



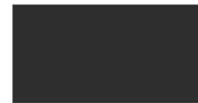
Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH

Bewertungsmaßstäbe
für die Betriebs- und
Langzeitsicherheit von
geologischen
Endlagern



Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH

**Bewertungsmaßstäbe für die
Betriebs- und Langzeit-
sicherheit von geologischen
Endlagern**



Dezember 1998

Auftrags-Nr.: 85475

Anmerkung:

Dieser Bericht ist von der GRS im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) im Rahmen des Vorhabens SR 2266 erstellt worden. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt werden bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muß nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Bundesamt für Strahlenschutz
Zentralbibliothek Salzgitter



10002332

GRS - A - 2643

Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht werden Sicherheitsberichte verschiedener Länder dahingehend ausgewertet, ob und welche radiologischen und nichtradiologischen Beurteilungsmaßstäbe für die Betriebs- und Langzeitsicherheit von geologischen Endlagern herangezogen werden. Als wesentlichstes Schutzziel werden in allen Staaten Grenzwerte für die Strahlendosis und /oder das Mortalitätsrisiko beim Menschen infolge einer Radionuklidfreisetzung aus dem Endlager festgelegt. Darüber hinaus spielen in einigen der Sicherheitsstudien neben Auswahl- und Ausschlußkriterien für die Standortfestlegung eines Endlagers auch Betrachtungen hinsichtlich der radiologischen Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen sowie die Bewertung der chemotoxischen Auswirkungen von möglicherweise freigesetzten radioaktiven und stabilen Elementen auf Mensch, Tier und Pflanze eine Rolle.

Abstract

This report contains an evaluation of the safety analysis reports of various countries under the aspect of whether any radiological and non-radiological assessment criteria for the operational and long-term safety of geological final repositories are applied and which these assessment criteria are. As an essential protection goal, limits are defined in all countries for the radiation dose and/or the mortality risk of humans resulting from a radionuclide release from the final repository. Furthermore, apart from selection and exclusion criteria for the specification of a final repository site, some of the safety studies also take into account the radiological effects on animals and plants and assess the chemo-toxic effects of possibly released radioactive and stable elements on humans, animals and plants.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Zusammenstellung der Genehmigungsanforderungen	3
3	Bewertungsmaßstäbe für die Standortfestlegung.....	6
4	Anforderungen des radiologischen / nichtradiologischen Umweltschutzes	11
5	Radiologische Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen	14
6	Nichtradiologische Auswirkungen auf den Menschen.....	16
7	Nichtradiologische Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen.....	18
8	Literatur	20
	Anhang	

1 Einleitung

Beurteilungsmaßstäbe für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle können die Höhe der Strahlenexposition, die Toxizität der radioaktiven und stabilen Elemente und das aus der Freisetzung dieser Stoffe resultierende Risiko für Menschen, Tiere und Pflanzen sein. Diese Beurteilungsmaßstäbe sind untereinander verbunden: Aus den Konzentrationen der Radionuklide und sonstiger Kontaminanten in den Umweltmedien Boden, Wasser und Luft ergeben sich die Konzentration dieser Stoffe im Menschen und in den anderen Lebensformen. Bei den Radionukliden ergeben sich daraus die Höhe der Strahlenexposition. Aus der Strahlenexposition und der Konzentration der chemisch-toxischen Stoffe ergibt sich letztlich das Mortalitätsrisiko für Mensch, Tier und Pflanze.

Die behördlichen Genehmigungskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle beziehen sich auf die Strahlendosis und/oder das Mortalitätsrisiko infolge der Strahlenbelastung durch die radioaktiven Abfälle und deren Wirkung auf den heutigen Menschen.

Aufgabe des vorliegenden Berichts ist es, Sicherheitsberichte verschiedener Länder dahingehend auszuwerten, ob und welche sonstigen radiologischen/nichtradiologischen Beurteilungsmaßstäbe für die Betriebs- und Langzeitsicherheit von Endlagern in den aktuellen nationalen Untersuchungen zur geologischen Endlagerung eine Rolle spielen. Zur Auswertung herangezogen wurden dabei insbesondere die in Tabelle 1-1 aufgeführten repräsentativen Sicherheitsstudien von Kanada, Schweiz, Schweden, Finnland und den USA.

Die Sicherheitsstudien berücksichtigen behördliche Regelungen zum Strahlen- und Mortalitätsrisiko der Bevölkerung (Kapitel 2) soweit vorhanden. Darüberhinausgehende Bewertungsmaßstäbe sind solche für eine Standortfestlegung mit geeigneten Auswahl- und Ausschlusskriterien hinsichtlich derzeitiger zivilisatorischer und naturbedingter Gegebenheiten (Kapitel 3) und allgemeine Anforderungen zum radiologischen/ nichtradiologischen Umweltschutz (Kapitel 4). Spezielle Betrachtungen erfolgen hinsichtlich der radiologischen Auswirkungen der Abfälle auf Pflanzen und Tiere (Kapitel 5) sowie

die nichtradiologischen, chemisch - toxischen Auswirkungen der Abfälle auf den Menschen (Kapitel 6) sowie auf Pflanzen und Tiere (Kapitel 7). Im Anschluß an das Literaturverzeichnis (Kapitel 8) wird in einem Anhang A (Kapitel 9) das kanadische Konzept des „Environmental Increment“, eine Methode zur Bewertung der Umwelt-Zusatzbelastung durch radio- und chemotoxische Elemente aus der geologischen Endlagerung von radioaktiven Abfällen behandelt.

Tab. 1.1 Sicherheitsstudien der verschiedenen Länder

Organisation	Sicherheitsstudie zur Endlagerung
AECL, Kanada	Sicherheitsbericht AECL 10717, COG-93-7, The disposal of Canada's nuclear fuel waste: Postclosure assessment of the reference system, AECL, (Goodwin et al.) August 1994
NAGRA, Schweiz	Kristallin-I Safety Assessment Report (Nagra 1994)
SKB, Schweden	SKB-91, Final disposal of spent nuclear fuel. Importance of the bedrock for safety (SKB 1992)
SKI, Schweden	SKI Site-94 Deep Repository Performance Assessment Project (SKI 1996)
POSIVA, Finnland	Safety Analysis of Spent Fuel Disposal, Nuclear Waste Commission of Finish Power Companies, December 1992
US DOE / WIPP	Draft 40 CFR 191 Compliance Certification Application (DCCA) for the Waste Isolation Plant (SNL 1995)
US DOE / YMP	Total-System Performance Assessment - 1995: An evaluation of the potential Yucca Mountain repository (Andrews et al. 1995)

2 Zusammenstellung der Genehmigungsanforderungen

Zum Thema der Endlagerung radioaktiver Abfälle existiert eine Vielzahl internationaler Empfehlungen, vor allem von der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP), der Internationalen Atomenergieagentur in Wien (IAEA) und der Kernenergieagentur der OECD in Paris (NEA). Diese Empfehlungen werden in der Regel mit einer gewissen Verzögerung von der Europäischen Gemeinschaft (EG) aufgenommen und in entsprechende Richtlinien für die Mitgliedsstaaten umgesetzt.

