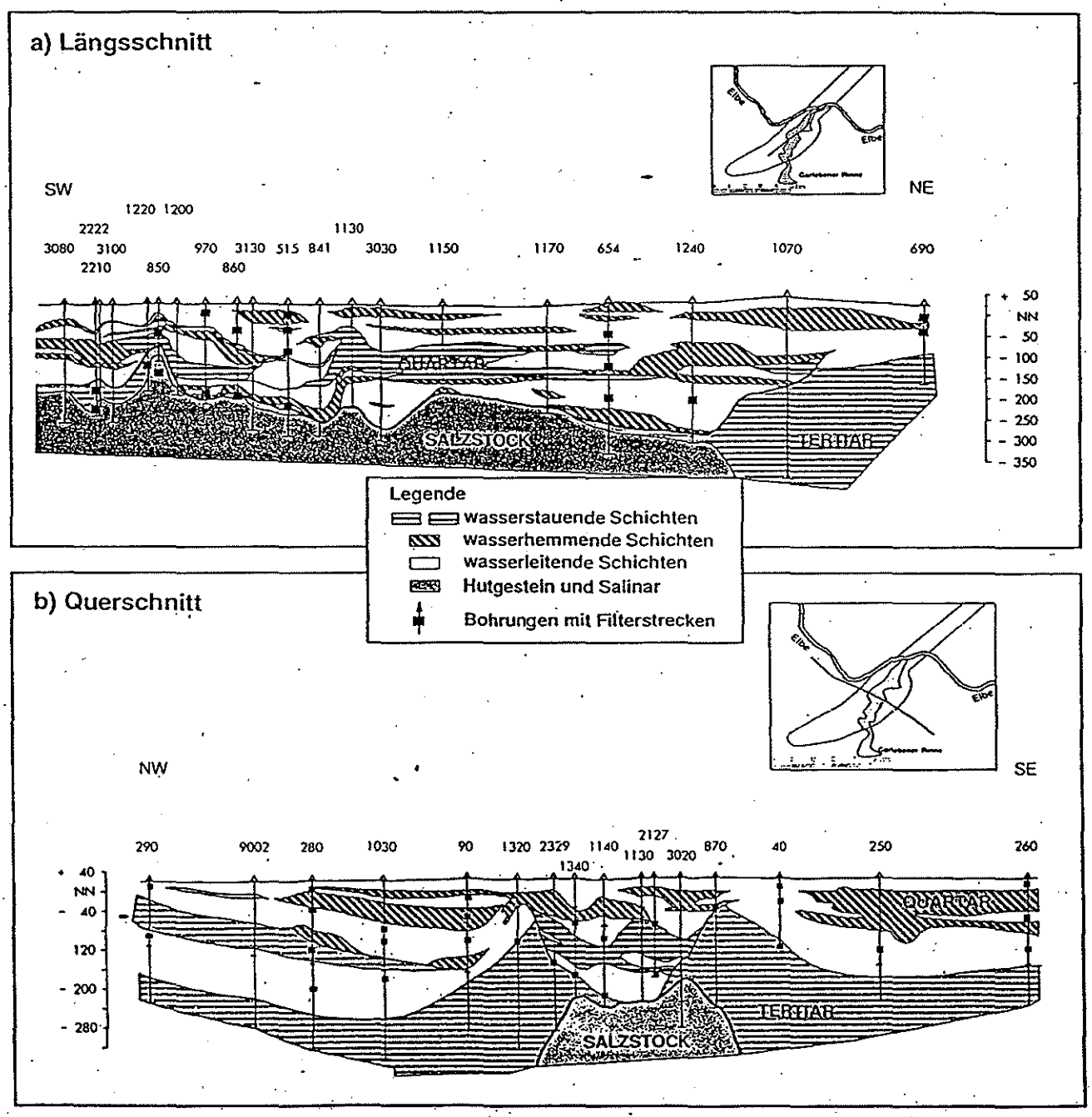



**Abb. 2 Schematische hydrogeologische Schnitte durch den Salzstock Gorleben**

| Projekt | PSP-Element | Obj. Kenn. | Funktion | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Url. Nr. | Rev. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M A A M | M M M M M M M M M | M M M M M M | M M A A A M M | A A M M M A | A A M M | X A A X X | A A | M M M M | M M |
| 9G | 211311 | | | | | BB | BY | 0003 | 00 |

