

Georg Arens, Peter Brennecke, Dietrich Ehrlich

Entwicklungen und Fortschritte bei der Risikobewertung von Endlagern für radioaktive Abfälle

1. Einleitung

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) ist für Errichtung und Betrieb von Anlagen des Bundes zur Endlagerung radioaktiver Abfälle zuständig. Dieser gesetzlichen Aufgabe kommt das BfS durch den Betrieb des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben und die Durchführung von Planungsarbeiten für die beiden Endlagerprojekte Konrad und Gorleben nach /1/. Die Sicherheit dieser Anlagen in ihrer Betriebs- und Nachbetriebsphase wird im Rahmen von standortspezifischen Sicherheitsanalysen nachgewiesen /2/. Nachfolgend wird ein Überblick über wesentliche Aspekte derartiger Sicherheitsnachweise, grundlegende Vorgehensweisen und dabei erzielte Fortschritte insbesondere im Hinblick auf die Risikobewertung gegeben.

2. Entsorgungskonzept für radioaktive Abfälle

Das integrierte Entsorgungskonzept des Bundes sieht u. a. die Konditionierung und Endlagerung der radioaktiven Abfälle vor /3/. Die Sicherheitskriterien normieren die Endlagerung als wartungsfrei, zeitlich unbefristete und sichere Beseitigung radioaktiver Abfälle ohne Rückholbarkeit in tiefen geologischen Formationen /4/. Für die Planung von Endlagern und die Durchführung von Endlagerbedarfsprognosen stellt die Kenntnis der vorhandenen und zukünftig zu erwartenden Abfallmengen eine wichtige Voraussetzung dar.

In der Bundesrepublik Deutschland waren am 31. Dezember 1995

- etwa 62700 m³ konditionierte (d. h. verarbeitete und/oder verpackte) radioaktive Abfälle,
- etwa 2900 m³ Zwischenprodukte mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, und

- etwa 30600 m³ unbehandelte radioaktive Reststoffe bzw. Abfälle

vorhanden /5/. Nach bisherigen Erfahrungen fallen im Mittel etwa 4300 m³/a an konditionierten radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung an; demgegenüber ist der jährliche Anfall wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle deutlich geringer. Aus den in Betrieb befindlichen 19 Leistungsreaktoren werden pro Jahr im Mittel etwa 480 Mg ausgediente Brennelemente entladen.

Das Entsorgungskonzept des Bundes sieht für die Endlagerung radioaktiver Abfälle die folgenden Möglichkeiten vor:

- Seit der deutschen Vereinigung am 03. Oktober 1990 steht das in der ehemaligen Deutschen Demokratischen Republik betriebene Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) für schwach- und mittelradioaktive Abfälle mit geringen Konzentrationen an Alpha-Strahlern zur Verfügung. Die Dauerbetriebsgenehmigung des ERAM gilt nach § 57 a Abs. 1 Satz 1 Atomgesetz (AtG) bis zum 30. Juni 2000 fort. Die Einlagerung radioaktiver Abfälle wurde am 13. Januar 1994 wieder aufgenommen; das Volumen der bis Mitte 2000 einzulagernden radioaktiven Abfälle/Abfallgebinde beträgt ca. 40 000 m³.
- Das ehemalige Eisenerzbergwerk Konrad ist als Endlager für alle festen bzw. verfestigten radioaktiven Abfälle vorgesehen, die eine vernachlässigbare thermische Einwirkung auf das Wirtsgestein ausüben. Es ist für ein einzulagerndes Abfallgebindevolumen von bis zu ca. 650 000 m³ vorgesehen. Der Betriebsbeginn dieser Anlage wird kurz nach der Jahrtausendwende erwartet.
- In das geplante Endlagerbergwerk im Salzstock Gorleben sollen alle Arten fester bzw. verfestigter radioaktiver Abfälle eingelagert werden, insbesondere wärmeentwickelnde Abfälle aus der Wiederaufarbeitung und ausgediente Brennelemente. Die Eignung dieses Salzstocks wird zur Zeit in einem umfassenden Standorterkundungsprogramm untersucht. Nach Abschluß der Erkundungsarbeiten und positiver Bewertung der Eignung des Salzstockes Gorleben sind Errichtung und Betrieb eines Endlagers für alle Arten radioaktiver Abfälle geplant.

3. Die Sicherheit in der Betriebsphase

Im Jahr 1967 wurde in Deutschland mit der versuchsweisen Verbringung radioaktiver Abfälle im tiefen geologischen Untergrund begonnen. Im

ehemaligen Salzbergwerk Asse bei Wolfenbüttel wurden von 1967 bis 1978 schwach- und mittlerradioaktive Abfälle eingelagert. Ebenfalls in einem ehemaligen Salzbergwerk wurde fast zeitgleich in der DDR das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) östlich von Helmstedt errichtet, in dem immer noch schwach- und mittlerradioaktive Abfälle eingelagert werden.

In beiden Anlagen wurden im Hinblick auf den Strahlenschutz Erfahrungen im betrieblichen Umgang mit radioaktiven Abfällen gesammelt und Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für die Endlagerung stärker Wärme entwickelnder Abfälle durchgeführt.

Die Bewertung von Risiken, die sich in der Betriebsphase eines Endlagers ergeben, lassen sich in folgende Teilbereiche untergliedern:

- Risiken, die sich aus dem Antransport der Abfälle ergeben
- Risiken, die sich aus dem Normalbetrieb des Endlagers ergeben
- Risiken, die sich aus Störfällen ergeben

Risiken, die durch den Antransport der Abfälle vom Abfallerzeuger bis zum Endlager entstehen, werden durch die Transportbestimmungen, insbesondere die Eigenschaften der Behälter, begrenzt /6/. Die Transportbestimmungen sind unabhängig vom Betrieb eines Endlagers, und sind deshalb nicht Teil der betrieblichen Risikobewertung. Gleichwohl werden die Eigenschaften der Transportbehälter in den betrieblichen Sicherheitsanalysen berücksichtigt.

Für den Normalbetrieb eines Endlagers sind zunächst die Risiken zu betrachten, die sich im Umgang mit den Abfällen für das Betriebspersonal ergeben. Da die Abfälle nach ihrer Einlagerung in gewissen zeitlichen Abständen mit Versatzmaterial (Salzgrus, Filterasche) eingeschlossen und die so verfüllten Hohlräume z.B. durch eine Abschlußmauer vom betriebenen Grubengebäude abgetrennt werden, ist das Betriebspersonal praktisch nur während der Annahme, der Transport- und der Einlagerungsvorgänge einer äußeren Strahlung ausgesetzt. Flüchtige radioaktive Stoffe, die in Form von Gasen (Tritium, Radiokohlenstoff, Radon) trotz Verarbeitung der Rohabfälle, Verpackung der Abfallprodukte und Versatz der Abfallgebinde in geringen Mengen freigesetzt werden, können teilweise auch aus versetzten Einlagerungsabschnitten in die Atemluft der Bergleute gelangen und zu einer inneren Strahlenexposition führen. Aus Strahlenschutz-Gründen sind hier Begrenzungen der Radionuklidkonzentrationen

(Aktivitätskonzentrationen) in der Bergwerksluft (Wettern) erforderlich. Dies wird durch eine gute Bewetterung (Belüftung) des Bergwerks, durch eine gute Konditionierung der radioaktiven Abfälle, aber auch durch entsprechende Versatz- und Abschlußtechniken, erreicht.

Die Erfahrungen mit dem Einlagerungsbetrieb in der Asse und im ERAM weisen aus, daß die Strahlenexposition des Personals durch äußere Bestrahlung trotz der großen Ansammlung radioaktiver Abfälle gering gehalten werden kann. So konnte im ERAM durch den Einsatz entsprechend abgeschirmter Transport- und Einlagerungsfahrzeuge erreicht werden, daß die Individualdosen des Transport- und Einlagerungspersonals unter 2,5 mSv/a /7/ entsprechend 5% des Jahresgrenzwertes der Strahlenschutzverordnung /8/ liegen (Abb. 1).