Die ICRP erarbeitet und veröffentlicht Empfehlungen zum Strahlenschutz von Berufstätigen und der allgemeinen Bevölkerung beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, die heute weltweit anerkannt sind und in den meisten Staaten bei der gesetzlichen Regelung des Strahlenschutzes berücksichtigt wurden. So bilden beispielsweise die ICRP - Empfehlungen Nr. 60 aus dem Jahre 1990 die Grundlage für die im Juni 1996 veröffentlichte EG - Richtlinie 96/29 über die Grundnormen im Strahlenschutz. Der Grenzwert der effektiven Dosis beträgt demnach für Einzelpersonen der Bevölkerung 1 mSv pro Jahr. Dieser Dosisgrenzwert bezieht sich auf den planmäßigen Umgang mit radioaktiven Stoffen bzw. den Routinebetrieb von Anlagen und schließt die Dosen aus medizinischen und natürlichen Quellen nicht mit ein.

Im Hinblick auf die Nachbetriebsphase bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle hat die ICRP in ihren Empfehlungen Nr. 46 von 1985 die Strahlenschutzprinzipien unter ungestörten Betriebsbedingungen (normal evolution scenarios) um eine Begrenzung des Risikos für Ereignisse mit geringerer Wahrscheinlichkeit (probabilistic scenarios) erweitert. Für probabilistische Ereignisse in der Nachbetriebsphase wird für Mitglieder der kritischen Bevölkerungsgruppe ein Mortalitätsrisiko von 10^{-5} pro Jahr empfohlen.

In Anlehnung an die ICRP empfiehlt die IAEA in ihren Richtlinien zur Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen (Safety Series 99, 1989), daß die zukünftige Strahlenexposition einer Referenzperson der kritischen Bevölkerungsgruppe infolge von "allmählich ablaufenden Vorgängen" unterhalb von 1 mSv pro Jahr liegen soll und infolge von Ereignissen mit geringerer Wahrscheinlichkeit ein Risikowert von 10^{-5} pro Jahr nicht überschritten werden sollte. Die IAEA - Prinzipien, 1. künftigen Generationen kein höheres Risiko als das auch heute akzeptierte zuzumuten und 2. die Endlagerung so durchzuführen, daß in der Nachbetriebsphase Grenzwerte der Strahlenexposition und

des Risikos nicht überschritten werden dürfen, gelten grundsätzlich unbefristet. Die Berechnungen von Dosen und Risiken beruhen aber auf Annahmen, z.B. über zukünftige Biosphären und menschliche Verhaltensweisen; sie sind daher langfristig mit teilweise erheblichen Unsicherheiten behaftet. Hieraus wurde (international) der Schluß gezogen, daß Dosen und Risiken langfristig als Indikatoren für die Langzeitsicherheit eines Endlagers und nicht als Beschreibung der zukünftigen Realität zu bewerten sind. In Anbetracht vorliegender Unsicherheiten empfiehlt die IAEA weitere - von weniger Annahmen abhängende - Sicherheitsindikatoren einzuführen. Dabei sind diejenigen Sicherheitsindikatoren die wichtigsten, die mit Daten von Untersuchungen an natürlichen Analoga verglichen werden können. Die Bewertungen der Langzeitsicherheit von Endlagern sollen für die Zeiträume

- bis etwa 10^4 Jahren auf quantitativen Sicherheitsbewertungen auf der Basis von Dosis - bzw. Risikoberechnungen beruhen; sie sollten durch Vergleiche mit anderen Sicherheitsindikatoren unterstützt werden.
- von etwa 10^4 bis etwa 10^6 Jahren auf quantitativen und bzw. oder qualitativen Bewertungen des Endlagersystems durch unterschiedliche Sicherheitsindikatoren basieren. Mit Annäherung an den Zeitraum von 10^6 Jahren sollte der Schwerpunkt auf qualitative Bewertungen verlagert werden.

Des weiteren stellt die IAEA fest, daß für Zeiträume größer als 10^6 Jahren integrale Sicherheitsbetrachtungen keinen verlässlichen Bewertungsmaßstab mehr für das Endlagersystem darstellen können.

Sind die behördlichen Regelungen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle auch von Land zu Land unterschiedlich, so lassen sich aber Gemeinsamkeiten erkennen. Ein Vergleich der wichtigsten quantitativen Prinzipien und Schutzziele in der **Tabelle 2-1** zeigt, daß in allen Staaten als wesentlichstes Schutzziel Grenzwerte der Strahlendosis und/oder des Mortalitätsrisikos für eine potentielle zukünftige Radionuklidfreisetzung aus dem Endlager festgelegt wurden. Die Dosisgrenzwerte liegen im Bereich zwischen 0,1 und 0,3 mSv/a und damit unterhalb der Empfehlungen der internationalen Organisationen und der EG von 1 mSv/a.

Tab. 2.1 Vergleich quantitativer Festlegungen verschiedener Länder zur Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle

Land	Dosisgrenzwert	Risikogrenzwert	Zeitraumen
Deutschland	0,3mSv/a für alle annehmbaren Szenarien		Berechnungen bis 10.000 Jahre; darüber hinaus als Indikator für das geologische Isolationspotential
Kanada		Individualrisiko maximal 10^{-6} /a alle Ereignisse	Nachweis für 10.000 Jahre; danach kein plötzlicher und dramatischer Anstieg der Freisetzung
Nordische Länder	0,1mSv/a für normale Szenarien	0,1mSv/a-Risiko für unwahrscheinliche Störfälle	Berechnung für voraussehbare Zeiten; zusätzlich Begrenzung des Aktivitätseintrags in die Biosphäre
Schweiz	0,1mSv/a zu jeder Zeit für wahrscheinliche Szenarien	$<10^{-6}$ /a für unwahrscheinliche Prozesse und Ereignisse	mindestens bis zum Konsequenzenmaximum; bei hochaktivem Abfall vollständiger Einschluß in der Anfangsphase bis etwa 1000 Jahre
USA - EPA (nicht für Yucca Mountain)	Dosisgrenzwert (für normale Ereignisse) 0,15mSv/a EPA - Trinkwasservorschrift	Containment - Konzept (für alle Ereignisse) max. Aktivitätsfreisetzung, so, daß max. 10^3 Krebstote in 10^4 Jahren pro 10^5 metr. Tonnen Abfall	10.000 Jahre für den Gesamteinschluß (containment), die Individualdosis und die Grundwasser-Aktivität aller Trinkwasserquellen
USA - NAS (Empfehlungen für Yucca Mountain)		Risikogrenzwert in der Größenordnung 10^{-5} /a bis 10^{-6} /a	innerhalb der Stabilität des geologischen Systems (10^6 Jahre) bis zum Konsequenzenmaximum ($>10^4$ Jahre)