DBE

Aktualisierung des Konzepts "Endlager Gorleben"-Abschlußbericht — Blatt 20

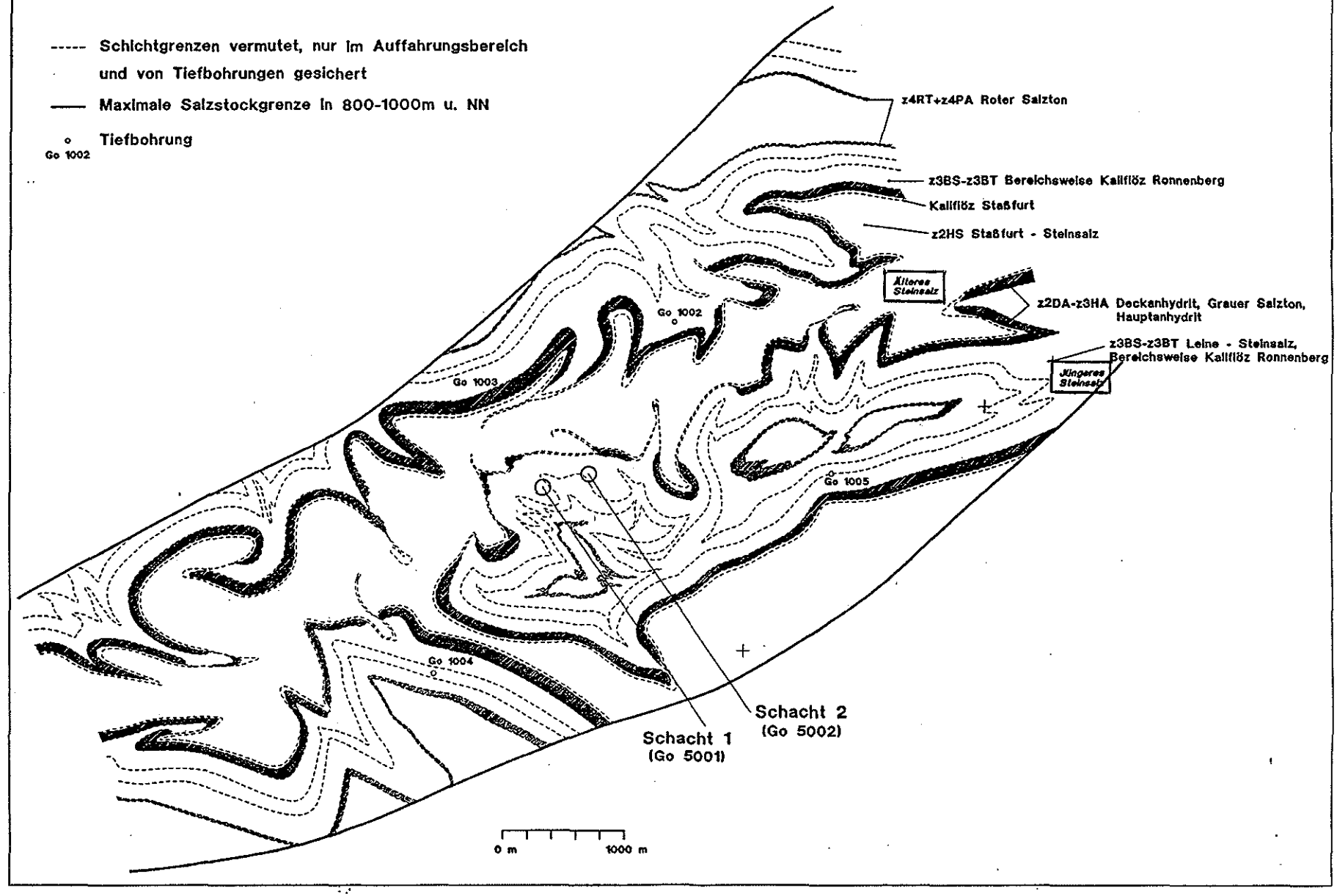



Abb. 2 Arbeitsmodell Salzstock Gorleben 1998

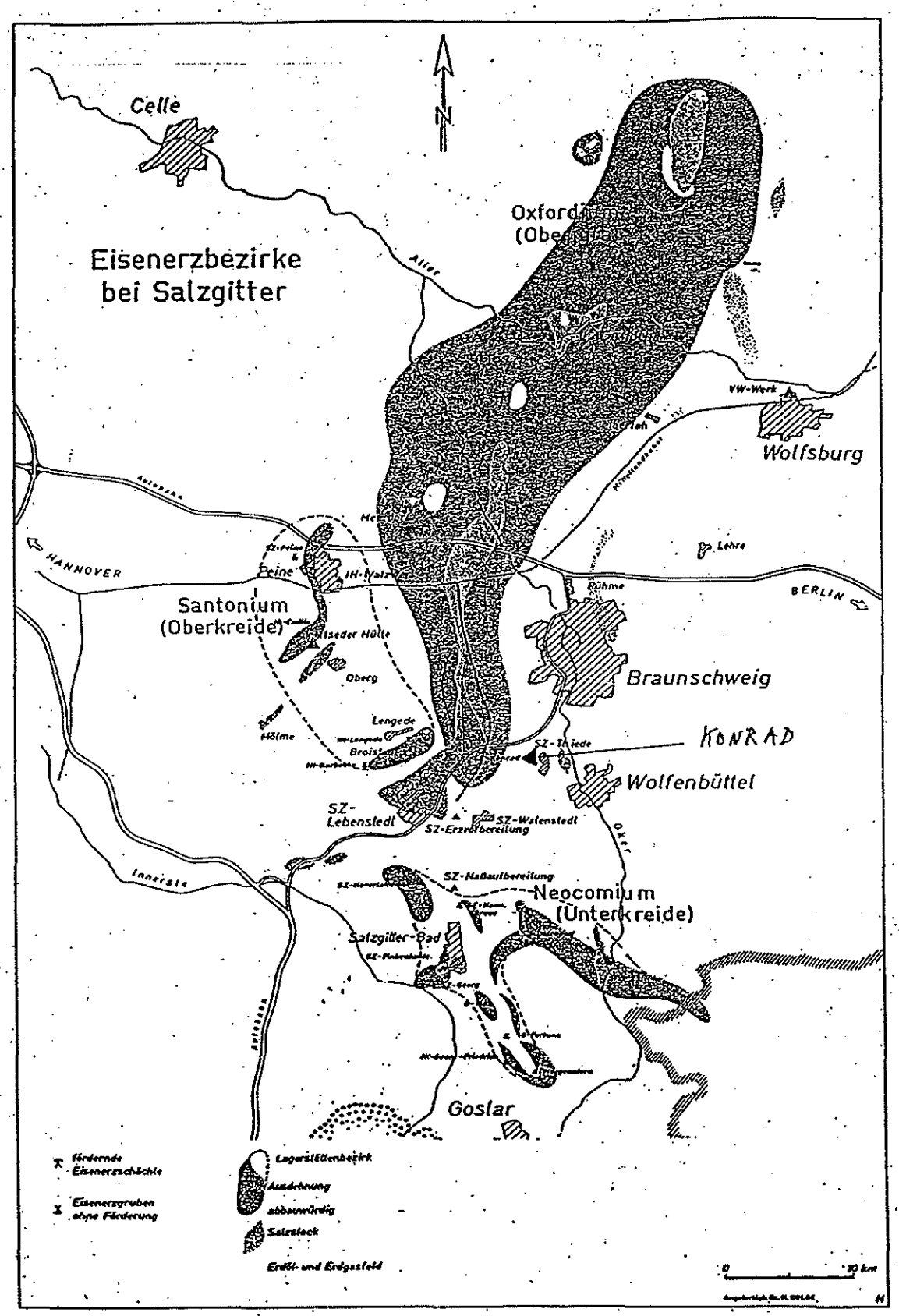
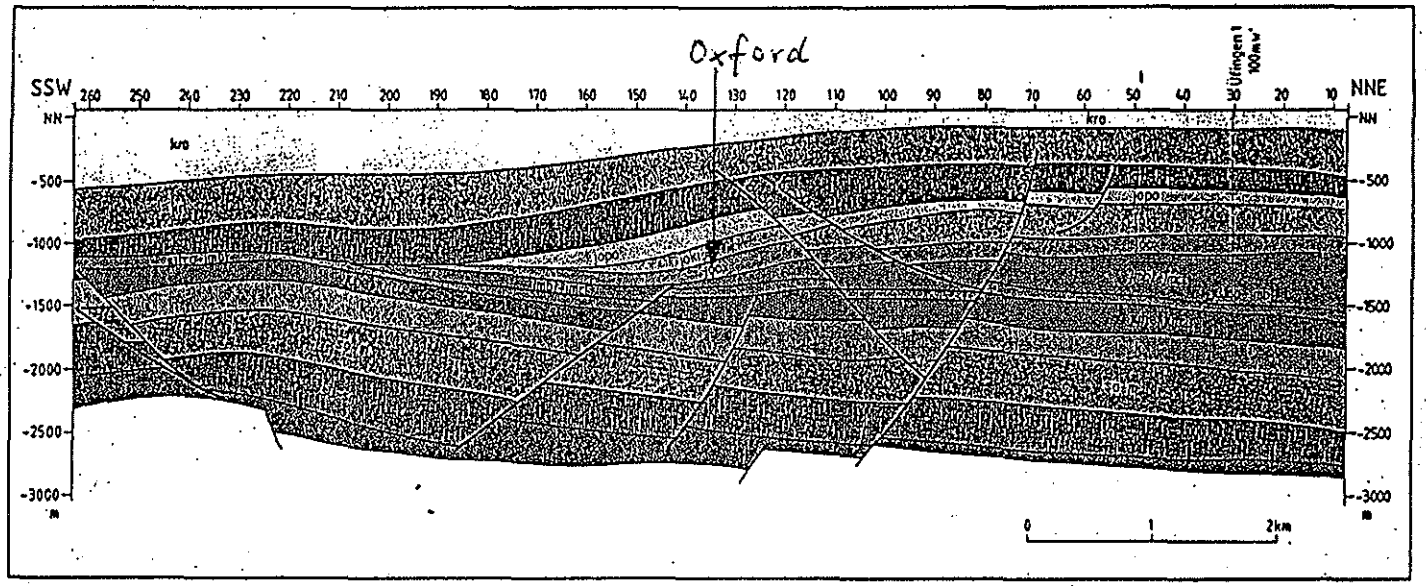



**Abbildung 4**

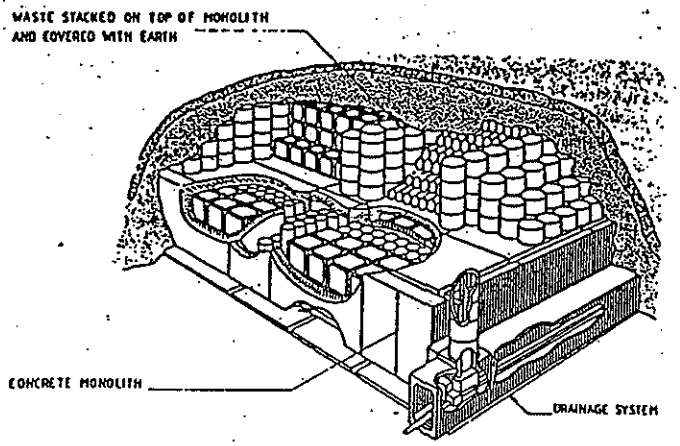
Die verschiedenen Jura- und Kreide-Eisenerzvorkommen im Raum Gifhorn-Goslar. Die Schachtanlage Konrad liegt im Südteil der Eisenerzlagerstätte des Oberjura (großflächig colorierter Bereich)

(aus Unterlagen der Stahlwerke Peine-Salzgitter AG nach H. Kolbe; Stand: Anfang der 60er Jahre)