Die Freisetzung und Ableitung flüchtiger radioaktiver Stoffe wie Tritium, Radiokohlenstoff und Radon mit der Bewetterung ist durch den Einsatz entsprechender Abfall-Konditionierungs- und Versatz-Techniken ebenfalls gering. Für das Personal im ERAM wurden in den Jahren 1994-96 Individualdosen (Effektivdosen) durch die Inhalation von Radionukliden ermittelt, die weniger als 0,15 mSv/a /7/ entsprechend 3% des Jahresgrenzwertes der Strahlenschutzverordnung /8/ betragen (Abb. 1).

Neben den flüchtigen radioaktiven Stoffen ist in der Betriebsphase auch den nicht radioaktiven Gasen Aufmerksamkeit zu widmen, die in den Abfällen durch chemische Reaktionen der Materialien mit oder ohne Sauerstoffzufuhr (Korrosion), durch radiolytische Zersetzung oder durch mikrobielle Vorgänge gebildet werden können.

Bei den entstehenden Gasen handelt es sich vornehmlich um Wasserstoff, Kohlendioxid und Methan. In der Betriebsphase ist vor allem der leicht entzündliche Wasserstoff zu betrachten. Durch den oben erwähnten dichten Einschluß der Abfallgebinde in geeignetes Versatzmaterial, bei dem nur sehr kleine, weitgehend nicht zusammenhängende Hohlräume verbleiben, wird erreicht, daß möglicherweise angesammelte explosive Gasgemische bei einer Zündung keine nennenswerten Auswirkungen hätten.

Zusätzlich zu der meßbaren und gut kontrollierbaren Strahlenexposition für das Betriebspersonal sind in den Sicherheitsanalysen für den Betrieb eines Endlagers die Risiken einzuschätzen, die sich durch die Ableitung von Radionukliden in die Umgebung ergeben können. Im wesentlichen wird hier die mögliche Ausbreitung von flüchtigen Radionukliden über die Abwetter des Endlagers berechnet. Aus den Berechnungsergebnissen

werden dann maximal zulässige Radionuklidkonzentrationen und Radionuklidmengen in den Abwettern abgeleitet. Die im Betrieb des Endlagers gemessenen Radionuklidkonzentrationen bzw. abgeleiteten Aktivitätsmengen sind i. a. deutlich niedriger als die zulässigen. Für den Betriebszeitraum des ERAM ergeben sich Individualdosen für Personen in der Umgebung des ERAM, die unter $1 \mu\text{Sv/a}$ liegen /7/. Das ist weniger als 3% des Jahreshgrenzwertes der Strahlenschutzverordnung (Abb. 1) und somit weniger als ein Tausendstel der natürlichen Strahlenexposition.

Durch einen Vergleich der Ableitungen von flüchtigen Radionukliden aus Endlagern /7/ mit den Ableitungen aus anderen kerntechnischen Anlagen, z.B. aus kommerziellen Kernkraftwerken /9/, kann das Risiko für die Umgebung eingeordnet werden (Tab. 1). Der Vergleich zeigt, daß im ERAM dosisrelevante Radionuklide nicht (Jod-131) oder in eher geringerem Maße (Aerosole, Radiokohlenstoff) als in Kernkraftwerken und Rn-222 als Edelgas nur in geringem Umfang abgeleitet werden. Die Auswirkungen auf die Umgebung infolge der Ableitung von Radionukliden durch den Betrieb eines Endlagers sind somit geringer als bei Kernkraftwerken. Dabei ist hinsichtlich einer Risikobewertung noch zu beachten, daß dieses Niveau durch den Einsatz einfacher Hilfsmittel erreicht wird und somit keine möglicherweise störanfälligen technischen Systeme, Komponenten und Regelungseinrichtungen erforderlich sind.

Neben dem bisher betrachteten normalbetrieblichen Ablauf sind auch die Wahrscheinlichkeit und die Konsequenzen eines Handhabungsstörfalls durch technisches oder menschliches Versagen bei der Einlagerung der Abfälle im Hinblick auf die radiologischen Auswirkungen für Personal und Umgebung zu bewerten. Die Erfahrungen in der Asse und im ERAM weisen bisher keine solchen Ereignisse mit radiologischen Folgen aus.

Die Sicherheit in der Betriebsphase, wie sie in den bisherigen Abschnitten beschrieben wurde, ist nicht per se vorhanden, sondern beruht auf mehr oder weniger detaillierten Sicherheitsuntersuchungen, die Bestandteil einer jeden Einlagerungs- oder Endlageranlagen-Genehmigung sind.

Für die Versuchsanlage Asse (Einlagerungsbetrieb 1967-1978) war seinerzeit ein weniger aufwendiges Genehmigungsverfahren nach § 3 der Strahlenschutzverordnung erforderlich. Im Rahmen der durchgeführten Sicherheitsbetrachtungen erwiesen sich für die Begrenzung der Strahlenexposition des Personals und der Ableitungen im wesentlichen die Bestimmungen des Transportrechts und gewisse Grundanforderungen an die

Abfälle (z.B. "nicht faulen", "nicht gären", "keine freien Flüssigkeiten") als ausreichend.

Diese auf Erfahrungen basierende, heuristische Vorgehensweise wurde auch im ERAM praktiziert. Dabei wurde abschnittsweise vorgegangen: 1972 wurde nach detaillierten Eignungsuntersuchungen die Standortgenehmigung erteilt. 1974 erfolgte die Genehmigung zur Errichtung des Endlagers mit der Maßgabe, die Umrüstung der Schachtanlage sowie Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu den Transport- und Endlagertechniken durchzuführen. Nach der Errichtung schloß sich 1978 die Phase der Inbetriebnahme mit einem Versuchsbetrieb an, dem Funktionstests an Anlagen und Komponenten sowie Tests mit nichtradioaktiven und radioaktiven Stoffen vorausgegangen waren. 1981 schließlich wurde die erste Genehmigung zum Betrieb für 5 Jahre, 1986 die zweite, noch heute gültige Genehmigung zum Dauerbetrieb erteilt. Bei diesem formal bereits weiter ausgebildeten Genehmigungsverfahren wurden sukzessive immer umfangreichere Sicherheitsbetrachtungen einbezogen.

Für das geplante Endlager Konrad schließlich ist nach dem Atomgesetz ein atomrechtliches Planfeststellungsverfahren mit geschlossener, quantitativer Sicherheitsanalyse festgelegt. Diese umfaßt für die Betriebsphase die theoretische Analyse der radiologischen und ggf. nichtradiologischen, aber abfallbedingten Auswirkungen wie die Wärmeerzeugung der Abfälle auf Anlage, Personal und Umgebung im Normalbetrieb und bei Störfällen. Auf die Konsequenzen aus dieser Analyse, die nach einem iterativen Prozeß schließlich in Anforderungen an Abfall, Anlage und Betrieb mündet, wird in Kap. 6 eingegangen.

Gegenstand der Sicherheitsanalyse sind neben Berechnungen der zu erwartenden Strahlungsfelder in der Anlage (Handhabung des Abfalls) und ihrer Umgebung (Anlieferung des Abfalls) vor allem Modelle zur Beschreibung des Flusses freigesetzter radioaktiver Stoffe vom Abfall bis in die Umgebung. Rückhalteprozesse in den verschiedenen Barrieren (Abfallmatrix, Verpackung, Versatzmaterial, Kammerabschlüsse) und das Ausbreitungsverhalten in den Grubenwettern und in der Atmosphäre sind hierbei für den Normalbetrieb und für Störfälle konservativ, aber möglichst realitätsnah zu beschreiben.