EPA = Environmental Protection Agency (Standards 40 CFR Part 191, 1995 /EPA 95/)

NAS = National Academy of Science (Report on YM-Standards, 1995 /NAS 95/)

So nehmen auch alle Studien, mit Ausnahme des amerikanischen Sicherheitsberichts zum Programm für militärische radioaktive Abfälle (WIPP), Bezug auf Individualdosen und betrachten Zeiträume von länger als 10 000 Jahren.

Die schweizerischen und nordischen Genehmigungskriterien enthalten Risikogrenzen als zweitrangiges (untergeordnetes) Kriterium, das in den Fällen von Ereignissen mit geringer Wahrscheinlichkeit aber hohem Risiko für eine große Strahlendosis Anwendung finden sollen. Die entsprechenden Sicherheitsanalysen sind jedoch im wesentlichen deterministisch, indem sie jedem ausgewählten Ereignis die Wahrscheinlichkeit zuzuordnen. Im Gegensatz dazu haben die quantitativen Risikokriterien in den USA und Kanada zur Quantifizierung von Wahrscheinlichkeiten für eine große Klasse von Szenarien geführt. Es gibt jedoch Unterschiede, wie diese Wahrscheinlichkeitsabschätzungen in einer zusammenfassenden Risikoabschätzung miteinander verbunden werden.

3 Bewertungsmaßstäbe für die Standortfestlegung

Die Verfahren zur Standortauswahl für einen Standort in tiefen geologischen Formationen beziehen sich in den Ländern **Großbritannien, Finnland, Frankreich, Schweden** und die **Schweiz** auf die Endlagerung für langlebige radioaktive Abfälle. Diese Länder suchen oder beabsichtigen einen Endlagerstandort für abgebrannte Brennelemente und/oder verglaste hochaktive Abfälle zu suchen, in Frankreich aber auch für die mittelaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung. Standortkriterien als Bewertungsmaßstäbe für die Standortfestlegung sind in /GRS 96/ zusammengefaßt.

In **Kanada** /AEC 94/ bestehen die Anforderungen zum Umweltschutz aus einer Reihe von Dokumenten (Codes of Practice), die sogenannte „bewährte Praktiken“ zum Umweltschutz für die verschiedenen Phasen von Standortwahl, Planung, Konstruktion, Betrieb und Stilllegung einer kerntechnischen Anlage enthalten. Diese Codes werden unter der Federführung des Umweltministers in Abstimmung mit einer staatlich-industriellen Arbeitsgruppe erstellt, haben aber keine gesetzliche Wirkung. Der Umweltcode über die Phase der Standortwahl (Environment Canada 1987) enthält Kriterien, die schädliche Umweltauswirkungen minimieren sollen. Diese Kriterien sind als Dreistufenkonzept entwickelt worden, beginnend mit den allgemeinen Eignungs- oder

Ausschlußkriterien in der Phase I bis zu den sehr detaillierten Auswahlkriterien für den Standort in Phase III. Im nachfolgenden werden die Ausschlußkriterien der Phase I zusammengefaßt, die soweit wie möglich eingehalten werden sollen.

Als Umweltbereiche, in denen die Ausschlußkriterien eingehalten werden sollten, werden genannt:

- Ländliche Nutzung
 - Ackerland: Vermeide Gebiete, die erstrangige landwirtschaftliche Bedeutung für die Region haben.
 - Forstgelände: Vermeide Gebiete innerhalb oder in der Nähe von intensiver Forstwirtschaft.
 - Erholungsgebiete: Vermeide Gebiete in der Nähe von relativ großen, bereits festgelegten oder offiziell vorgeschlagenen staatlichen, provinziellen oder regionalen Parks.
- Bodennutzung
 - Ökologische Reservate: Vermeide alle staatlichen, provinziellen und regionalen Landschaften, die zum Schutz von Flora, Fauna und seltenen natürlichen, historischen und archäologischen Denkmälern eingerichtet wurden.
 - Feuchtgebiete: Vermeide alle großen Feuchtgebiete oder die Feuchtgebiete in Südkanada.
 - seltene oder gefährdete Arten und deren Wohngebiete: Vermeide alle bekannten Sammelgebiete von seltenen und gefährdeten Arten der Fauna und Flora und Sorge für eine Pufferzone, die für die Empfindlichkeit der speziellen Arten geeignet ist; vermeide deren Wohngebiete, andere sensible Verbreitungsgebiete einschließlich Wildwechselkorridore, sensible Brutstätten und Winterquartiere der Huftiere und Sorge auch hier für eine Pufferzone, die für die Empfindlichkeit der Arten geeignet ist.

- Oberflächenwasser und Grundwasser

- Oberflächenwasser: Vermeide Gebiete längs flacher Seen, in der Nähe von zerklüfteten Ufern oder Küsten, längs kleiner Seen oder kleiner geschlossener Buchten.
- Grundwasser: Vermeide Gebiete mit stark zerklüfteten Grundgebirge, mit mächtigen hochdurchlässigen Sanden und Kiesen, mit größerem Grundwasserzufluß infolge ansteigendem Bedarf durch größere Grundwasserentnehmer.

- Wasser - Ökologie

- größere Fisch- und Laichgründe: Vermeide Gebiete in der Nähe von größeren Fisch- oder Laichgründen.
- seltene und empfindliche Wasserbewohner: Vermeide alle Gebiete mit einem Wasserbereich, der für eine Ansammlung von seltenen und empfindlichen Wasserbewohnern bekannt ist; vermeide Gebiete in der Nähe von aufsteigenden Lachsströmen.

- atmosphärische Umwelt

- staatliche Reservate und internationale Grenzen: Vermeide Gebiete in der Nähe der Grenze von nationalen, provinziellen oder anderen Reservaten oder öffentlichen und internationalen Grenzen.
- Gebiete schlechter Luftqualität: Vermeide Gebiete mit Luftqualitäten, welche nahe oder über den nationalen oder provinziellen Luftqualitäts-Zielen, Kriterien und/oder Regulierungen liegen.
- urbane Bevölkerungszentren: Vermeide Lagen in der Nähe von großen Stadtzentren.
- ungünstige topographische Lagen: Vermeide Gebiete mit schlechten atmosphärischen Dispersionseigenschaften aufgrund des Einflusses der Geländeeigenschaften.