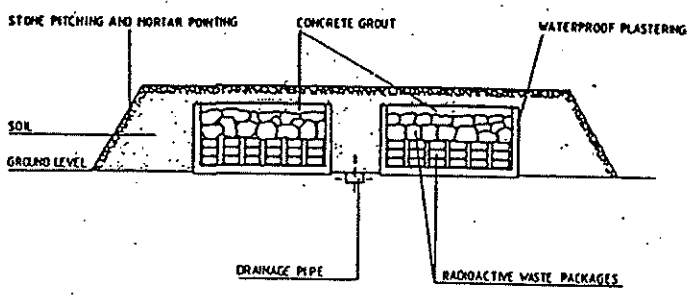


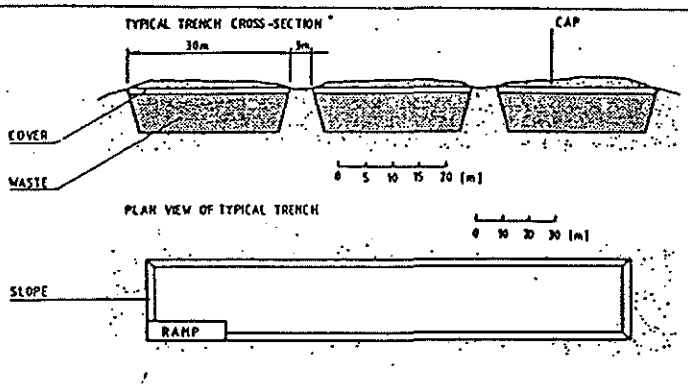

| | |
|---|---|
| kro | Oberkreide |
| krl | Alb |
| krh – krp | Hauterive – Apt |
| krv – krp | Valangin – Apt |
| jopo | Portland |
| jokl | Kimmeridge |
| joox | Oxford |
| jmbt – jmcl | Bathonium – Callovium |
| jutco – jmbj | Obertoarcium – Bajocium |
| juhe – jutcu | Hettangium – Untertoarcium |
| k | Keuper |
| so – m | Oberer Buntsandstein – Muschelkalk |
| su – sm | Unterer – Mittlerer Buntsandstein |
| z | Zechstein |
| S. Spr. | Saulinger Sprung |
| K.-Spr. | Konradsprung |
| Bl. Spr. | Bleckenstedter Sprung |
| I. St. | Immendorfer Störung |
| Wd | Wealden |

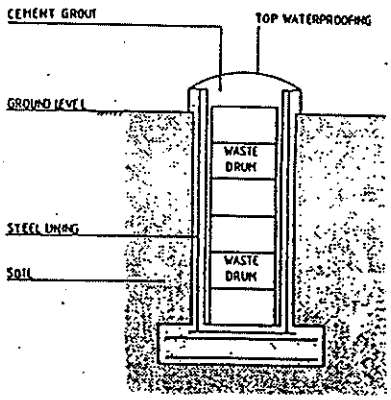
**Abb. 5**
**Profil SSW-NNE im Bereich der Schachtanlage Konrad**




Above-ground or underground concrete monolith with an above-ground earth-covered mound over it



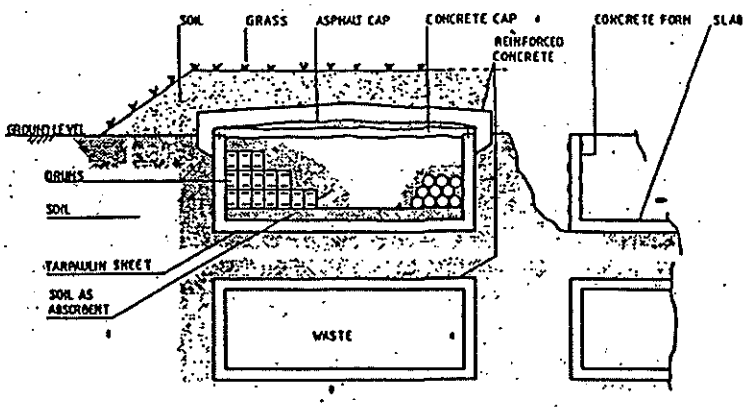




**Abb. 6** Beispiele für oberflächennahe Deponien (Quelle: IAEA-Safety Series No. 63, 1984)

# GEGENÜBERSTELLUNG VON ENDLAGERKONZEPTEN IN SALZ UND HARTGESTEIN (GEISHA)
## COMPARISON OF DISPOSAL CONCEPTS FOR ROCK SALT AND HARD ROCK

**R. Papp (Forschungszentrum Karlsruhe)**

**Zusammenfassung**
Die Studie GEISHA wurde auf Initiative von FZK-PTE im Zeitraum 1994-96 erstellt und größtenteils vom Forschungszentrum Karlsruhe finanziert. Ihr Ziel war es a) ein Endlager für abgebrannte Brennelemente in Hartgestein mit in Deutschland vorherrschenden Eigenschaften zu entwerfen und b) es existierenden Endlagerkonzepten für Salz gegenüberzustellen. Konzeptentwürfe für einen Endlagerbehälter und ein Endlager in Hartgestein wurden erstellt.
Die Standorterkundung konzentriert sich bei Hartgestein auf große ungestörte Blöcke, hingegen bei Salz auf Zonen in hinreichend großer Entfernung von Heterogenitäten und frei von Gebirgslösungen. Studien zur Langzeitsicherheit konzentrieren sich auf das Barrierensystem, haben es jedoch bisher versäumt, geochemische Effekte gebührend zu berücksichtigen.
Keiner der Beiträge zu GEISHA gibt Anlaß zu Zweifeln an der Eignung von Steinsalz als Endlagermedium.

**Summary**
GEISHA is a study which had been stimulated by FZK-PTE and carried out in the period 1994 - 1996, to a large extent financed by Forschungszentrum Karlsruhe. The goal was to a) draft spent fuel disposal in hard rock with German properties and b) contrast it with existing disposal concepts for rock salt. A cask for direct disposal of spent fuel and a repository for hard rock were conceptually designed including a safeguards concept.
Site exploration centers on the detection of sufficiently large undisturbed blocks in hard rock, whereas in rock salt it aims at regions sufficiently distant from heterogeneities and free of brine inclusions. Recent studies pertaining to long-term safety have focused on the barrier system but failed to pay adequate attention to the geochemical environment. Future analyses can be improved if geochemical aspects are dealt with in greater detail.
None of the contributions to GEISHA leads one to be in doubt about rock salt as a suitable geological medium for a repository.

## 1 Einleitung

Seit etwa drei Jahrzehnten werden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Tieflagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen durchgeführt. Sie sind darauf ausgerichtet, Endlagertechniken zu entwickeln und nachzuweisen, daß das mit der Endlagerung verfolgte Schutzziel, die Strahlenexposition von Personen unterhalb der in der Strahlenschutzverordnung festgelegten Grenzwerte so gering wie möglich zu halten, erreicht werden kann. Diese Arbeiten konzentrierten sich in Deutschland von Anfang an auf Salz als Endlagermedium. Bereits in einem Bericht der Amerikanischen Akademie der Wissenschaften aus dem Jahr 1957 wurden Salzformationen wegen des Fehlens von Wasser als besonders geeignet für die Endlagerung radioaktiver Abfälle bezeichnet. Im Zweiten Deutschen Atomprogramm wurde 1963 eine Empfehlung für Salz ausgesprochen, ebenso in einem Gutachten der Bundesanstalt für Bodenforschung, der Vorgängerorganisation der jetzigen Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Alle bisherigen Untersuchungen führten zu dem Ergebnis, daß Steinsalz

als Endlagermedium grundsätzlich geeignet ist. Dabei spielen dessen günstige Eigenschaften, vor allem die hohe Plastizität und Wärmeleitfähigkeit, die extrem geringe Durchlässigkeit für Wasserzuflüsse von außen und die leichte Erstellbarkeit von Hohlraum eine entscheidende Rolle. Seit Mitte der 60er Jahre stand das Salzbergwerk Asse als Versuchsendlager zur Verfügung. Bereits in der ersten Hälfte der 70er Jahre wurden mehrere Standorte nach einem umfangreichen Kriterienkatalog auf ihre prinzipielle Eignung, ein Endlager für radioaktive Abfälle aufzunehmen, untersucht. 1977 wurde beschlossen, ein Erkundungsprogramm nur noch für den Salzstock am Standort Gorleben durchzuführen.

Angesichts der bald nach dieser Auswahl einsetzenden öffentlichen Diskussion begann die BGR damit, als Alternativen zu Gorleben auch Standorte in Hartgestein zu untersuchen. Zu Hartgestein - im weiteren Verlauf häufig auch als Kristallin bezeichnet -, das elastisch ist und hohe Festigkeit aufweist, zählen vor allem Granit und Basalt, aber auch Tuff und Gneis, nicht jedoch Ton und Steinsalz. Diese Untersuchungen, die 1991 auf die neuen Bundesländer ausgedehnt wurden, wiesen erkundungswürdige Standortregionen aus. Um den Kenntnisstand zu Hartgestein als Endlagermedium zu verbessern, hatte das Bundesministerium für Forschung und Technologie schon 1982 beschlossen, sich an dem wissenschaftlich-technischen Programm der Schweizer Endlagergesellschaft NAGRA im Felslabor Grimsel zu beteiligen. Darüber hinaus besteht seit 1995 eine Beteiligung an den Forschungsarbeiten im schwedischen Untertagelabor Äspö. Dadurch wurde das Verständnis der Zusammenhänge, etwa zwischen dem mechanischen Verhalten des Gebirges und den hydrogeologischen Verhältnissen, stark verbessert. Die erzielten Ergebnisse erlauben es, Ausbreitungsvorgänge im Rahmen einer Langzeitsicherheitsanalyse eines Endlagers in Granit zu modellieren. Eine abschließende Wertung der Forschungsergebnisse im Kristallin kann jedoch erst nach Beendigung der Arbeiten in den Felslabors Grimsel und Äspö erfolgen.