F- und E-Arbeiten zur Abfallcharakterisierung unter normalen und einwirkungsbedingten Umständen (Fallversuche, Brandversuche) /10, 11/ haben in den vergangenen Jahren erste quantitative Kenntnisse darüber erbracht, wodurch und wie stark Radionuklide aus den Abfallgebänden

freigesetzt werden können. Als radiologisch bedeutsamster Störfall erwies sich dabei das Ereignis "Brand eines mit Abfall beladenen Transport- bzw. Handhabungsfahrzeuges im Grubengebäude". Im Fall eines Brandes kommt es - aufgrund von Kaminwirkung und wegen der relativ engen Räumlichkeiten untertage - zu höheren Brandtemperaturen und zu längeren Brandzeiten als übertage. So mußte im Planfeststellungsverfahren Konrad als abdeckendes Ereignis ein Brand mit 800° C und 1 Stunde Dauer - statt ½ Stunde Dauer wie in den Transportbestimmungen - unterstellt werden. Insgesamt sind die freigesetzten Radionuklidanteile im Verfahren Konrad unter sehr konservativen Annahmen ermittelt worden. Untersuchungen an einer realistischen Abfalldatenbasis zeigen außerdem, daß die nach der Störfallanalyse maximal zulässigen Radionuklidkonzentrationen in den Abfallgebänden nur zu einem geringen Anteil ausgeschöpft werden. Die realistisch zu erwartenden Konsequenzen eines Störfalles liegen somit weit unterhalb der rechnerisch ermittelten maximalen Konsequenzen.

Weiterhin wurde das Instrumentarium zur Beschreibung der atmosphärischen Ausbreitung laufend ergänzt und verfeinert. So konnte z. B. durch die Verwendung standortspezifischer meteorologischer Daten und unter Berücksichtigung des Austrittsimpulses und der höheren Temperatur der Abwetter gegenüber derjenigen der Umgebungsluft bei gleichzeitigem Einsatz probabilistischer Methoden hinsichtlich der Wettersituationen gezeigt werden, daß die in der Umgebung theoretisch im Normalbetrieb und bei einem Störfall erwarteten Dosiswerte um über 1 Größenordnung niedriger liegen als bei den standortunabhängigen Standardmodellen, die im Genehmigungsverfahren verwendet wurden /12, 13/ (Abb. 2).

Außer diesen radiologischen Untersuchungen sind Analysen zur Wärme- bzw. Temperatur-Ausbreitung im Wirtsgestein des Endlagers durch die eingelagerten Abfälle vorgenommen und aus zulässigen Temperaturerhöhungen Begrenzungen der Aktivität in den Abfallgebänden ermittelt worden. Schließlich ist eine Begrenzung des Spaltstoffinventars in Abfallgebänden bzw. eine Begrenzung der Spaltstoffkonzentration erforderlich, um die Kritikalitätssicherheit in der Betriebsphase und der Nachbetriebsphase zu gewährleisten. Auch hier konnten in den vergangenen Jahren durch bessere Modellierung Konservativitäten abgebaut werden. Beispielsweise konnte gezeigt werden, daß für Abfälle, die in eine Zement-/Betonmatrix eingebunden sind, eine Erhöhung der Spaltstoffinventare bzw. Spaltstoffkonzentrationen um etwa den Faktor 10 zulässig wäre.

4. Entwicklungen in der Langzeitsicherheitsbewertung

Die Bundesregierung hat sich in ihrem Entsorgungskonzept für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen entschieden. Die Entscheidung, alle radioaktive Abfälle in "tiefen" geologischen Formationen endzulagern, und nicht wie in anderen Ländern (USA, Frankreich, England) auch in oberflächennahen Formationen, beruhte im wesentlichen auf der Vorstellung, daß Radionuklide in geeigneten Formationen zeitlich nahezu unbeschränkt von der Biosphäre ferngehalten werden können. Eine ungeeignete Endlagerformation auszuwählen wurde somit als alleiniges Risiko betrachtet. Wobei der Begriff Risiko hier nicht im mathematischen Sinn als Produkt aus den Auswirkungen und der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses zu verstehen ist, sondern allein als die Wahrscheinlichkeit verstanden wurde, daß es überhaupt zu einer Radionuklidfreisetzung kommt.

Erste Risikobewertungen waren demnach von qualitativer Art und bezogen sich auf die Auswahl der Endlagerformation und des Standortes. Salz wurde als Endlagerformation für wärmeentwickelnde Abfälle ausgewählt, weil es insbesondere unter Wärmeeinwirkung plastische Eigenschaften aufweist und somit langsame Gebirgsbewegungen ohne Brucherscheinungen erträgt und geschaffene Hohlräume wieder rasch verschließt. 1979 wurden Kriterien /14/ für die Standortauswahl eines Endlagers im Salz veröffentlicht, die im wesentlichen bergmännische Risiken minimieren, für ausreichend Hohlraum sorgen und den Schutz von Lagerstätten (einschließlich Grundwasserreserven) sicherstellen. Sie enthielten kein auf den Menschen bezogenes Schutzziel.

Begleitend zur Standortauswahl für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle im Salz wurde 1978 vom Bundesminister für Forschung und Technologie mit dem Projekt SICHERHEITSTUDIEN ENTSORGUNG (PSE) /15/ in siebenjähriger Forschungsarbeit ein sicherheitsanalytisches Instrumentarium für die Sicherheitsbewertung eines Endlagers im Salz entwickelt. PSE hatte als Ergebnis, daß bei einem Endlager im Salz im Normalfall kein Mechanismus denkbar ist, der eine merkliche Freisetzung von eingelagerten Radionukliden verursachen könnte. Unter ungünstigen Bedingungen kann allerdings die Barrierenwirkung des Salzstocks reduziert werden. Dann sind Mechanismen vorstellbar, die einen Kontakt von Salzlösungen und eingelagerten Abfällen bewirken und Radionuklide freisetzen können. Zur Abschätzung der radiologischen Konsequenzen sol-

cher Szenarien sind im Verlauf des Projektes Modelle und Rechenprogramme entwickelt und angewendet worden.

Mit der Erkenntnis, Radionuklide können auch aus einem sorgfältig konzipierten Endlager freigesetzt werden, wurde es erforderlich, für die Phase nach Abschluß des Endlagerbetriebes quantitative Schutzziele für Mensch und Umwelt festzulegen. In den 1983 im Bundesanzeiger veröffentlichten und heute noch gültigen "Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk" /4/ wurde folgendes Schutzziel für die Nachbetriebsphase formuliert:

Nach Beendigung der Betriebsphase muß das gesamte Endlager sicher gegen die Biosphäre abgeschlossen werden. Auch nach der Stilllegung dürfen Radionuklide, die als Folge von nicht vollständig ausschließbaren Transportvorgängen aus einem verschlossenen Endlager in die Biosphäre gelangen könnten, nicht zu Individualdosen führen, die die Werte des § 45 StrlSchV überschreiten.

Hiernüt wurde ein Schutzziel formuliert, das Grenzwerte für Individualdosen (Strahlenexpositionen) festschreibt, die nur etwa ein zehntel der natürlichen Strahlenexposition betragen. Ein Zeitraum, über den das Schutzziel eingehalten werden muß, wurde nicht festgelegt.

Dieser Mangel und die Formulierung, daß nicht vollständig ausschließbare Transportvorgänge betrachtet werden müssen, hat dazu geführt, daß in der Folgezeit in den Langzeitsicherheitsanalysen vornehmlich Extremszenarien oder abdeckende hypothetische Szenarien betrachtet wurden. Für Zeiträume jenseits von einigen zehntausend Jahren wird es jedoch immer problematischer, die Entwicklung eines Endlagers einzuschätzen. Dementsprechend schwieriger wird der Ausschluß denkbarer Transportvorgänge. In der Bewertung von Langzeitsicherheitsanalysen tritt somit zwangsläufig die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Szenariums gegenüber der Konsequenz eines Ereignisses zurück. Insbesondere für die Entwicklung alternativer Endlagerkonzepte ist eine solche Vorgehensweise aber nicht geeignet. Endlagerkonzepte, die in der Regel zu einem sicheren Einschluß der Radionuklide und nur in extrem ungünstigen Fällen zu hohen Individualdosen führen, würden gegenüber Endlagerkonzepten, die gleichmäßig geringe Mengen an Radionukliden freisetzen, nachteilig bewertet. Im Extremfall führt dies zur Schlußfolgerung, daß es besser ist, den radioaktiven Abfall gleichmäßig in der Umwelt zu verteilen statt ihn in einem Endlager zu konzentrieren.