In den **USA** werden als Bewertungsmaßstäbe für die Standortfestlegung von geologischen Endlagern die Festlegungen der amerikanischen Umweltbehörde EPA in den Regelungen des 40 CFR 191 /EPA 95/ herangezogen :

- a) eine maximal zulässige Grundwassergeschwindigkeit in der Endlagerumgebung
- b) Vermeidung von Standorten mit natürlichen Bodenschätzen
- c) eine Mindest-Standzeit für technische Barrieren
- d) kontrollierter Standortzugang und nicht-intrusive Überwachung für einen gewissen Zeitraum
- e) öffentliche Dokumentation über das Endlager und dauerhafte passive Warnschilder
- f) Anforderung an die Endlagerauslegung bzgl. der Rückholbarkeit der eingelagerten Abfälle

Das Kriterium für die Grundwassergeschwindigkeit ist nach /KLE 97/ mehr für die Standortbewertung als für eine Dosisbegrenzung von Bedeutung.

In der **Slowakei** /WIT 96/ wurde der Prozeß der Standortfindung für ein LILW - Endlager in vier Schritte unterteilt. Im ersten Schritt werden ungeeignete Gebiete aufgrund bestimmter Ausschlußkriterien verworfen. Im zweiten Schritt werden die verbliebenen akzeptablen Gebiete entsprechend ihrer ländlichen Nutzung, möglicher Wasserreserven sowie seismischer und geologischer Kriterien weiter reduziert. Im dritten Schritt werden einige der dann noch verbliebenen bestgeeigneten möglichen Standorte aufgrund vergleichender Betrachtungen bezüglich Bevölkerung, wirtschaftlicher Möglichkeit, Transport, Ökologie und öffentliche Akzeptanz beurteilt. Im abschließenden vierten Schritt erfolgt eine umfassende Untersuchung der nach Schritt drei noch verbliebenen geeignetsten Standorte durch nochmalige Anwendung der Kriterien der vorangegangenen Schritte und einem zusätzlichen Faktor bezüglich der Korrosivität des Bodens.

In **China** /WIT 96/ werden als Grundsätze der Standortbewertung für die HLW - Endlagerung betrachtet, daß unter Berücksichtigung natürlicher und zivilisationsbedingter

Einwirkungen die Langzeitsicherheit (100.000 Jahre) des Endlagers gewährleistet werden kann und daß der eingelagerte radioaktive Abfall davon abgehalten werden kann, in die Biosphäre einzudringen und menschlichen Lebewesen Schaden zuzufügen. Es werden insbesondere sozialpolitische und naturgegebene Faktoren bei der Standortbewertung berücksichtigt. Detaillierte und genaue technische Anforderungen und Grenzwerte wurden für die natürlichen Faktoren bisher jedoch noch nicht ausgearbeitet.

Als soziale Gesichtspunkte werden in Betracht gezogen :

- die Verteilung der Nuklearindustrie in China;
- die Ressourcen an Fauna und Flora, die potentiellen Ressourcen an Mineralien;
- die Eigenarten der Öffentlichkeit und der lokalen Behörden;
- die Anforderungen der nationalen Gesetze zum Umweltschutz; und
- die Durchführbarkeit von Konstruktion und Betrieb des Lagers.

Als natürliche Faktoren werden in Betracht gezogen :

- natürliche geographische, einschließlich topographische, klimatische, hydrologische usw.;
- geologische, einschließlich Stabilität der Erdkruste (Erdbeben, aktive Verwerfungen usw.); und
- Erdkrusten-Spannung und -Wärmefluß, Art des Gastgesteins, hydrologische und ingenieurwissenschaftliche Geologie.

4 Anforderungen des radiologischen / nichtradiologischen Umweltschutzes

Der Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern verlangt einen angemessenen Schutz der allgemeinen Umwelt vor den möglichen Wirkungen von radioaktiven und nichtradioaktiven Schadstoffen. Entsprechende Richtlinien, um diesen Schutz der Umwelt zu gewährleisten, können beispielsweise der Unterlage /EAR 92/ wie folgt entnommen werden:

Alle Untersuchungen zu möglichen langzeitlichen Einwirkungen auf die Umwelt sollen die entsprechenden Risiken für natürliche Ökosysteme und für den Menschen umfassen. Mögliche Einwirkungen sollten in verständlicher Weise ausgedrückt werden, wie z.B.:

- mögliche Konzentrationen von Radionukliden oder anderen schädlichen Substanzen an kritischen Referenzorten im Festgestein und der Umgebung an der Oberfläche,
- die mögliche radiologische Dosis für Menschen und andere biologische Lebensformen in der Nähe des Standortes zu kritischen Zeitpunkten,
- mögliche langzeitige oder chronische Verunreinigungen und Bioakkumulation in der Nahrungskette,
- die Möglichkeit von zusätzlichen Krebserkrankungen.

Obschon Anforderungen an die Ermittlung von Umwelteinwirkungen bestehen, sind kaum geeignete Kriterien vorhanden, um die Zulässigkeit der Ergebnisse zu beurteilen. Deshalb wurde für die Nachbetriebsphase eines Endlagersystems für radioaktive Abfälle eine Methode entwickelt, die in Einklang mit den derzeitigen Denkweisen und Untersuchungen zum Umweltschutz stehen. Diese Methode besteht aus zwei allgemeinen Schritten : einer Identifikation der relevanten Kontaminanten mit anschließender Bewertung ihrer möglichen Auswirkungen. Die Identifikation erfolgt durch Vergleich der abgeschätzten Konzentrationen von radioaktiven und nichtradioaktiven Kontaminanten mit typischen Konzentrationen derselben Nuklide, wie sie üblicherweise in der geologischen Formation vorkommen. Es wird unterstellt, daß ein Kontaminant aus dem Endlagersystem umweltmäßig zulässig ist, sofern sein Beitrag die bestehende Umweltkonzentration nicht wesentlich verändert. Genauer gesagt heißt dies, daß beim

Vergleich die Konzentrationszunahme in der Umwelt benutzt wird: Bleibt diese Zunahme innerhalb der natürlichen Variationen, so wird sie als zulässig betrachtet. Für den Nachweis der Langzeitsicherheit des Referenzsystems Endlager findet dieses Kriterium Anwendung, um Kontaminanten zu identifizieren, die für den Umweltschutz möglicherweise bedenklich sind, um anschließend deren Auswirkungen zu untersuchen.