Der Zweck von GEISHA, der Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein, besteht darin, die Unterschiede zwischen Steinsalz und Hartgestein in ihrer Eignung als Endlagermedium zu beschreiben. Initiative zu und Koordination von GEISHA lagen beim Forschungszentrum Karlsruhe [1], weitere Beiträge dazu lieferten die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, die Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe, die Gesellschaft für Nuklear-Behälter, die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, die Firma NUKEM und die Bergakademie Freiberg. Das dabei entwickelte Endlagerungskonzept ist jedoch nicht optimiert. Insofern ist bei einer Verallgemeinerung der Ergebnisse, insbesondere mit Blickrichtung auf etwaige wirtschaftliche Vorteile und/oder einen Sicherheitsgewinn, die man beim Übergang vom einen Endlagermedium zum anderen erzielen möchte, Vorsicht angebracht.

## 2 Standorterkundung

### 2.1 Hartgestein

Für Radionuklide, die aus einem Endlager im Hartgestein mit dem Grundwasser freigesetzt werden, kommen als Fließwege vor allem Klüfte und Scherzonen in Frage. Fließvorgänge in der Gesteinsmatrix, deren Durchlässigkeit äußerst gering ist, sind dagegen vernachlässigbar. Die Erkundung von Hartgestein ist daher in erster Linie auf die **Charakterisierung potentieller Fließwege und das Auffinden hinreichend großer Hartgesteinblöcke geringer Durchlässigkeit** ausgerichtet. Dabei soll mindestens ein ungestörter Hartgesteinblock gefunden werden, dessen Größe für die Aufnahme des Endlagers ausreicht. So kritisierte 1997 die Kommission, die alljährlich den Fortschritt im französischen Entsorgungsprogramm bewertet,

daß unter den drei ausgewählten Standortregionen diejenige im Hartgestein keine derartigen Blöcke ausreichender Größe aufweisen würde [2]. Die technischen und die geotechnischen Barrieren im Endlager-Nahbereich, die in Hartgestein den Hauptbeitrag zur Gesamtsicherheit zu leisten haben, müssen im weiteren Verlauf der Endlagerplanung und -errichtung an die geologische Situation angepaßt werden.

Im Unterschied zu den zum Baltischen Schild gehörenden, an der Oberfläche aufgeschlossenen, 1,2 bis 3 Milliarden Jahre alten Kristallinvorkommen in Skandinavien, sind die meisten deutschen Kristallinvorkommen nur ca. 300 Millionen Jahre alt. Da die deutschen Granitgebiete in einer geologisch unruhigeren Region liegen als die skandinavischen, sind sie trotz des geringen geologischen Alters intensiver geklüftet, gestört und teilweise auch deformiert. Zu den untersuchungswürdigen Standortregionen zählen das Fichtelgebirge und der Schwarzwald, in den neuen Bundesländern die Elbezone, das Erzgebirge und das Vogtländer Schiefergebirge, die Lausitzer Scholle, der Thüringer Wald. Einschränkungen ergeben sich aus Unklarheiten hinsichtlich Teufenerstreckung, Erdbebenzonen, anthropogener Beanspruchung aufgrund von Erzvorkommen, Landschaftsschutzgebieten und, im Fall der Schwarzwaldgranite, aus der Nähe zur Randverwerfung des Rheingrabens.

Schwarzwaldgranit besitzt Gemeinsamkeiten mit dem kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz. Die dort gewonnenen Erkenntnisse, insbesondere im Hinblick auf die chemische Zusammensetzung der Tiefengrundwässer, können auf die benachbarten deutschen Kristallinkomplexe übertragen werden. Im Gegensatz zu den skandinavischen Tiefengrundwässern, die besonders in Küstennähe salinen Charakter haben, ist im Nordschweizer und im deutschen Grundgebirge im Einlagerungsniveau gering mineralisiertes Wasser anzutreffen. Bei der Materialauswahl für den Endlagerbehälter und das Verfüllmaterial im Rahmen von GEISHA wurden Analyseergebnisse aus Tiefbohrungen in der Nordschweiz berücksichtigt.

## 2.2 Salinar

Deutschland verfügt nur über wenige an der Oberfläche aufgeschlossene Kristallingebiete größeren Ausmaßes, die für die Endlagerung in Frage kommen. Hingegen sind die Salzlagerstätten des nord- und mitteldeutschen Zechsteingebiets schon früh, teils durch Aufschlüsse an der Erdoberfläche, teils durch Tiefbohrungen und Bergwerke, bekannt geworden.

Jedoch entstehen bei Anwesenheit von Steinsalz häufig komplizierte tektonische Strukturen. Vor 250 Millionen Jahren wurden in einer Warmphase durch Eindunstung des Zechsteinmeeres Schichten aus Steinsalz, Kalisalzen, Anhydrit u.a. gebildet, überlagert von einer Sedimentüberdeckung. Während die Sedimentüberdeckung sich zu Sand- und Tonsteinen verdichtete, behielt das Steinsalz - es verformt sich schon bei geringer Belastung plastisch, es kriecht - seine geringe Dichte bei. Diese Anordnung von schwerem über leichtem Gestein war instabil. Unter dem Einfluß des Auftriebs suchte das Salz sich einen Weg durch Risse in der Überdeckung und bildete dabei die bekannten Salzstöcke (Diapire). Dabei gelangte aus der ursprünglichen Schichtfolge der Salzablagerung das Ältere Steinsalz ins Zentrum der Salzstöcke. Um darin **ausreichend große Partien in hinreichender Entfernung von Heterogenitäten wie Anhydrit- und Carnallitschichten und frei von Lösungsresten** für ein Endlager zu finden, sind aufwendige Erkundungsmaßnahmen erforderlich.

Bei der Eindunstung des Meerwassers in geologischer Vergangenheit wurden Lösungsreste als „Gebirgslösungen" sowie als „Lösungseinschlüsse" (*fluid inclusions*) gespeichert. Zur Beur-

teilung der Langzeitsicherheit von Endlagern sind Kenntnisse über die Zusammensetzung dieser Lösungsreste äußerst nützlich, wie das folgende Beispiel zeigen soll:

Bei der untertägigen Erkundung in Gorleben stieß man erwartungsgemäß auf salinare Lösungen, die in Klüften und in deren unmittelbaren Umgebung gespeichert waren. Die Untersuchung dieser Gebirgslösungen, deren Mengen im Bereich zwischen Litern und Kubikmetern lagen, ergab, daß sie keine Verbindung zu Grundwässern in der Umgebung des Salzstocks hatten. Diese Lösungen waren in geologischer Vergangenheit im Salzgestein eingeschlossen und isoliert worden [3]. Weiter konnte aus der Analyse der Lösungseinschlüsse gefolgert werden, daß die mit der eiszeitlichen Subrosion (Ablaugung) zusammenhängenden Lösungsvorgänge bis ungefähr 80 Meter unter dem Salzspiegel - die horizontale Grenzfläche des Salzstocks gegen das Deckgebirge - wirksam waren [4]. Die Lösungseinschlüsse in diesem Bereich sind das Ergebnis von Reaktionen mit ungesättigten wäßrigen Lösungen. Hingegen ergab sich für Lösungseinschlüsse in 800 bis 1.600 Metern Teufe, daß deren Stoffbestand seit 250 Millionen Jahren durch wäßrige Lösungen aus dem Deckgebirge und dem Nebengestein nicht verändert worden war. Während der Salzstockbildung hat somit nach heutiger Kenntnis eine nachträgliche stoffliche Veränderung durch salzstockfremde Lösungen in großen Teilen der Steinsalzschichten nicht stattgefunden. Die geologische Barriere, die bei Endlagerung in Steinsalz wichtigste Barriere, ist somit trotz Auffaltung in ihrer Funktion unbeeinträchtigt geblieben.

## 3 Geotechnische Barriere

### 3.1 Verfüllmaterial in Hartgestein

Einem Endlager in einer geologisch stabilen Region verleiht die geologische Barriere mechanische Stabilität in einem zeitlich weitgehend unveränderten geohydraulischen und geochemischen Milieu. Wie bereits erwähnt, sind Granitvorkommen im Gegensatz zum originär dichten Salzgebirge in der Regel geklüftet; eine genaue Bestimmung der Wegsamkeiten und der maßgebenden Transportparameter ist, wenn überhaupt, nur mit extremem Aufwand möglich. Im Hartgestein übernehmen infolgedessen die technischen, insbesondere die geotechnischen Barrieren, die Hauptrolle. (Technische Barrieren sind der konditionierte radioaktive Abfall und der Endlagerbehälter, das den Endlagerbehälter umgebende Verfüllmaterial ist eine geotechnische Barriere.) Über den Nachweis ihrer Langzeitfunktionsfähigkeit ist die Langzeitsicherheit des Endlagers nachzuweisen.