Auf der technisch-wissenschaftlichen Ebene ist schon früh erkannt worden, daß die Risikobewertung von Endlagern unter Berücksichtigung der Unsicherheiten in den Szenarienbeschreibungen, den Eintrittswahrscheinlichkeiten und den Konsequenzen zu erfolgen hat. So wurden von den Sandia National Laboratories bereits im Jahr 1978 spezielle statistische Methoden /16/ für die Sicherheitsbewertung der Endlagerung radioaktiver Abfälle entwickelt. Im Rahmen der von der EU von 1982 bis 1991 geförderten Projekte PAGIS /17/ (Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste) und PACOMA (Performance Assessment of Confinements for Medium-Level and Alpha-Contaminated Waste) wurden Instrumentarien entwickelt und angewandt, mit denen die Unsicherheiten in den Langzeitsicherheitsanalysen und Eintrittswahrscheinlichkeiten von Szenarien mit Hilfe von stochastischen Methoden berücksichtigt werden können. Basierend auf diesen Methoden wurden in den vom Bundesministerium für Forschung und Technik geförderten Projekten SAM (Systemanalyse Mischkonzept) /18/ verschiedene Einlagerungsstrategien für das Endlager Gorleben bewertet. In Abb. 3 ist die kumulierte relative Häufigkeit der berechneten maximalen Individualdosen in den verschiedenen Sicherheitsanalysen dargestellt. Für das bevorzugte Einlagerungskonzept der gemischten Bohrloch-Streckenlagerung (GBS) in einem Endlager im Salz liefert die Langzeitsicherheitsanalyse in weniger als 10 % der Rechenfälle Individualdosen, die größer als 10 % des Grenzwertes sind.

Die Formulierung des Schutzziels in den Sicherheitskriterien hat die Langzeitsicherheitsanalysen noch in eine weitere Problematik geführt. Für Szenarien, die nicht ausschließbar sind und nicht aufgrund der Standortbefunde zur normalen Entwicklung des Endlagersystems gehören, sind kaum belastbare Daten zu ermitteln. Solche Szenarien sind in Genehmigungsverfahren somit immer angreifbar und vermitteln leicht den Eindruck, daß die Langzeitsicherheit nicht nachweisbar ist. Von der schwedischen Kern-Energie Behörde SKI (Swedish Nuclear Power Inspectorate) wurde das Projekt INTRAVAL (An International Project to Study Validation of Geosphere Transport Models 1987 -1993) ins Leben gerufen, um das Vertrauen in die Langzeitsicherheitsanalysen zu stärken. Innerhalb des Projektes wurden Validierungsmöglichkeiten und -strategien für Modelle, die den Transport radioaktiver Stoffe in der Geosphäre beschreiben, untersucht und entwickelt. Daten von ausgewählten Labor- und Feldexperimenten wurden in systematischer Weise mit Modellergebnissen verglichen. Auch wurden Testfälle für die Modellierung von Strömungs- und

Transportprozessen am Standort Gorleben behandelt. Das Projekt hat bestätigt, daß Modellrechnungen zum Transport von radioaktiven Stoffen in der Geosphäre eine wesentliche Grundlage für die Risikobewertung von Endlagern darstellen können.

1988 haben die RSK (Reaktor-Sicherheitskommission) und die SSK (Strahlenschutz-kommission) eine gemeinsame Stellungnahme zum "Zeitrahmen für die Beurteilung der Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle" /19/ verfaßt. Hiernach wird ein quantitativer Langzeitsicherheitsnachweis, der an dem Schutzziel Individualdosis gemessen wird, für einen Zeitraum von etwa 10.000 Jahren gefordert. Für diesen Zeitraum kann die Entwicklung des Endlagersystems noch quantitativ eingeschätzt und die Verhaltensweisen und Eigenschaften des Menschen als vergleichbar mit den heutigen betrachtet werden. Soweit es wissenschaftlich sinnvoll ist, sollen die Sicherheitsanalysen auch über diesen Zeitraum hinaus geführt werden. Allerdings werden für diese Zeiträume keine Bewertungsmaßstäbe genannt. Diese Empfehlung hat sich weder auf der wissenschaftlichen noch auf der Verwaltungsebene durchgesetzt. Nicht zuletzt deswegen, weil sorgfältig konzipierte Endlager erst nach Zeiträumen jenseits von 10.000 Jahren Radionuklide in die Biosphäre freisetzen können. Aus Mangel an akzeptierten Bewertungsmaßstäben wurde deshalb in dem Genehmigungsverfahren für das Endlager Konrad berechnete Individualdosen für Zeiträume jenseits von 1 Millionen Jahre noch zur Bewertung der Langzeitsicherheit herangezogen (Abb. 4).

Es hat sich die wissenschaftliche Erkenntnis durchgesetzt, daß für Zeiträume weit jenseits von 10.000 Jahren berechnete Individualdosen nicht der alleinige Maßstab für die Risikobewertung eines Endlagers sein können und die mit der Zeit anwachsenden Unsicherheiten in den Berechnungen einen quantitativen Nachweis der Langzeitsicherheit nur noch eingeschränkt zulassen. Deshalb wird heute nach ergänzenden Bewertungsmaßstäben (sogenannten Sicherheitsindikatoren) gesucht.

Eine wichtige Rolle spielen hierbei natürliche Analoga. Naturbeobachtungen, die etwas über die Rückhaltewirkung von natürlichen Barrieren gegenüber Grundwasser oder Schadstoffen aussagen, werden verglichen mit den Barrieren des Endlagersystems. Im günstigsten Fall können die Naturbeobachtungen am Endlagerstandort selber gewonnen werden. Mikro-einschlüsse von Salzlösungen im Salzstock Gorleben sind seit ihrer Entstehung vor mehr als 200 Millionen Jahren in der chemischen Zusammensetzung unverändert. Diese Naturbeobachtung demonstriert z. B. die

enorme Barrierewirkung des Salzes gegenüber von außen zusetzenden Grundwässern am Standort Gorleben. Die lineare Zunahme des Salzgehaltes mit der Tiefe und die chemische Zusammensetzung der Grundwässer am Standort Konrad zeigen, daß tiefes Grundwasser nur über diffusive Transportvorgänge mit frischem oberflächennahen Grundwasser wechselwirkt. Nur über Zeiträume von mehreren Millionen Jahren können somit Schadstoffe aus dem tiefen Untergrund in das oberflächennahe Grundwasser transportiert werden. An Bevölkerungen, die oberhalb von Uranerzlagerstätten leben, sind keine Strahlenschädigungen nachweisbar. Dies demonstriert die i. a. vorhandene hohe Rückhaltungswirkung der Geosphäre gegenüber den natürlichen Radionukliden Uran, Radium und Thorium. Es sind die Radionuklide, für die aufgrund ihrer langen Halbwertszeiten in den Langzeitsicherheitsanalysen die höchsten Individualdosen berechnet werden (Abb. 4).

Für Zeiträume, in denen die Entwicklung eines Endlagerstandortes quantitativ nicht mehr eingeschätzt werden kann, erfolgt die Risikobewertung im wesentlichen anhand von qualitativen Vergleichen der Endlagersystemeigenschaften mit Naturbeobachtungen. Quantitative Modellrechnungen können dabei unterstützend eingesetzt werden. Für solche Zeiträume wird dann auch nicht mehr von einem Langzeitsicherheitsnachweis gesprochen. Sicherheitsanalysen und Risikobewertungen werden als vertrauensbildende Maßnahmen bezeichnet. Sie haben zur Feststellung beigetragen, daß von sorgfältig konzipierten Endlagern in der Nachbetriebsphase auch über sehr lange Zeiträume mit begründeter Sicherheit keine Gefährdung für den Menschen ausgeht.

Neben der auf den Menschen bezogenen radiologischen Risikobewertung gewinnen zwei weitere Punkte zunehmend an Bedeutung. Zusammen mit den radioaktiven Stoffen werden auch konventionelle toxische Substanzen eingelagert. Die Langzeitsicherheitsanalysen berücksichtigen zunehmend diese Stoffe /20/, wobei aufgrund der langen Verweilzeiten in der Geosphäre organische Stoffe weitgehend zersetzt werden und somit nur sehr wenige anorganische Stoffe in die Biosphäre gelangen können. Weiterhin wird in den internationalen Kriterien für die Entsorgung von radioaktiven Abfällen, zu deren Einhaltung sich die Bundesregierung verpflichtet hat, nicht nur der Schutz der menschlichen Gesundheit, sondern auch der Schutz der Umwelt gefordert /21/. Hierfür müssen noch angemessene Schutzziele in den deutschen Kriterien entwickelt werden. Allgemein wird hierzu der Standpunkt vertreten, daß wenn der Schutz des Menschen gegeben ist, es auch keine Gefährdung für Fauna und Flora

gibt. Die Gefährdung bezieht sich dabei nicht auf ein Individuum aus Fauna oder Flora, sondern auf die Art am Standort. Problematisch dabei ist es, die Bereiche festzulegen, die noch als Umwelt zu betrachten sind.