Die Untersuchung der Umwelteinwirkungen umfaßt eine Untersuchung der chemisch-toxischen und der radiotoxischen Auswirkungen (s. Anhang A). Letztere Untersuchung schließt die Ermittlung der radiologischen Dosis bei humanen und nichthumanen Lebensformen ein. Es wird allgemein akzeptiert, daß ein Schutz aller menschlichen Einzelpersonen vor radiologischen Einwirkungen auch andere Lebensformen schützt, wenn auch nicht notwendigerweise Einzelwesen dieser Lebensformen /ICR 77/. Diese Tatsache ist dadurch bedingt, daß Säuger dazu neigen, die gegen Radioaktivität am meisten empfindliche Gruppe von Organismen zu sein und der Mensch lang genug lebt, um auch latente Auswirkungen in Erscheinung treten zu lassen. In der Langzeitsicherheitsanalyse wird angenommen, daß die kritische Bevölkerungsgruppe den am stärksten kontaminierten Teil der Umwelt bewohnt und, falls die ermittelte jährliche Dosis für die kritische Gruppe klein ist, auch angenommen werden kann, daß die jährliche Dosis für andere Gattungen vermutlich ebenfalls klein sind. Nichtsdestoweniger können nichthumane Organismen schon deshalb größeren Strahlendosen ausgesetzt sein, weil sie andere Wohn- und Lebensweisen haben, oder weil auf gewisse Lebensformen eine Auswirkung erfolgt ohne das eine gleichzeitige Auswirkung auf den Menschen zu verzeichnen ist. Aus diesem Grunde werden auch Strahlendosen für repräsentative nichtmenschliche Lebensformen ermittelt. Auf dieser Grundlage können dann Vergleiche mit bestehenden amtlichen Kriterien oder mit entsprechenden Umweltdaten des Kanadischen Schildes erfolgen, um die zu erwartende Größe der Einwirkung auf die nichthumanen Lebensformen zu ermitteln.

In dem **finnischen** Sicherheitsbericht TVO-92 (Safety analysis of spent fuel disposal) /TVO 92/ wird ausgeführt, daß eine zuverlässige Vorhersage von Dosisraten für die ferne Zukunft unmöglich ist. Deshalb hat eine Gruppe nordischer Sicherheitsbehörden für die **Nordischen Länder** eine ergänzende Einschränkung vorgeschlagen mit dem Ziel, daß auch unter Langzeitgesichtspunkten die von einem Endlager ausgehenden Strahlenbelastungen und Aktivitätsfreisetzungen in die Biosphäre zu begrenzen, so

daß entsprechende natürliche Werte nicht signifikant überschritten werden. Dieses Umweltkriterium für den Langzeitnachweis legt fest:

Die Freisetzung von Radionukliden aus dem Endlager darf nicht zu irgendeiner signifikanten Änderung in der Strahlenbelastung der Umwelt führen. Dies impliziert, daß die Einträge der endgelagerten Radionuklide in die Biosphäre, gemittelt über lange Zeiträume, im Vergleich zu dem Eintrag von natürlichen Alpha - Strahlern gering sein soll.

Im erläuternden Text zu diesem Umweltkriterium wird festgelegt, daß der Aktivitätseintrag über längere Zeiträume gemittelt werden sollte, z. B. 10 000 Jahre oder noch mehr, und daß geeignete Grenzwerte (für den Eintrag von radioaktiven Substanzen in die Biosphäre) innerhalb folgender Bandbreiten anzunehmen sind:

- a) 10 - 100 kBq pro Jahr für die langlebigen Aktiniden
- b) 100 - 1000 kBq pro Jahr für die anderen langlebigen Nuklide

jeweils für eine Abfallmenge, die produziert wird, wenn eine Tonne Natururan in Kernbrennstoff umgesetzt und dann im Reaktor verbrannt wird.

Nach der Berechnung im vorgenannten **finnischen** Sicherheitsbericht (TVO 92) werden 5 bis 7 kg Natururan benötigt, um ein Kilogramm Uran für den Brennstoff in einem Leichtwasserreaktor zu produzieren. Unter der Annahme, daß insgesamt 1840 Tonnen Uran von abgebrannten Brennelementen in dem Endlager untergebracht werden, legt das Umweltkriterium somit fest, daß die mittlere Freisetzungsrate von langlebigen Aktiniden in die Biosphäre auf weniger als 10^8 - 10^9 Bq/a und die mittlere Freisetzungsrate von anderen langlebigen Nukliden auf weniger als 10^9 - 10^{10} Bq/a begrenzt sein muß.

Grundlage des **US-amerikanischen** Kriteriums für den Einschluß der radioaktiven Abfälle ("Containment Requirements") nach /EPA 95/ sind Aktivitätsgrenzwerte für die maximale Radionuklidfreisetzung aus dem Endlager in die zugängliche Umgebung. Die Grenzwerte sind auf die Menge der eingelagerten Abfälle bezogen und betragen 100 Ci ($3,7 \times 10^{12}$ Bq) für Alpha-Strahler und 1000 Ci für Beta/Gamma-Strahler pro 1000 Tonnen Uran von abgebrannten Brennelementen bzw. der entsprechenden Menge hochradioaktiver Wiederaufarbeitungsabfälle. Für einzelne Radionuklide gelten davon abweichende Werte, wie in **Tab. 4.1** zusammengestellt.

Tab. 4.1 EPA-Freisetzungsgrenzen für einzelne Radionuklide /REC 95/

Radionuklid	Freisetzungsgrenze [Ci]
Americium (Am)-241 oder -243	100
Kohlenstoff (C)-14	100
Cäsium (Cs)-135 oder -137	1000
Jod (I)-129	100
Neptunium (Np)-237	100
Plutonium (Pu)-238, -239, -240, oder -242	100
Radium (Ra)-226	100
Strontium (Sr)-90	1000
Technetium (Tc)-99	10000
Thorium (Th)-230 oder -232	100
Zinn (Sn)-126	1000
Uran (U)-233, -234, -235, -236, oder -238	100

5 Radiologische Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen

In der Strahlenschutzpraxis ist es üblich anzunehmen, daß der Schutz von Einzelpersonen implizit auch andere Lebensformen schützen wird. Es ist jedoch bekannt, daß einige Organismen aufgrund ihres anderen Lebensraumes und anderer Lebensweise den Strahlenbelastungen mehr als der heutige Mensch ausgesetzt sein können. Eine Expertengruppe der IAEA geht beispielsweise davon aus, daß Dosisraten unterhalb von 0,4 Gy/a bei pflanzlichen oder tierischen Populationen keinerlei Schaden anrichten /IAE 92/.