An die den Endlagerbehälter umgebende geotechnische Barriere werden im Hartgestein folgende Anforderungen gestellt:

- Begrenzung des Wasserzutritts zu den Gebinden
- Behinderung des Transports freigesetzter Radionuklide
- Positionierung des Endlagerbehälters.

Ton mit hoher Quellfähigkeit, sogenannter Bentonit, verfügt über eine Reihe von Eigenschaften, die diese Anforderungen bestens erfüllen. Darunter ist die geringe hydraulische Leitfähigkeit bei hoher Einbaudichte hervorzuheben: sobald Bentonit mit Wasser gesättigt ist, ist er praktisch wasserundurchlässig, Lösungstransport kann nur über Diffusion erfolgen. Er verfügt weiter über ein hohes Sorptions- und damit Rückhaltevermögen für mobilisierte Radionuklide. Schließlich führt innerkristalline Wasseraufnahme zum Ausfüllen des freien Volumens im Nahfeld und zum Aufbau eines Quelldrucks. Diesen Eigenschaften abträglich ist jedoch die Umwandlung von Montmorillonit - desjenigen Minerals, das für die genannten Vorzüge des Ben-

tonits hauptverantwortlich ist - in Illit. Diese Illitisierung nimmt mit der Temperatur zu, so daß für Endlagerkonzepte, deren wesentliche Barriere Bentonit ist, häufig eine Auslegungstemperatur von 100°C gewählt wird.

In einigen natürlichen Tonlagerstätten wurde die Langzeitfunktionsfähigkeit von Bentonit eindeutig nachgewiesen. So beispielsweise an einem Bentonitvorkommen in Schweden; der Bentonit war durch eine Basaltintrusion - Basalt war in geschmolzener Form eingedrungen und darin erstarrt - über einige hundert Jahre Temperaturen von 100°C ausgesetzt, die Illitisierung ist aber trotzdem noch nicht abgeschlossen und das Mineralgemisch ist noch quellfähig. Eindrucksvoll ist auch das Beispiel des riesigen Uranvorkommens unter dem Cigar Lake in Kanada. Obwohl die dazwischen liegende Tonschicht überwiegend aus Illit besteht, erwies sie sich als wirksame Barriere gegen den Wasserstrom.

Ganz allgemein gilt, daß natürliche Analoga wertvolle Aussagen zur Langzeitfunktionsfähigkeit liefern. Der Nachweis der Langzeitsicherheit wird aus dem Zusammenspiel von Modellrechnungen, Experimenten und Naturanaloga erbracht.

### 3.2 Verfüllung bei Endlagerung im Salinar

Auch bei Endlagerung im Salinar ist der Versatz eine wichtige Komponente des Mehrbarrierensystems. Salzgrus ist wegen seiner Verträglichkeit mit dem Wirtsgestein und seiner Verfügbarkeit das bevorzugte Versatzmaterial. Es erfüllt in den verschiedenen Endlagerbereichen unterschiedliche Funktionen, beispielsweise die

- Mechanische Stabilisierung der geologischen Barriere
- Beherrschung von Gasen
- Schadstoffrückhaltung und Abdichtung gegen Laugen
- Ableitung der Wärme aus den Abfällen.

Gewährleistet der Endlagerbehälter in der Betriebsphase den sicheren Einschluß, so übernimmt der Versatz durch seine zeitabhängige Kompaktion diese Aufgabe vor allem in der Nachbetriebsphase. In den der Langzeitsicherheitsanalyse zugrunde gelegten Störfallszenarien wird Laugenzutritt ins Endlager unterstellt; die Kompaktion infolge der Gebirgskonvergenz erhöht die Festigkeit und verringert Porosität und Durchlässigkeit. Mit Konvergenz bezeichnet man die Eigenschaft von Steinsalz, durch plastische Verformung Hohlräume zu verschließen. Diese Eigenschaft ist in Salzdomen und bei hoher Temperatur besonders ausgeprägt.

In dem im Bergwerk Asse mit BMBF-Mitteln durchgeführten und von FZK koordinierten Streckenlagerungsversuch [5] sind sechs elektrisch beheizte Behälterattrappen mit Salzgrus versetzt. Ein wesentlicher Teil dieses Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines Prognosemodells für Versatzverhalten. An anderer Stelle laufen Untersuchungen an Zuschlagstoffen zum Versatz, die dessen Rückhaltewirkung für Radionuklide erhöhen sollen.

Zusammenfassend gilt für die Barrierenwirksamkeit bei Endlagerung in unterschiedlichem Wirtsgestein: Im Nahbereich eines **Hartgestein**-Endlagers ist Tiefengrundwasser bei Normalbetrieb vorhanden. Im Fernbereich sorgt die geologische Barriere über lange Zeit für mechanisch und geochemisch stabile Verhältnisse. Genaue Kenntnis der komplexen Zusammenhänge im klüftigen Gebirge ist jedoch, wenn überhaupt, nur mit extremem Aufwand zu gewinnen. Daher kommt hier der geotechnischen und der technischen Barriere im Nahfeld das Hauptau-

genmerk zu. Dagegen ist das Endlager im **Salinar** trocken, weiter ist die geologische Barriere die Hauptbarriere. Bei der Erkundung eines Salzstocks hat das Hauptaugenmerk auf dem Nachweis der Integrität dieser Barriere zu liegen. Vergleicht man schließlich die Robustheit dieser Barrieren miteinander, so haben Bentonit und Endlagergebinde - beide zusammen im Meterbereich liegend - die gleiche Wirksamkeit zu erbringen wie hunderte Meter Salz.

## 4 Endlagerbehälter und Endlager

In einer Reihe von Ländern liegen Konzeptplanungen für Endlager in Hartgestein vor. Den Konzepten gemeinsam ist der kompaktierte Bentonit als die geotechnische Barriere im Nahbereich und damit eine Maximaltemperatur von 100°C am Übergang Behälter-Bentonit, weiter die Verfüllung des erweiterten Nahbereichs mit einem Gemisch aus Sand und Bentonit. In jeder Planung wird der Langzeitsicherheit Vorrang vor allen anderen Zielgrößen eingeräumt.

Aktivitäten zu Hartgestein als Endlagermedium haben sich in Deutschland auf die eingangs beschriebene Bewertung von Standortregionen in den alten und den neuen Bundesländern sowie die Beteiligung an den wissenschaftlichen Arbeiten in den Untertagelabors Äspö und Grimsel beschränkt. Das den weiteren Ausführungen zugrunde liegende Modell-Endlager beruht auf dem schwedischen KBS-3-Konzept. Es wurde die Direkte Endlagerung von abgebrannten LWR-Brennelementen betrachtet, was allerdings keine starke Einschränkung darstellt, weil eine Verallgemeinerung auf hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung unschwer möglich ist.

Nach schwedischem Vorbild wird je ein Endlagerbehälter in ein kurzes (~ 8m), vertikales Bohrloch von der Einlagerungsstrecke aus abgesenkt. Für eine Beladung des Endlagerbehälters mit den Brennstäben von drei LWR-Brennelementen mit 45.000 MWd/t Entladeabbrand und 60 Jahren Kühlzeit vor Endlagerung sowie Abständen von 10 m zwischen den Bohrlöchern, von 25 m zwischen den Streckenmitten, wurde die Maximaltemperatur von 100°C am Übergang Behälter-Bentonit errechnet [6]. Das entspricht einem Platzbedarf im Endlager von rund 160 $m^2$/tSM (Tonnen Schwermetall, d.h. im wesentlichen Uran). Für Endlagerung in Steinsalz wurde auf der Basis des POLLUX-Behälters mit acht Brennelementen Nutzlast bei 30 Jahren Kühlzeit ein Platzbedarf von 30 $m^2$/tSM ermittelt [7, 8].