Eine Sonderrolle in der Sicherheitsbewertung von Endlagersystemen nehmen Szenarien ein, die auf ein unbeabsichtigtes Eindringen in das Endlagersystem durch menschliche Aktivitäten zurückzuführen sind. Solche Aktivitäten sind weder in ihrer Art noch in ihren Konsequenzen belastbar einschätzbar. Der Endlagerstandort sollte deshalb so gewählt sein, daß die Wahrscheinlichkeit einer unbeabsichtigten Schwächung des Endlagersystems durch menschliche Aktivitäten gering ist. Dies wird dadurch gewährleistet, daß geologische Formationen als Endlagerstandorte gewählt werden, die keine wesentlichen Rohstoffvorkommen enthalten und sich in einer ausreichenden Tiefe befinden. Zunehmend wird diskutiert, ob nicht für heute bekannte menschliche Aktivitäten (z. B. Erkundungsbohrungen nach Rohstoffen) Konsequenzanalysen durchgeführt werden sollen. Ziel dieser Analysen könnte es sein, das Endlagersystems im Hinblick auf diese "Referenzszenarien" zu optimieren.

5. Chemotoxizität

Endzulagernde Abfallgebände enthalten neben vergleichsweise geringen Massen an Radionukliden vor allem große Massen an nichtradioaktiven Materialien, die z. T. chemotoxische Stoffe in Spuren enthalten oder selbst aus chemotoxischen Stoffen bestehen können. Diese Stoffe können als Bestandteile

- des Abfallbehälters (z. B. Blei von Innenauskleidungen),
- des Fixierungsmittels (z. B. Chromate im Zementstein), und
- des radioaktiven Abfalls (z. B. Cadmium in Steuerstäben und Absorberblechen oder Bleisulfat in Kabelisolationen oder chlorierte Kohlenwasserstoffe in PVC-Folien)

aufzutreten.

Im Hinblick auf eine Gesamtbewertung der Gefahrenpotentiale bzw. Risiken bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen ist es daher erforderlich, die o. a. Sicherheitsanalysen/-betrachtungen, die insbesondere auf radiologischer Basis durchgeführt werden, durch entsprechende Untersuchungen unter Einbezug der stofflichen Zu-

sammensetzung der radioaktiven Abfälle zu ergänzen. Derartige Untersuchungen sind in Deutschland erstmals im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens für die Schachanlage Konrad als Endlager für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung durchgeführt worden /22, 23/.

Um Aussagen über die zu erwartenden Anteile chemotoxischer Stoffe in Abfallgebinden machen zu können, werden zunächst die entsprechenden organischen und anorganischen Stoffe identifiziert und mengenmäßig abgeschätzt. Aus Gründen der Transparenz und Eindeutigkeit wurde dabei zwischen denjenigen Anteilen unterschieden, die auf den eigentlichen radioaktiven Abfall, das verwendete Fixierungsmittel und die Abfallbehälter entfallen.

Die möglicherweise in den endzulagernden Abfallgebinden enthaltenen organischen chemotoxischen Stoffe konnten aufgrund von chemischen Ähnlichkeiten in acht Verbindungsklassen zusammengefaßt werden. Unter Berücksichtigung von modellmäßig unterstellten Annahmen (Lösung des Schadstoffinventars der Abfallgebinde in einer wäßrigen Lösung mit einem Volumen von 10^6 m^3), der Löslichkeit der Verbindungen sowie von chemischen und strahlenchemischen Reaktionen (Abbau durch Hydrolyse und/oder Radiolyse) ist das chemische Verhalten der organischen chemotoxischen Stoffe analysiert worden. Als Ergebnis bleibt festzuhalten, daß diese Verbindungen in sehr viel kürzerer Zeit abgebaut werden als ein Transport vom Endlager bis zur Biosphäre benötigen würde. Damit sind nach gegenwärtigem Kenntnisstand keine Limitierungen der Anteile organischer chemotoxischer Stoffe in radioaktiven Abfällen erkennbar, die in das Endlager Konrad verbracht werden sollen.

Für die möglicherweise in den endzulagernden Abfallgebinden enthaltenen anorganischen chemotoxischen Stoffe bietet es sich an, vergleichbare Modellbetrachtungen und -bewertungen vorzunehmen. Dabei ist es sinnvoll, die Inventare chemotoxischer Stoffe in den Abfallgebinden des Endlagers Konrad mit den zugehörigen Radionuklidinventaren und mit einer Uranerzlagerstätte (3% Natururan) gleichen Volumens oder mit den Inventaren chemotoxischer Stoffe in den Konrad-Sedimenten zu vergleichen, wobei der gesamte Einlagerungshorizont heranzuziehen ist. Als Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigte sich, daß die Chemotoxizität der Abfallgebinde im Vergleich zu ihrer Radiotoxizität über Zeiträume von etwa 10 000 Jahren vernachlässigbar und im Bereich von 10^5 a bis 10^7 a vergleichbar ist.

Ferner konnte belegt werden, daß die anorganischen chemotoxischen Stoffe in Abfallgebinden im Vergleich zu den chemotoxischen Stoffen des Einlagerungshorizontes zu keinem ins Gewicht fallenden Gefährdungspotential führen. Diese Einschätzungen werden auch durch eine weitere Modellbetrachtung bestätigt, in der bei der Ausbreitung von chemotoxischen Stoffen aus dem Einlagerungshorizont zur Biosphäre keine Barrierefunktion der geologischen Formation in Ansatz gebracht und lediglich von einer Verdünnung der Tiefenwässer auf annähernd Trinkwasserkonzentration Kredit genommen wurde.

Als Gesamtergebnis der durchgeführten Untersuchungen ist somit festzuhalten, daß keine neuen, bisher unbekanntes Gefährdungspotentiale durch die chemotoxischen Stoffe in Abfallgebinden in der Schachtanlage Konrad auftreten. Somit ist auch keine Basis gegeben, auf der zusätzliche, über die Ergebnisse der o. a. "radiologischen" Sicherheitsanalysen hinausgehende Anforderungen an endzulagernde Abfallgebinde abzuleiten wären. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, daß es sich bei der geplanten Anlage Konrad um ein Endlager in Gesteinsformationen im tiefen geologischen Untergrund handelt, bei dem - standortspezifisch - mit Transportzeiten von den zukünftigen Einlagerungshorizonten bis zur Biosphäre von deutlich über 300 000 a zu rechnen ist. Derart günstige Verhältnisse müssen nicht an anderen Standorten bzw. bei anderen Wirtsgesteinen vorliegen, so daß in jedem Fall bei einem Endlagerprojekt Untersuchungen zur Chemotoxizität der jeweils zu entsorgenden radioaktiven Abfälle einschließlich einer Bewertung durchgeführt werden sollten. In diesem Zusammenhang sei auf ausländische Planungen und Endlagerprojekte verwiesen. In den vorläufigen Annahmebedingungen für eine derartige Anlage sind beispielsweise Angaben zur stofflichen Zusammensetzung der Abfälle gefordert und sicherheitsrelevante Materialien wie Cyanide quantitativ begrenzt worden. Derartige Entwicklungen können im Rahmen der Fortführung von Arbeiten zur Chemotoxizität radioaktiver Abfälle - und damit ggf. im Rahmen zukünftiger Endlagerungsbedingungen - auch in Deutschland nicht ausgeschlossen werden.