Bereits infolge der natürlichen Hintergrunddosis erfahren Pflanzen und Tiere aufgrund von Wurzelaufnahme, Ingestion und Inhalation höhere Dosen als Menschen. So liegt

beispielsweise in Kanada die gesamte jährliche Dosis aus natürlichen Quellen (7×10^{-4} Gy/a) beispielsweise für Fische um etwas mehr als das Vierfache (3×10^{-3} Gy/a) höher /AEC 94/.

Im **kanadischen** Sicherheitsbericht /AEC 94/ werden vier für das Kanadische Schild repräsentative Gattungen (Lebensformen) untersucht: jeweils eine Pflanze, ein Säugetier, ein Vogel und ein Fisch. Berücksichtigt werden die Auswirkungen von drei Radionukliden. Die beiden ersten sind I-129 und C-14, die Radionuklide mit der größten abgeschätzten Konzentration überall in der Biosphäre. Zusätzlich wird Tc-99 berücksichtigt, das in einigen Sensitivitätsanalysen als weiteres möglicherweise zur Dosisbelastung beitragendes Radionuklid identifiziert wurde.

Aus einer Zusammenstellung möglicher Auswirkungen von unterschiedlichen Dosisraten in der Umwelt, wirkend als ständige Exposition über lange Zeiträume, werden als Beurteilungsmaßstab folgende Grenzwerte angelegt : Bei Jahresdosen in Größe von 10 Gy/a sind auf einige Organismen deutliche Wirkungen erkennbar; dagegen sind Dosisraten von 10^{-3} Gy/a mit keinerlei erkennbaren biologischen Auswirkungen in Verbindung zu bringen. Es wird als unwahrscheinlich betrachtet, daß die gesamte Hintergrundstrahlung in der Größe von 10^{-3} bis 10^{-1} Gy/a unzulässige Auswirkungen verursachen kann.

Im Sicherheitsbericht /AEC 94/ wird deshalb angenommen, daß der Schutz der Tiere und Pflanzen gegenüber den radiologischen Auswirkungen von endgelagerten radioaktiven Abfällen sichergestellt ist, falls die abgeschätzten Dosisraten unter dem unteren Wert der Hintergrundstrahlung, das sind 10^{-3} Gy/a, bleiben.

Die für die repräsentativen Lebensformen des Kanadischen Schildes ermittelten Werte basieren auf 1000 zufälligen, stichprobenhaften Simulationen; die Mittelwerte sind arithmetische Mittel der maximalen (bis 10^5 Jahre) ermittelten Jahresdosis für jede Simulation. Die Einheit der jährlichen Dosis ist Gray pro Jahr (Gy/a). Diese Einheit unterscheidet sich von der Dosiseinheit für Menschen, dem Sievert pro Jahr, durch einen dimensionslosen Strahlenqualitätsfaktor. Dieser Faktor hat für die Radionuklide I-129, C-14 und Tc-99 einen Wert Eins.

Für die vier Organismen wurde angenommen, daß sie durchschnittliche Eigenschaften haben und sich in den durch Freisetzung am höchsten belasteten Gebieten aufhalten. Als Belastungspfade wurden solche berücksichtigt, die zur inneren und äußeren Dosis beitragen (Inhalation wurde jedoch ausgeschlossen).

In /AEC 94/ werden die Mittelwerte der jährlichen Maximaldosis für die vier repräsentativen nichtmenschlichen Lebensformen mit Bezug auf I-129, C-14 und Tc-99 angegeben. Danach erhält der Vogel, als die gegenüber radiologischer Strahlung empfindlichste Spezies, etwa 93 % seiner Dosis (5×10^5 Gy/a) durch Ingestion über den Expositionspfad Brunnenwasser; das Säugetier erhält daraus 90% seiner Dosis (1×10^5 Gy/a). Der Fisch erhält 95% seiner Dosis aus der Nahrung und Wasseroberfläche, die Pflanze einen durch die Aufnahme von Wasser durch die Blätter bedingten Wert von 98% der Dosis. Nachfolgende Tabelle 5 - 1 gibt die durchschnittlichen Werte der geschätzten maximalen Konzentrationen von I-129 und C-14 in Boden, Wasser und Luft an.

Tab. 5.1 Maximale Konzentrationen von Jod und Kohlenstoff

	Boden (Bq/kg)	Wasser (Bq/l)	Luft (Bq/m ³)
I-129	2×10^0	3×10^{-3}	4×10^{-5}
C-14	9×10^{-3}	5×10^{-4}	1×10^{-5}

6 Nichtradiologische Auswirkungen auf den Menschen

Die Entwicklung und Anwendung einer umfassenden Methode zum Nachweis der Langzeitsicherheit einer Endlagerung in tiefen geologischen Formationen schließen in allen Ländern Untersuchungen der radiologischen aber in einigen Ländern (z.B. Kanada, USA, Belgien und Deutschland) ebenso Untersuchungen der nichtradiologischen (chemisch-toxischen) Auswirkungen der in das Endlager eingebrachten Abfallgebinde mit ein, um die Langzeitrisiken abzuschätzen. Die Bewertung von chemisch-toxischen Elementen ist sowohl in dem **kanadischen** Sicherheitsbericht /AEC 94/ als auch in

dem **US-amerikanischen** für das Endlager WIPP (DCCA) enthalten; beide verlangen für das Genehmigungsverfahren entsprechende Nachweise folgender Art:

- a) In dem AECL-Bericht werden die Konzentrationen einer Reihe von chemisch-toxischen Elementen, die in die Biosphäre freigesetzt werden, mit dem natürlichen auftretendem Niveau verglichen (s. Anhang A).
- b) Der DDC-Bericht berücksichtigt Schwermetalle als auch organische Stoffe, da dies eine Genehmigungsanweisung der EPA (40 CFR 268.6) ist, die auch für nichtradiologische Gefahrenquellen Anwendung findet. Nach /REC 95/ werden durch Messungen verifizierte Modellberechnungen verlangt zum Nachweis, daß "keine Migration" von solchen Schadstoffen über den Einlagerungsbereich der Abfälle hinaus stattfindet. Der Begriff "keine Migration" wird dabei durch die Konzentrationen von gefährlichen Bestandteilen unterhalb von gesundheits- oder umweltschädlichen Werten an der Grenze des Einlagerungsbereiches definiert /EPA 92/.

Allgemein wird in den Studien darauf hingewiesen, daß die Fragen der chemischen Giftigkeit der radioaktiven Abfälle und deren Auswirkungen auf den Menschen in den endgültigen Genehmigungsanträgen behandelt werden müssen.