Neben dem Fassungsvermögen (die Brennstäbe von drei Brennelementen) mögen die folgenden technischen Details zum Hartgestein-Endlagerbehälter genügen: Die der Werkstoffauswahl zugrunde gelegten schweizer Wässer geringer Korrosivität erlauben den Einsatz von niedrig legierten Stählen. Ein Korrosionszuschlag von 50 mm auf die aus mechanischen Gründen erforderliche Wandstärke von ebenfalls 50 mm ist für eine Lebensdauer von 1.000 Jahren ausreichend. Der Behälter besteht somit aus einem Rohr von 100 mm Wandstärke und 530 mm Außendurchmesser. Der Boden ist angeschweißt; verschlossen wird er mit einem verschraubbaren und schließlich einem verschweißbaren Deckel. Beladen wiegt er 7.950 kg, für den Transport im Endlager benötigt man zusätzlich einen 25 Tonnen schweren, wiederverwendbaren Abschirmbehälter aus Sphäroguß (Gußwerkstoff mit kugelförmig ausgebildetem Graphit). Die wichtigsten Behälterkenngrößen sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

| | Länge (mm) | Durchmesser (mm) | Wandstärke (mm) | Uran-Masse (t) | Gesamtmasse (t) | Auslegungsdruck (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Hartgestein | 4.900 | 530 | 100 | 1,6 | 8 | 20 |
| Steinsalz | 5.500 | 1.500 | 430 | 4,3 | 65 | 30 |

**Tabelle 1: Kenngrößen von Endlagerbehältern für abgebrannte Brennelemente**

Auf der Basis zweier Modell-Endlager wurden in GEISHA Endlagerkosten abgeschätzt. Bei beiden Endlagern führen zwei Schächte in den Einlagerungsbereich in etwa 900 m Teufe. Jährlich werden 500 t abgebrannte Brennelemente über eine Gesamtbetriebsdauer von 50 Jahren eingelagert. Auf der Basis von Hohlraumerstellungskosten von 600 DM/m$^3$ (Hartgestein) und 300 DM/m$^3$ (Salz) sowie von 3.000 DM/m$^3$ an Bentonitkosten ergeben sich an Gesamtkosten bei Hartgestein ca. 8,5 Mrd. DM, bei Steinsalz 2,5 Mrd. DM. In diesen Summen sind die Betriebskosten, die in beiden Fällen vor allem durch rund 200 Personen Betriebspersonal verursacht werden, enthalten. Nicht enthalten sind Erkundungskosten und Kosten für die Endlagerbehälter. Der Kostenunterschied ist vor allem auf den unterschiedlichen Hohlraumbedarf - 5,8 Mio. m$^3$ im Hartgestein, 1,9 Mio. m$^3$ im Steinsalz - und die spezifischen Hohlraumerstellungskosten zurückzuführen, nicht zuletzt auch auf die Bentonitkosten. In Tabelle 2 sind Kenngrößen der beiden Modell-Endlager angegeben. Es erübrigt sich fast, auf die mit dieser Aussage verbundenen Unsicherheiten hinzuweisen: so hätte z.B. eine Änderung der Bentonitkosten um 50 Prozent eine Kostenänderung um 800 Mio. DM zur Folge.

| | spezif. Platzbedarf (m$^2$/tSM) | spezif. Hohlraumkosten (DM/m$^3$) | Hohlraum (Mio. m$^3$) | Gesamtkosten (Mrd. DM) |
|---|---|---|---|---|
| Hartgestein | 160 | 600 | 5,8 | 8,5 |
| Steinsalz | 30 | 300 | 1,9 | 2,5 |

**Tabelle 2: Kenngrößen der Modell-Endlager**

Die Wahl der Behälter- und Einlagerungskonzepte hat weitere Konsequenzen, unter denen die für die Kernmaterialüberwachung (KMÜ) und die Kritikalitätssicherheit hervorzuheben sind.

Da im Gegensatz zum POLLUX-Behälter im Hartgestein-Endlagerbehälter keine Abschirmung integriert ist, wird letzterer im Endlager in einem wiederverwendbaren Abschirmbehälter transportiert; der Abschirmbehälter kehrt nach abgeschlossenem Einlagerungsvorgang leer aus dem Endlager zurück. Daraus ergibt sich jedoch ein erhöhter KMÜ-Aufwand: es ist sicherzustellen, daß jeder Abschirmbehälter beladen in den Schacht einfährt und leer zurückkehrt. Weiter stehen im Hartgestein die Einlagerungsstrecken offen, bis alle Bohrlöcher einer Strecke belegt sind. Dies könnte dazu führen, daß die Überwachungsbehörde die Bohrlochverschlüsse solange kontrolliert, bis die Strecke verfüllt ist.

Auch im Hinblick auf Kritikalität ist die Sachlage bei Endlagerung in Steinsalz günstiger als in Hartgestein. Aufgrund der Neutronenabsorption in Chlor ist im Normalfall, d.h. in trockenem Salz, die minimale kritische Masse an Plutoniumoxid wesentlich höher als die in Hartgestein. Selbst beim Störfall in Form eines Laugenzutritts, bei dem es zu einer Neutronenmoderation durch das Wasser kommt, liegt die minimale kritische Masse bei 16 bis 19 kg und damit deut-

lich über der in Hartgestein. Rechnungen in den USA für das geplante Endlager Yucca Mountain in Tuff, einem Hartgestein, ergaben, daß Unterkritikalität nur bei einem bestimmten Mindestabbrand der einzulagernden Brennelemente gewährleistet werden kann. Durch administrative Maßnahmen, etwa bei der Brennelementkonditionierung, ist dieser Mindestabbrand nachzuweisen.

Die Abbildungen zeigen den Einlagerungsbereich der Modell-Endlager. In Bild 1 ist die Einlagerung von POLLUX-Behältern und deren Versatz mit Salzgrus dargestellt, in Bild 2 das Prinzip der Einlagerung in Hartgestein nach schwedischem Vorbild.

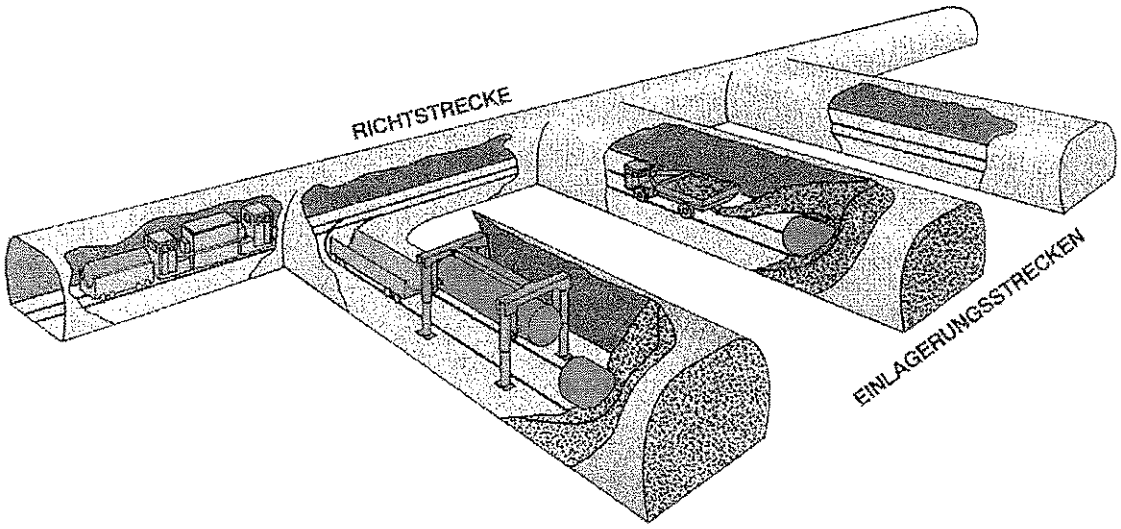



**Bild 1: Einlagerung von POLLUX-Behältern in Strecken im Steinsalz (Quelle DBE)**

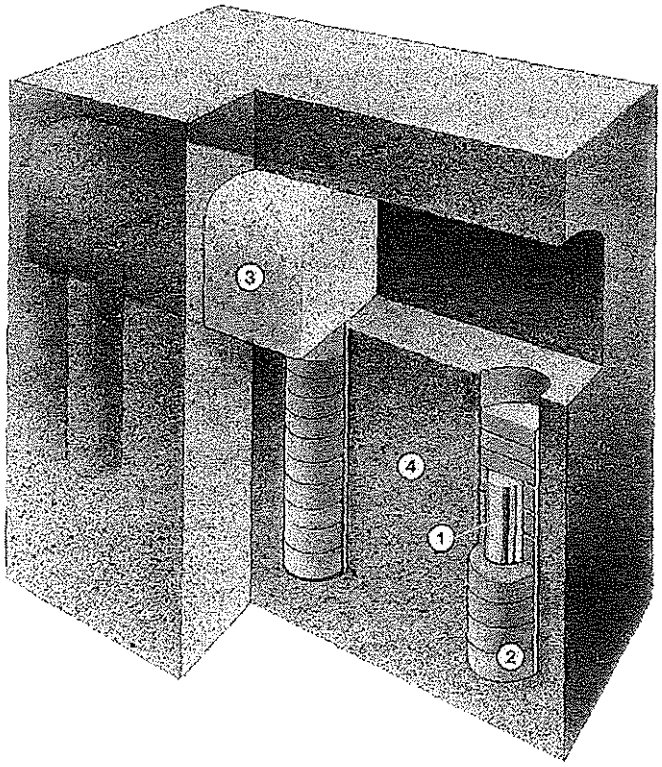



**Bild 2: Bohrlochlagerung in Hartgestein (Quelle SKB). 1: Endlagerbehälter mit abgebrannten Brennelementen, 2: Bohrloch verfüllt mit kompaktiertem Bentonit, 3: Einlagerungsstrecke verfüllt mit Sand/Bentonit-Gemisch, 4: Wirtsgestein**