6. Anforderungen an Abfallgebinde (Endlagerungsbedingungen)

Nach den vorangegangenen Kapiteln werden im Rahmen einer standortspezifischen Sicherheitsanalyse insbesondere Vorgänge untersucht, die zu einer Freisetzung von radioaktiven Stoffen aus den endzulagernden Abfallgebinden führen können. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wer-

den sowohl in Anforderungen an das Einlagerungsgut, d. h. an die zu entsorgenden radioaktiven Abfälle, als auch in Anforderungen an die Auslegung des Endlagers einschließlich seiner Systeme und Komponenten umgesetzt.

Um die aus den Sicherheitsanalysen abgeleiteten Anforderungen an radioaktive Abfälle/Abfallgebinde eindeutig unterscheiden und transparent darstellen zu können, wird in Endlagerungsbedingungen grundsätzlich zwischen

- allgemeinen Anforderung an das Abfallgebinde,
- Anforderungen an das Abfallprodukt,
- Anforderungen an den Abfallbehälter,
- Anforderungen an die Aktivität von Radionukliden pro Abfallgebinde

unterschieden /24, 25/. Da diese Anforderungen aus den Sicherheitsanalysen zum bestimmungsgemäßen Betrieb, zu unterstellten Störfällen, zur thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins, zur Kritikalitätssicherheit und zu den radiologischen Langzeitauswirkungen resultieren, bestehen sie unabhängig voneinander und müssen jeweils einzeln erfüllt werden.

In den allgemeinen Anforderungen an Abfallgebinde spiegeln sich verschiedene Randbedingungen aus den Planungsarbeiten wider, wobei ein Teil der betreffenden Anforderungen als Eingangsgrößen für die Sicherheitsanalysen gedient haben, aus der Handhabung und Stapelung der Abfallgebinde resultieren oder im Zusammenhang mit der Dokumentation stehen. Als Anforderungen sind hier z. B. die Grenzwerte der Ortsdosisleistung und Flächenkontamination oder die Masse eines Abfallgebundes bzw. einer Transporteinheit und die Kennzeichnung von Abfallgebunden an ihrer Außenseite zu nennen.

Als ein Ergebnis der sicherheitsanalytischen Untersuchungen zu unterstellten repräsentativen Störfällen war es möglich, die verschiedenen zur Endlagerung vorgesehenen radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, die ähnliche Abfalleigenschaften aufweisen (insbesondere ein vergleichbares Verhalten bei der Freisetzung von radioaktiven Stoffen durch mechanische und/oder thermische Einwirkungen), zu Abfallproduktgruppen zusammenzufassen. Auf diese Weise konnten für das Endlagerprojekt Konrad sechs Abfallproduktgruppen mit spezifischen Anforderungen an die Abfallprodukte definiert werden /24/. Diese Gruppen unterscheiden sich in den Anforderungen, die an die Qualität eines Abfallproduktes (z. B. Preßling oder zementiertes Konzentrat) aus sicherheit-

stechnischer Sicht gestellt werden. Dabei wird zwischen Grundanforderungen, die für alle Abfallprodukte verbindlich sind, und zusätzlichen Anforderungen unterschieden, die von der jeweiligen Konditionierung der radioaktiven Abfälle abhängen. Für das Endlager Morsleben war es auf analoge Weise möglich, die Qualitätsmerkmale QM1 bis QM6 von Abfallprodukten (hier: feste Abfälle der Abfallart A1) zu definieren /25/.

Radioaktive Abfallprodukte werden zur Beförderung, Handhabung und Einlagerung in Behälter verpackt, die entsprechend den bei einer Bauartprüfung festgelegten Bedingungen gefertigt sind. Wie bei den Abfallprodukten wird auch hier zwischen Grundanforderungen, die in jedem Fall eingehalten werden müssen, und zusätzlichen Anforderungen unterschieden, die aus sicherheitstechnischer Sicht an die Qualität des betreffenden Abfallbehälters bzw. der betreffenden Verpackung gestellt werden /24, 25/.

Von besonderer Bedeutung sind die aus den sicherheitsanalytischen Untersuchungen auf der Basis von Begrenzungskriterien abgeleiteten zulässigen Aktivitäten von Radionukliden pro Abfallgebinde (Endlagerprojekt Konrad) bzw. zulässigen Aktivitätskonzentrationen (Endlager Morsleben). Die Aktivitätsbegrenzungskriterien resultieren aus sehr unterschiedlichen Anforderungsbereichen und bestehen daher unabhängig voneinander. So spielt im bestimmungsgemäßen Betrieb die Flüchtigkeit, im Störfall das Freisetzungsverhalten, bei der thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins die Zerfallswärmeleistung der Radionuklide und bei der Kritikalitätssicherheit die Massenkonzentration spaltbarer Stoffe eine Rolle. Bei der Langzeitsicherheitsanalyse sind die Ausbreitung der radioaktiven Stoffe auf dem Wasserpfad einschließlich von Sorptions- und Desorptionsprozessen von Bedeutung.

In den Endlagerungsbedingungen Konrad finden sich insbesondere folgende Aktivitätsbegrenzungen /24/:

- Aus der Sicherheitsanalyse für den bestimmungsgemäßen Betrieb sind Aktivitätswerte für fünf Radionuklide und zwei Radionuklidgruppen abgeleitet worden.
- Bei den aus der Störfallanalyse abgeleiteten Aktivitätsgrenzwerten wird zwischen 30 radiologisch wichtigen Radionukliden (sog. Leitnuklide), 66 weiteren Radionukliden und zwei Radionuklidgruppen unterschieden.

- Aus der Analyse zur thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins resultieren ebenfalls 30 Leitnuklide, 76 weitere Radionuklide und zwei Radionuklidgruppen.
- Aus der Analyse zur Kritikalitätssicherheit sind zulässige Aktivitäten bzw. Massen für 4 Radionuklide und 10 höhere spaltbare Aktiniden ermittelt worden.

Darüber hinaus wurden für 10 Radionuklide und zwei Radionuklidgruppen die maximal einlagerbaren Aktivitäten am Ende der Betriebsphase des Endlagers Konrad angegeben.

Die abgeleiteten Aktivitätswerte und Aktivitätsgrenzwerte sind in umfangreichen Tabellen zusammengefaßt. Sie demonstrieren am nachhaltigsten die Entwicklungen und Fortschritte bei der Ableitung von Endlagerungsbedingungen in den Jahren seit dem Ende der Versuchseinlagerung im Salzbergwerk Asse. Als Ursache hierfür sind das weiterentwickelte sicherheitsanalytische Instrumentarium, insbesondere aber die deutlich gesteigerten Anforderungen und Sicherheitsnachweise zu nennen, die das seit 1976 mit der damaligen Novellierung des Atomgesetzes gebotene atomrechtliche Planfeststellungsverfahren mit sich bringt.

Die Erfahrungen, die bei der Erarbeitung der Endlagerungsbedingungen Konrad gewonnen wurden, sind auch in die Ableitung der Endlagerungsbedingungen Morsleben mit eingeflossen. Im Hinblick auf das Endlagerprojekt Gorleben sind noch keine Anforderungen abgeleitet worden; hier ist der erste Lauf einer standortspezifischen Sicherheitsanalyse noch abzuwarten. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, daß sich die Erarbeitung derartiger Anforderungen vor allem an die entsprechenden Bedingungen für das Endlagerprojekt Konrad anlehnen dürfte.

7. Alternative Entsorgungsstrategien

Die radiologischen Auswirkungen eines Endlagerbergwerkes auf das Personal und die Umgebung sind gering, wie in Kap. 3 "Die Sicherheit in der Betriebsphase" gezeigt wurde. Das gilt auch bei einer unterstellten Ausschöpfung der Grenzwerte für die Ableitung über den Luftpfad. Die berechneten oder gemessenen Dosiswerte liegen im Bereich dessen, was international als "de minimis" - Dosis (einige $10 \mu\text{Sv/a}$) bezeichnet wird. Erreicht wird dies durch technische Maßnahmen in den Endlagerbergwerken und nicht, weil die Radionuklidkonzentrationen in den Abfällen in einigen

Fällen in die Nähe von Werten rücken, die für Reststoffe nach dem de minimis Konzept abgeleitet wurden /26, 27/. Nach dem de minimis Konzept ist eine schadlose Wiederverwertung oder eine konventionelle Beseitigung möglich, wenn die radiologischen Folgen solcher Tätigkeiten nicht zu Individualdosen führen, die einige 10 $\mu\text{Sv/a}$ überschreiten. Hierbei wird unterstellt, daß eine Ansammlung von mit Radionukliden belasteten Stoffen unwahrscheinlich ist. Gerade dies ist aber in einem Endlager nicht der Fall. Die Entsorgung größerer Mengen von radioaktiven Stoffen auf einer konventionellen Abfalldeponie ist somit keine Entsorgungsalternative.