Die chemisch-toxischen Gesichtspunkte des geologischen Endlagerprogramms umfassen in **Belgien** /WIT 96/ eine vorläufige Bewertung der chemisch-toxischen Aspekte, die mit der geologischen Endlagerung von radioaktiven Abfällen in Tonformationen verbunden sind. Für diese Untersuchung wurde eine Anzahl vereinfachender Annahmen getroffen. Die Studie berücksichtigt nur die mögliche Toxizität von Schwermetallen und anderen Metallen, wie sie in den Abfallformen und den Verpackungsmaterialien enthalten sind. Die Elemente mit den höchsten Konzentrationen in den darüberliegenden Aquiferen waren Uran, Molybden und Nickel. Diese Konzentrationen waren jedoch geringer als die Konzentrationsgrenzen in der relevanten Europäischen Richtlinie für die Trinkwassernutzung. Die berechnete geringe Konzentration wird auf die geringe Löslichkeit von einigen Metallen zurückgeführt sowie auf die Tatsache, daß die meisten der in wäßriger Lösung zu erwartenden Elemente Kationen sind, die in Tonen stark absorbiert werden.

Die vorliegenden Untersuchungen sind nur vorläufig. Für viele wesentliche Parameter wie Löslichkeitsgrenzen und Rückhaltekoeffizienten mußten grobe Abschätzungen in den Simulationen vorgenommen werden, da keine experimentellen Daten zur Verfügung standen. Die Auswirkungen von Beryllium, die aus der Beryllium-Matrix des belgischen BR2-Forschungsreaktors stammen, wurden nicht analysiert, obwohl Beryllium für die Lungen erheblich toxisch ist; folglich verlangt diese Untersuchung die Anwendung eines detaillierten Biosphärenmodells, um die Auswirkungen einer Inhalation von Beryllium auf den Menschen zu ermitteln.

7 Nichtradiologische Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen

Die **kanadischen** AECB - Dokumente R-71 /AEC 85/ und R-104 /AEC 87/ verlangen, daß die Umweltauswirkungen auch infolge Kontamination von nichtradioaktiven Stoffen aus dem Endlager auf Tiere und Pflanzen bewertet werden muß. Hierzu wird die Konzentration der Kontaminanten in Wasser, Luft und Boden ermittelt und mit geltenden Vorschriften verglichen.

Um die Wasserqualität zu sichern, werden für jedes relevante chemische Element die strengsten Festlegungen der folgenden Regeln und Richtlinien in Betracht gezogen:

- a) Guidelines for Canadian Drinking Water Quality /HWC 89/
- b) Metal Mining Liquid Effluents Regulations /GOC 78/
- c) Ontario Water Resources Act /GOO 78/
- d) Environmental Protection Act /GOO 80/

Für Elemente, die nicht durch eine Regel oder Richtlinie abgedeckt sind, werden Konzentrationsgrenzen mit einer großen Sicherheitsmarge festgelegt. Die angenommenen Grenzen basieren auf solchen Informationen wie Konzentrationen im unkontaminierten Grundwasser, Giftigkeitswerte für Ingestion und Argumentationen aufgrund chemischer Analogien.

Zum Schutz der Luftqualität werden die strengsten Grenzen für Schadstoffkonzentrationen, enthalten in den Air Pollution Control Regulations (Regelung 308) und den Am-

bient Air Quality Criteria (Regelung 269) aus dem Environmental Protection Act /GOO 80/ in Betracht gezogen. Für Elemente, die nicht durch eine Regel oder Richtlinie abgedeckt sind, werden Konzentrationsgrenzen mit einer großen Sicherheitsmarge festgelegt. Im allgemeinen sind die zu erwartenden Konzentrationen in der Luft weit unterhalb jeglicher schädlichen Grenzen.

Zum Schutz der Bodenqualität werden die Richtlinien über die maximal zulässige Konzentration von Metallen im Boden, enthalten in den zwei Publikationen der Regierung von Ontario, in Betracht gezogen:

- a) Guidelines for the Decommissioning and Cleanup of Sites in Ontario /GOO 89/
- b) Guidelines for Sewage Sludge Utilization on Agricultural Lands /GOO 86/

Diese beiden Berichte decken aber nur wenige der relevanten Elemente ab und geben damit für den größten Teil der Elemente keine Kriterien, Standards oder Richtlinien für einen zulässigen Konzentrationswert im Boden an. Es wurde deshalb ein weiteres Kriterium entwickelt, um einen Konzentrationswert festzulegen, von dem keine erkennbaren chemisch-toxischen Schäden erwartet werden. Ein zulässiger Konzentrationswert kann auf der Konzentration des Elementes in einem „Durchschnittsboden“ beruhen, der normalerweise frei von Kontamination ist. Diese dann als zulässig betrachteten Werte sind natürlicherweise extrem klein.

8 Literatur

- /AEC 85/ Atomic Energy Control Board, Regulatory policy statement. Deep geological disposal of nuclear fuel waste: background information and regulatory requirements regarding the concept assessment phase. AECB - Regulatory Document R-71, 1985
- /AEC 87/ Atomic Energy Control Board, Regulatory policy statement. Regulatory objectives, requirements and guidelines for the disposal of radioactive wastes—long-term aspects AECB - Regulatory Document R-104, 1987
- /AEC 94/ Sicherheitsbericht AECL 10717, COG-93-7, The disposal of Canada's nuclear fuel waste: Postclosure assessment of the reference system, AECL, (Goodwin et al.) August 1994
- /EAR 92/ Environmental Assessment Review Panel. Final guidelines for the preparation of an environmental impact statement on the nuclear fuel waste management and disposal concept. Federal Environmental Assessment Review Office, Quebec 1992
- /EPA 92/ US Environmental Protection Agency (EPA), "No Migration" Variances to the hazardous waste land disposal prohibitions: A guidance manual for petitioners, Draft, July 1992. EPA/530/R-92/03
- /EPA 95/ US Environmental Protection Agency (EPA), Environmental standards for management and disposal of spent nuclear fuel, high-level and transuranic radioactive wastes, Final Rule, 40 CFR Part 191, Federal Register 1995
- /GOC 78/ Government of Canada. Metal mining liquid effluents regulations. Regulations published under the Fisheries Act, C.R.C., 1978