## 5 Langzeitsicherheitsanalysen

Vergleichbarkeit der Langzeitsicherheit (LZS) von Endlagern setzt voraus, daß die den Berechnungen der zu erwartenden Dosen zugrundeliegenden Modelle ähnlich detailliert sind und die Annahmen zu Daten und Störfalll-Szenarien einen vergleichbaren Grad an Konservativität aufweisen. Am Beispiel einiger im Zeitraum 1985 - 1995 für Salz und Hartgestein durchgeführter LZS-Analysen kann gezeigt werden, welche Effekte in den einzelnen Studien betrachtet wurden und welche Effekte im jeweiligen Endlagermedium dominieren.

Bei Granit handelt es sich hierbei um die LZS-Analyse im Rahmen des „Projekts Gewähr" der NAGRA [9], die Mitte der 80er Jahre entstand, weiter um Studien neueren Datums wie die ebenfalls von der NAGRA durchgeführte Studie „Kristallin-I" [10] und die schwedische Studie „Project-90" [11]. LZS-Analysen für Steinsalz wurden im Rahmen der Systemanalyse Mischkonzept (SAM) [12] und der Studie PAGIS, letztere im Auftrag der Kommission der Europäischen Gemeinschaften [13], durchgeführt.

Die im Nah- bzw. Fernfeld des einen Endlagermediums eingesetzten Rechenmodelle unterscheiden sich deutlich von denen des anderen Endlagermediums. Schon die Abgrenzung zwischen Nah- und Fernfeld ist nicht dieselbe. Zum Nahbereich gehört im Salzstock das Grubengebäude mit allen Segmenten. Das Fernfeld umfaßt das an den Salzstock angrenzende Deckgebirge. Bei den Endlagerstudien für Granit ist die Trennung von Nahbereich und Fernfeld nicht

so scharf. Als Nahbereich gilt bei Kristallin-I und Project-90 eine Zone, die wenige Meter in die Granitmatrix hineinragt, das Fernfeld schließt sich daran an.

Eine wichtige Annahme bei den Granit-Studien ist, daß Grundwasser nach Ende der Betriebsphase an die Abfallbehälter gelangt. Für die Abfälle werden Behältermaterialien wie z.B. Kupfer verwendet, die im geochemischen Milieu des Endlagers über eine hohe Beständigkeit verfügen. Durch die lange Behälterlebensdauer wird die Zeitphase hoher Temperaturen überbrückt. Die Mobilisierung aus der Abfallmatrix kann daher bei den schweizer Studien - anders als bei den Salzstudien - temperaturunabhängig modelliert werden. Bei Project-90 wird die Ausbildung und Wanderung einer Redoxfront angenommen; diese resultiert aus der Anwesenheit von Eisen und dem damit verbundenen reduzierenden chemischen Milieu einerseits, aus den durch α-Radiolyse gebildeten oxidierenden Substanzen andererseits. Die Redoxverhältnisse haben großen Einfluß auf Löslichkeit und Sorption der meisten Radionuklide im Nahbereich. Bei Projekt Gewähr wird im Nahfeld einfach eine Nuklidfreisetzung entsprechend den Auslaugraten und Löslichkeitsgrenzen im Grundwasserstrom modelliert. Bei den beiden neueren Studien sind die Diffusion durch den Bentonit und durch die ersten Meter der Granitmatrix wichtige Transportprozesse im Nahbereich.

Wichtig bei den Salz-Studien sind Zeitpunkt und Verlauf des Laugenzutritts. Die Menge der zutretenden Lauge wird entscheidend durch die Permeabilität der überwiegend mit Salz versetzten Hohlräume bestimmt. Sobald einzelne Segmente vollständig mit Lauge gefüllt sind, beginnt ein durch Konvergenz verursachter Auspreßvorgang der kontaminierten Lauge. Die Behälterlebensdauer ist geringer als bei den Granitstudien, weshalb die Mobilisierung aus der Glas- oder Brennstoffmatrix temperaturabhängig modelliert werden muß.

Im Fernfeld findet bei den Granitstudien der Fluidtransport im geklüfteten Gestein in diskreten Kanälen statt, wobei die Geometrie dieser Kanäle wichtig für die Ausbreitung der Radionuklide ist. In der Gesteinsmatrix wird Diffusion und Sorption an der Oberfläche angesetzt, was je nach Struktur der Matrix und Eigenschaften des Fließsystems eine starke Rückhaltung von Nukliden bewirkt. In Salz wird die ausgepreßte kontaminierte Lauge zunächst mit unkontaminierter Lauge, anschließend im Deckgebirge durch den dort herrschenden Grundwasserstrom verdünnt.

Die rechnerisch ermittelten Dosisbelastungen ergeben Maxima, die in keiner der erwähnten Studien um weniger als den Faktor 50 unter den Grenzwerten der deutschen Strahlenschutzverordnung (0,3 mSv/a) liegen. Sie sind in erster Linie auf die Radionuklide Cs-135, Np-237, J-129 und Se-79 zurückzuführen.

Angesichts der noch andauernden, intensiven F+E-Tätigkeiten zu den LZS-Analysen ist eine vergleichende Bewertung im Augenblick wenig sinnvoll. Beispielsweise werden LZS-Analysen geochemische Effekte besser als bisher berücksichtigen müssen. So belegen Forschungsergebnisse im FZK [14], daß ein Endlagergebinde aus abgebranntem Brennstoff in einem Stahlbehälter - sowohl in granitischer als auch saliner Umgebung - über ausgezeichnete Barrierenwirksamkeit verfügt. In dem sich einstellenden reduzierenden chemischen Milieu sind die Löslichkeitsgrenzen für Uran- und Plutoniumverbindungen sowohl in Salzlösungen als auch in granitischen Wässern äußerst niedrig. Nur *gelöstes* Uran und Plutonium kommen jedoch für einen Weitertransport in Frage, nur sie stellen eine potentielle Umweltbelastung dar. Diese und weitere geochemische Effekte werden in den Rechenmodellen zu berücksichtigen sein.

## 6 Zusammenfassung

In dem abschließenden Schema sind einige wesentliche Unterscheidungsmerkmale zwischen Salz und Hartgestein aufgeführt.

| Erkundung | Nahbereichsbarriere |
|---|---|
| **Hartgestein:** Erkundungsziel sind genügend große, gering durchlässige Gebirgsblöcke.<br>**Salz:** Erkundungsziel sind ausreichend große Partien im Älteren Steinsalz frei von Lösungseinschlüssen und in genügender Entfernung von Heterogenitäten (z.B. Anhydrit). Der Nachweis der Funktionstauglichkeit der geologischen Barriere ist für Salz konzeptführend. | **Hartgestein:** Der Nachweis der Funktionstauglichkeit der technischen und der geotechnischen Barriere ist konzeptführend. Temperatur am Übergang Behälter/Verfüllmaterial und Korrosivität der Wässer relativ gering; dies erlaubt Verwendung niedrig legierter Stähle als Behälterwerkstoff. Bentonit als geotechnische Barriere mit „einstellbaren" Eigenschaften.<br>**Salz:** Zutritt von Lauge zum Endlagergebinde nur beim Störfall. Zeitabhängige Kompaktion von Salzversatz infolge der Gebirgskonvergenz; Versatzkompaktion und Zuschlagstoffe zur Erhöhung der Rückhaltewirkung sind Gegenstand laufender F+E-Arbeiten. |
| **Endlager** | **Langzeitsicherheit** |
| Behälterzahl, Hohlraumbedarf und Endlagerkosten in Hartgestein ca. um Faktor 3 höher als in Salz. Endlagerbehälter für Hartgestein einfacher und billiger, jedoch erfüllt POLLUX-Behälter für Salz zusätzlich Zwischenlager- und Transportbehälterfunktion. | Die bei LZS-Analysen bisher ausgewiesenen Dosisunterschiede sind nicht endlagermedienspezifisch sondern durch die Wahl der Daten und Endlagerkonzepte bedingt. Verbessertes Verständnis der geochemischen Effekte in beiden Endlagermedien als richtungsweisend für zukünftige F+E-Arbeiten. |

## 7 Literatur


[1] PAPP, R., GEISHA, Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA-PTE 3 (August 1997).