Eine oft diskutierte "oberflächennahe Endlagerung", wie sie z.B. in Frankreich durchgeführt wird, bietet sich in Deutschland auch nicht an. Die (zusätzliche) Einrichtung eines solchen Endlagers für einige wenige spezielle Abfälle ist aufgrund der Reserven der bestehenden Endlager nicht erforderlich und deshalb unter gesamtwirtschaftlichen Aspekten nicht vertretbar. Überdies wäre aufgrund von Akzeptanzproblemen mit großen politischen und genehmigungstechnischen Schwierigkeiten zu rechnen.

8. Ausblick

Derzeit werden im Rahmen eines vom BMU geförderten Forschungsprojektes Vorschläge für die Weiterentwicklung der 1983 veröffentlichten Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk erarbeitet, die die o. a. Mängel und Lücken beheben sollen. Zusätzlich sollen die internationalen Kriterien, die Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission und die Vorschläge und Kriterien der Kommission der Europäischen Gemeinschaft und OECD berücksichtigt werden. Außerdem wird die Vorgehensweise für die Ablagerung und Beseitigung von nichtradioaktiven toxischen Abfällen berücksichtigt. Es bleibt zu hoffen, daß die neuen Kriterien zu einer höheren Akzeptanz in der Öffentlichkeit und zu einer problemangepassteren Risikobewertung von Endlagern führen.

Literatur

- /1/ P. Brennecke/H. Illi/H. Röthemeyer "Final Disposal in Germany" Kerntechnik 52 (1994) Nr. 1/2, S. 23 - 27.
- /2/ H. Röthemeyer (Hrsg.) "Endlagerung radioaktiver Abfälle - Wegweiser für eine verantwortungsbewußte Entsorgung in der Industriegesellschaft" VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim (1991).
- /3/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit "Bericht der Bundesregierung zur Entsorgung der Kernkraftwerke und anderer kerntechnischer Einrichtungen" Deutscher Bundestag, 11. Wahlperiode, Drucksache 11/1632, Bonn, 13. Januar 1988.
- /4/ "Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk" Bundesanzeiger 35 (1983) Nr. 2, S. 45 - 46.
- /5/ P. Brennecke/A. Hoffmann "Anfall radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland - Abfallerhebung für das Jahr 1995" Bundesamt für Strahlenschutz, Bericht BFS-ET-25/97, Salzgitter, Januar 1997.
- /6/ F. Lange/D. Gründler/G. Schwarz "Transportstudie Konrad: Sicherheitsanalyse des Transports radioaktiver Abfälle zum Endlager Konrad" Gesellschaft für Reaktorsicherheit mbH, Bericht GRS-84, Köln, Juli 1991.
- /7/ D. Ehrlich, T. Ibach, V. Kunze, H. Schulze: "Flüchtige radioaktive Stoffe in einem Endlager" in: Strahlenschutz-Praxis, Hrsg. Fachverband für Strahlenschutz. 3. Jahrgang, Heft 3/97. ISSN 0947-434 X
- /8/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung) vom Oktober 1976, i.d. Fassung der Bekanntmachung v. 30.6.1989 (BGBl. I, S. 1321, ber. S. 1926).
- /9/ Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 1995. Bericht der Bundesregierung an den Deutschen Bundestag. Drucksache 13/5572, 23.9.1996.
- /10/ W. Heyn, W. Foit: "Die Auswirkungen brennender Gleislosfahrzeuge auf sonderbewetterten Strecken." Glückauf-Forschungshefte 47 (1986). S. 146-148
- /11/ B. Droste, G. Wieser, U. Probst: "Thermal Test Requirements and their Verification by Different Test Methods". PATRAM'92 - Proc., Vol 3, pp 1263-1272.
- /12/ H. Thielen: "Ermittlung der Langzeit-Ausbreitungs- und -Ablagerungsfaktoren unter Berücksichtigung der thermischen und mechanischen Kaminüberhöhung auf der Basis von standortmeteorologischen Daten der Jahre 1986-1993" am Standort Konrad. Interner Bericht der GRS, Köln, Dez. 1996, im Auftrag des BFS.
- /13/ F. Lange, H.P. Berg, D. Ehrlich: "Dosisgrenzwerte-Aktivitätsgrenzwerte-Minimierungsgebot" Diskussion der Vorgehensweisen bei den Sicherheitsanalysen für das Endlager Konrad. Jahrestagung Kerntechnik 13.-15. Mai 1997, Aachen; Tagungsbericht, S. 319. ISSN 0720-9207.
- /14/ Deutscher Bundestag Celle-Drucksache 8/3082, Punkt 8, S. 5-6, 26.7.1979
- /15/ Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE): Zusammenfassender Abschlußbericht, Kapitel 4, Entwicklung eines sicherheitsanalytischen Instrumentariums für das

geologische Endlager für radioaktive Abfälle in einem Salzstock, Hahn-Meitner-Institut, Berlin 1985

- /16/ R. L. Iman, J. C. Helton, J.E. Campbell: Risk Methodology for Geologic Disposal of Radioactive Waste: Sensitivity Analysis Techniques, Sand 7809122, Sandia National Laboratories, Albuquerque 1978
- /17/ R. Storck, J. Aschenbach, R. P. Hiersekorn, A. Nies, N. Stelte: Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste, EUR 11778 EN, GSF-Bericht 23/88, Commission of the European Communities, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München, Brüssel-Luxemburg 1988
- /18/ D. Buhmann, A. Nies, R. Storck: Systemanalyse Mischkonzept, Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagerkonzepten für wärmeerzeugende radioaktive Abfälle, Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, KWA-Nr. 5702 A, 1991
- /19/ Gemeinsame Stellungnahme der Reaktorsicherheitskommission und der Strahlenschutzkommission, 30.6.1988
- /20/ D. Ehrlich/H. Röthemeyer/G. Stier-Friedland/B. Thomauske "Langzeitsicherheit von Endlagern" Atomwirtschaft-Atomtechnik 31 (1986) Nr. 5, S. 231 - 236.
- /21/ IAEA: The Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series No. 111 - F, IAEA, Vienna 1995
- /22/ E. Warnecke/P. Brennecke/B. Buchheim "Chemotoxicity of Radioactive Wastes with Negligible Heat Generation" in: G. Johansson (Hrsg.) Proceedings of the Joint International Symposium on Environmental Consequences of Hazardous Waste Disposal, Stockholm, 27. - 31. Mai 1991, Vol. II, S. 377 - 391, Statens Stralskyddsinstiut, Stockholm (1991).
- /23/ P. Brennecke/B. Buchheim/H. Günthard/E. Warnecke/U. Weilenmann "Chemotoxicity of Organic Radioactive Waste with Negligible Heat Generation" in: D. Langer (Hrsg.), Proceedings of the GTDC Workshop on Toxic Waste, Wien, 04. - 06. September 1996, S. 46 - 56, Global Technology Development Center, Wien (1996).
- /24/ P. Brennecke (Hrsg.) "Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (Endlagerungsbedingungen, Stand: Dezember 1995) - Schachtanlage Konrad -" Bundesamt für Strahlenschutz, interner Bericht ET-IB-79, Salzgitter, Dezember 1995.
- /25/ K. Kugel/W. Noack/H. Giller/B.-R. Martens/P. Brennecke "Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle und Maßnahmen zur Produktkontrolle radioaktiver Abfälle, Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM), Teil I: Endlagerungsbedingungen, Stand August 1996" Bundesamt für Strahlenschutz, interner Bericht ET-IB-85, Salzgitter, August 1996.
- /26/ Strahlenschutzfragen bei Anfall und Beseitigung von radioaktiven Reststoffen. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 11 (Hrsg. BMU). Gustav Fischer Verlag, Stuttgart-New York 1988.
- /27/ G. Schaller: "Richtwerte für die spezifische Aktivität von schwach radioaktiv kontaminierten Abfällen, die konventionell entsorgt werden". Bundesamt für Strahlenschutz, ISH-Bericht BfS-ISH-169/95, Neuherberg Jan. 1995. ISSN 0937-4558.

Abbildungen und Tabellen

Tabelle 1: Vergleich der gemessenen Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Kernkraftwerken (KKW) und aus dem Endlager Morsleben (ERAM). Werte in Bq/Jahr, gerundet.

	Edelgase ohne Radon	Rn-222 Gleichgew.- äquivalent	Aerosole $T_{1/2} > 8$ d	I-131	C-14 als CO ₂	H-3
KKW 1995	$2 \cdot 10^{11}$ - $3 \cdot 10^{13}$	keine Angaben	$7 \cdot 10^3$ - $8 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^5$ - $4 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^9$ - $7 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^9$ - $2 \cdot 10^{12}$
ERAM 1994-96	-	$2,4 \cdot 10^{10}$	$< 3,5 \cdot 10^6$	-	$2,4 \cdot 10^9$	$2,4 \cdot 10^{10}$

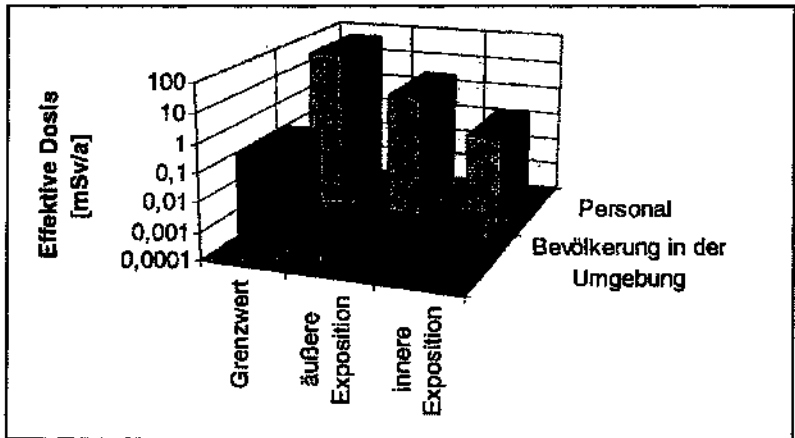


Abb. 1: Strahlenexposition des Personals und der Bevölkerung in der Umgebung durch Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Abluft des ERAM in den Jahren 1994-96. Individualdosen.

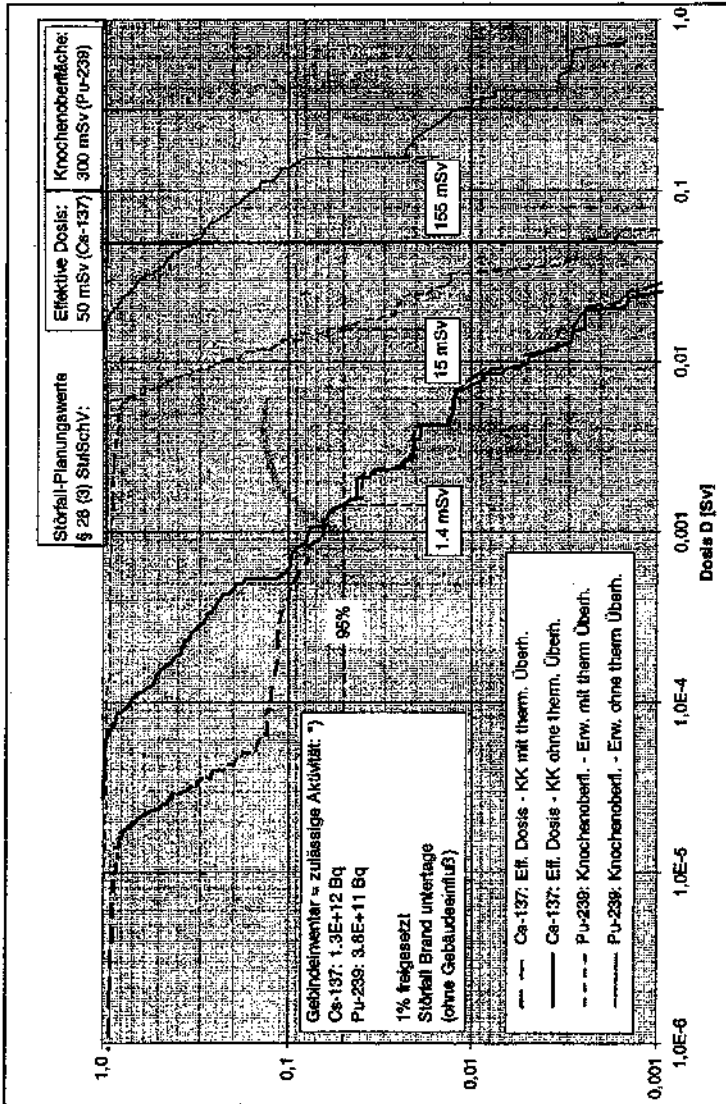
Häufigkeit von Dosen $\geq D$ 

Abb. 2: Strahlenexposition in der Umgebung des geplanten Endlagers Konrad bei Störfällen. Häufigkeitsverteilung (CCFD) der Dosis aufgrund realer Wetterdaten. *) Bei deterministischer Dosisberechnung wird der Dosisgrenzwert gerade erreicht, wenn sich die zulässige Aktivität im Gebäude befindet.

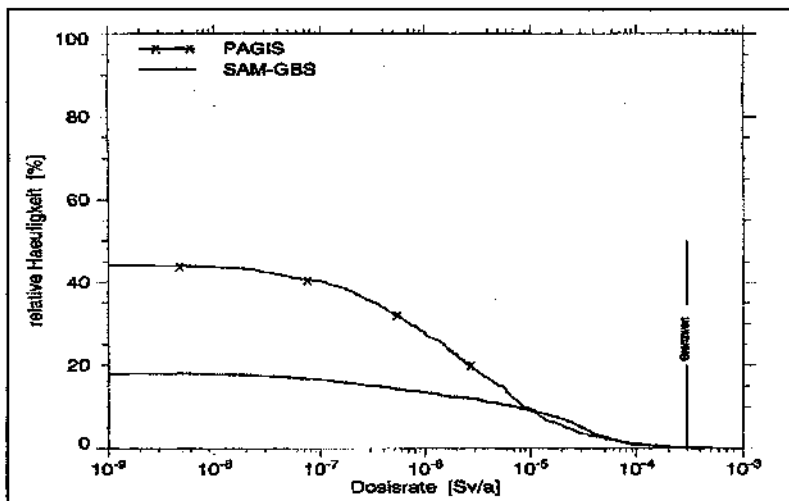


Abb. 3: relative Häufigkeit der maximalen Individualdosen

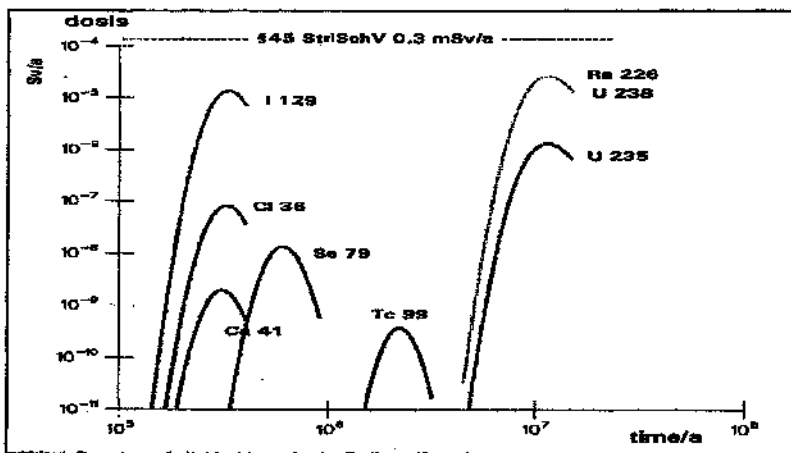


Abb. 4: Berechnete Individualdosen für das Endlager Konrad