[2] Commission Nationale d'Evaluation, 3e rapport d'évaluation, Paris (September 1997).

[3] Gorleben Info Nr. 57, Bundesamt für Strahlenschutz, Informationsstelle Gartow (Dezember 1996).

[4] HERRMANN, A.G., RÜHE, S., Kali und Steinsalz, Bd. 11/10 (Mai 1995) 345-354.

[5] ROTHFUCHS, T., FZKA-PTE Nr. 2, Forschungszentrum Karlsruhe (1996) 269-284.

[6] KORTHAUS, E., private Mitteilung (1994).

[7] BECHTHOLD, W., BRAUN, W., BRÜCKNER, C., CLOSS, K., KNAPP, U., PAPP, R., Systemanalyse Mischkonzept (SAM), Abschlußbericht Hauptband, KWA-2190 A1, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Projektgruppe Andere Entsorgungstechniken (Dezember 1989).

[8] PAPP, R., Broschüre Direkte Endlagerung, FZK-PTE im Auftrag der Gemeinschaftskernkraftwerke Neckar (Januar 1998).

[9] NAGRA, Projekt Gewähr, Bd. 1-5, Nagra Gewähr Report Series NGB 85-01/05, Nagra, Wettingen, Schweiz (1985).

[10] KRISTALLIN-I, NAGRA Techn. Rep. 93-22 (Juli 1994).

[11] SKI PROJECT-90, Vol. I, Statens Kärnkraftinspektion Swedish Nuclear Power Inspectorate Stockholm, Schweden, SKI Technical Report 91:23 (August 1991).

[12] BUHMANN, D., NIES, A., STORCK, R., GSF-Bericht 27/91, Systemanalyse Mischkonzept, TA7, KWA-5702A, Kernforschungszentrum Karlsruhe (Juli 1991).

[13] STORCK, R., EUR 11 778 EN, GSF-Bericht 23/88, Commission of the European Communities, Gesellschaft für Strahlen- und Umwetforschung mbH München, Brüssel-Luxemburg (1988).

[14] GRAMBOW,.B., LOIDA, A., SMAILOS, E., Nuclear Technology, special issue (Februar 1998).

# AUFBRUCH UND ERNEUERUNG - DEUTSCHLANDS WEG INS 21. JAHRHUNDERT

**Koalitionsvereinbarung (Auszug)**

**zwischen der**

**Sozialdemokratischen Partei Deutschlands**

**und**

**Bündnis 90 / Die Grünen**

## 3. Moderne Energiepolitik

### 3.1 Zukunftsfähige Energieversorgung sicherstellen

Die neue Bundesregierung wird eine zukunftssichere, umweltverträgliche und kostengerechte Energieversorgung sicherstellen. Erneuerbare Energien und Energieeinsparung haben dabei Vorrang; dazu gehört auch ein 100.000-Dächer-Programm.

Die Umstrukturierung der Energieversorgung muß den technologischen, ökologischen und energiewirtschaftlichen Erfordernissen Rechnung tragen. Wegen ihrer großen Sicherheitsrisiken mit der Gefahr unübersehbarer Schäden ist die Atomkraft nicht zu verantworten. Deshalb wird die neue Bundesregierung alles unternehmen, die Nutzung der Atomkraft so schnell wie möglich zu beenden.

Noch in diesem Jahr wird die neue Bundesregierung zu Gesprächen über einen neuen Energiekonsens einladen. Gemeinsam mit der Energiewirtschaft sollen die Weichen gestellt werden für den Weg zu einem neuen, zukunftsfähigen Energiemix ohne Atomkraft.

Die neue Bundesregierung wird die Entwicklung zukunftsfähiger Energieversorgungssysteme und wirksame Maßnahmen zur Energieeinsparung fördern. Sie ist der Überzeugung, daß der Einstieg in neue Energiestrukturen von wachsender wirtschaftlicher Dynamik gekennzeichnet sein wird, die durch eine Neugestaltung des Energierechts noch befördert werden wird. Dabei geht es insbesondere um einen diskriminierungsfreien Netzzugang durch eine klare rechtliche Regelung und die Schaffung und Sicherung fairer Marktchancen für regenerative und heimische Energien und eine gerechte Verteilung der Kosten dieser zukunftsfähigen Energien. Die neue Bundesregierung wird den Kohlekompromiß von 1997, der betriebsbedingte Kündigung ausschließt, umsetzen.

Die neue Bundesregierung wird sich gemäß ihrem Grundsatz „Vorrang der Einsparung vor der Erzeugung" mit einem breiten Maßnahmenbündel der Förderung von Einspartechnologien widmen, nicht zuletzt auch angesichts der großen Exportchancen.

Die neue Bundesregierung wird die Hemmnisse beseitigen, die heute noch eine verstärkte Nutzung regenerativer Energien und den breiteren Einsatz der Kraft-Wärme-Koppelung behindern.

Die neue Bundesregierung wird Instrumentarien entwickeln, die zur Anpassung der Strompreise in den neuen Ländern an das Westniveau führen.

**3.2 Ausstieg aus der Atomenergie**

Der Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie wird innerhalb dieser Legislaturperiode umfassend und unumkehrbar gesetzlich geregelt. Dazu vereinbaren die Koalitionsparteien folgendes schrittweises Verfahren.

In einem ersten Schritt wird als Teil des 100-Tage-Programms eine erste Änderung des Atomgesetzes mit folgendem Inhalt eingebracht:

- Streichung des Förderzwecks
- Einführung einer Verpflichtung zur Sicherheitsüberprüfung, vorzulegen binnen eines Jahres
- Klarstellung der Beweislastregelung bei begründetem Gefahrenverdacht
- Beschränkung der Entsorgung auf die direkte Endlagerung
- Aufhebung der Atomgesetz-Novelle von 1998 (mit Ausnahme der Umsetzung von EU-Recht)
- Erhöhung der Deckungsvorsorge

Im zweiten Schritt wird die neue Bundesregierung die Energieversorgungsunternehmen zu Gesprächen einladen, um eine neue Energiepolitik, Schritte zur Beendigung der Atomenergie und Entsorgungsfragen möglichst im Konsens zu vereinbaren. Die neue Bundesregierung setzt sich hierfür einen zeitlichen Rahmen von einem Jahr nach Amtsantritt.

Als dritten Schritt wird die Koalition nach Ablauf dieser Frist ein Gesetz einbringen, mit dem der Ausstieg aus der Kernenergienutzung entschädigungsfrei geregelt wird; dazu werden die Betriebsgenehmigungen zeitlich befristet. Der Entsorgungsnachweis wird angepaßt.

Zur Entsorgung vereinbaren die Koalitionsparteien folgendes:

- Die Koalitionsparteien sind sich einig, daß das bisherige Entsorgungskonzept für die radioaktiven Abfälle inhaltlich gescheitert ist und keine sachliche Grundlage mehr hat. Es wird ein nationaler Entsorgungsplan für die Erblast der radioaktiven Abfälle erarbeitet.

- Für die Endlagerung aller Arten radioaktiver Abfälle reicht ein einziges Endlager in tiefen geologischen Formationen aus.

- Zeitlich zielführend für die Endlagerung aller Arten radioaktiver Abfälle ist die Beseitigung hochradioaktiver Abfälle etwa im Jahr 2030.

- An der Eignung des Salzstocks in Gorleben bestehen Zweifel. Daher soll die Erkundung unterbrochen werden und weitere Standorte in unterschiedlichen Wirtsgesteinen auf ihre Eignung untersucht werden. Aufgrund eines sich anschließenden Standortvergleichs soll eine Auswahl des in Aussicht zu nehmenden Standorts getroffen werden.

- Die Einlagerung radioaktiver Abfälle in Morsleben wird beendet. Das Planfeststellungsverfahren bleibt auf Stillegung beschränkt.

- Grundsätzlich hat jeder Betreiber eines Atomkraftwerks am Kraftwerksstandort oder in der Nähe Zwischenlagerkapazitäten zu schaffen. Bestrahlte Kernbrennstoffe dürfen nur dann transportiert werden, wenn am Kraftwerk keine genehmigten Zwischenlagerkapazitäten existieren und dies von Kraftwerksbetreiber nicht zu vertreten ist. Die Zwischenlager werden nicht zum Zweck der Endlagerung genutzt.