- /GOO 78a/ Government of Ontario. Ontario Water Resources Act. Water management - Goals, objectives, policies and implementation procedures of the Ministry of the Environment, 1978
- /GOO 80/ Government of Ontario. Environmental Protection Act. Ministry of the Environment, R.S.O.1980
- /GOO 86/ Government of Ontario. Environmental Protection Act. Guidelines for sewage sludge utilization on agricultural lands. Queen's Printer of Ontario, 1986
- /GOO 89/ Government of Ontario. Environmental Protection Act. Guidelines for the decommissioning and cleanup of sites in Ontario. Queen's Printer of Ontario, 1989
- /GRS 96/ GRS - A - 2342, Internationale und nationale Regelungen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle, Teilaspekt Sicherheit in der Nachbetriebsphase, M. Bork, März 1996
- /IAE 92/ International Atomic Energy Agency, Technical Report Series No. 332: Effects of ionizing radiation on plants and animals at levels implied by current radiation protection standards, IAEA, Vienna, 1992
- /ICR 77/ International Commission on Radiological Protection, ICRP-Publication 26: Recommendations of the ICRP, Anales of the ICRP 1 (3), 1977
- /KLE 97/ Klett Robert D. and Gruebel M., Development and Modification of Radioactive Waste Disposal Standards, Radioactive Waste Management and Environmental Restoration, Vol. 21, pp 69-134, 1997
- /REC 95/ Rechard Rob P., An Introduction to the Mechanics of Performance Assessment Using Examples of Calculations Done for the Waste Isolation Pilot Plant Between 1990 and 1992, Sandia National Laboratories, Livermore, California 94550, October 1995

- /TVO 92/ Safety Analysis of Spent Fuel Disposal, Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, December 1992
- /WIT 96/ Witherspoon, P.A., Geological Problems in Radioactive Waste Isolation, Second Worldwide Review, Earth Sciences Division, Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, California 94720, Sept. 1996

ANHANG A (das kanadische „Environmental Increment“)

(Umwelt-Zusatzbelastung durch radio- und chemotoxische Elemente)

Im kanadischen Sicherheitsbericht /AEC 94/ werden 68 Radionuklide und 9 chemisch-toxische Elemente auf eine mögliche Kontamination untersucht. Die Untersuchungen der probabilistischen Simulationen zeigen, daß die ermittelten Konzentrationen in allen Bereichen der Biosphäre extrem klein sind. Es wird zunächst unterstellt, daß keine weiteren Betrachtungen für die Kontaminanten erforderlich sind, deren abgeschätzte Konzentrationen weniger als der extrem kleine Wert von 10^{-20} mol pro Kilogramm Trockenboden und 10^{-20} mol pro Kubikmeter Wasser oder Luft betragen.

Tabelle A -1 faßt die Ergebnisse der Langzeitsicherheitsanalysen zusammen und zeigt, daß nur fünf Kontaminanten Werte von größer als 10^{-20} (mol/kg Trockenboden oder mol/m³ Wasser oder Luft) haben, wobei die in den Einheiten mol/kg Trockenboden und mol/m³ Wasser oder Luft ermittelten Werte in die zum Vergleich mit den Werten für die zulässige Umwelt-Zusatzbelastung erforderlichen Einheiten bei den chemisch-toxischen Stoffen (mg/kg bzw. mg/l) und radiotoxischen Elementen (Bq/kg bzw. Bq/l) umgewandelt wurden:

- Von den 68 Radionukliden hat I - 129 die größten ermittelten Konzentrationen. Die Mittelwerte [1 mol \leftrightarrow 8,45 x 10⁸ Bq] ihrer größten abgeschätzten Konzentrationen betragen 2 x 10⁻⁹ mol/kg [2 Bq/kg] Trockenboden, 4 x 10⁻⁹ mol/m³ [3 x 10⁻³ Bq/l] Wasser und 5 x 10⁻¹⁴ mol/m³ [4 x 10⁻⁵ Bq/m³] Luft. Die ermittelten Konzentrationen betragen weniger als ein Billionstel des Gewichtes in diesen Medien während eines Zeitraumes von bis zu 10⁵ Jahren.
- Das Radionuklid mit den zweitgrößten abgeschätzten Konzentrationen ist das C - 14 aus abgebrannten Brennelementen. Seine Konzentrationen sind mindestens um eine Größenordnung kleiner als diejenigen für I -129. Die Konzentrationen von allen anderen Radionukliden sind mehrere Größenordnungen kleiner als die für I - 129.
- Von den chemisch-toxischen Kontaminanten hat Brom die größten abgeschätzten Kontaminationen. Die Mittelwerte [1 mol \leftrightarrow 8 x 10⁴ mg] ihrer größten abgeschätzten Konzentrationen sind 3 x 10⁻⁹ mol/kg [2 x 10⁻⁴ mg/kg]Trockenboden, 2 x 10⁻⁹ mol/m³

[2×10^{-7} mg/l] Wasser und 2×10^{-16} mol/m³ Luft. Die anderen chemisch-toxischen Kontaminanten haben erheblich geringere Konzentrationen.

Die ermittelten Konzentrationen beziehen sich auf einen kleinen Bereich der Biosphäre, in dem sich die kritische Bezugsgruppe und die anderen Lebensformen befinden. Um ihr Schadenspotential zu ermitteln, bedarf es anerkannter und quantitativer Regelungen oder anderer Richtlinien für den Umweltschutz. Solche Regeln und Richtlinien liegen aber im allgemeinen nicht vor. Deshalb wurden von den Verfassern Kriterien entwickelt, die in den geforderten Untersuchungen und Tests verwendet werden können.

Tab. A-1 Konzentrationen und Umwelt-Zusatzbelastungen für einige Kontaminanten

Element	Medium	Mittelwert der maximalen Konzentration	zulässige Umwelt-Zusatzbelastung
Antimon	Boden	2×10^{-13} mg/kg	0,2 mg/kg
	Wasser	1×10^{-15} mg/l	1×10^{-3} mg/l
Brom	Boden	2×10^{-4} mg/kg	2 mg/kg
	Wasser	2×10^{-7} mg/l	1×10^{-3} mg/l
	Luft	2×10^{-16} mol/m ³	
C - 14	Boden	9×10^{-3} Bq/kg	9×10^{-3} Bq/kg
	Wasser	5×10^{-4} Bq/l	2×10^{-5} Bq/l
	Luft	1×10^{-5} Bq/m ³	
C - 14 (Z)	Boden	9×10^{-3} Bq/kg	9×10^{-3} Bq/kg
	Wasser	5×10^{-4} Bq/l	2×10^{-5} Bq/l
I - 129	Boden	2×10^0 Bq/kg	1×10^{-5} Bq/kg
	Wasser	3×10^{-3} Bq/l	4×10^{-8} Bq/l
	Luft	4×10^{-5} Bq/m ³	

Die fiktiven Kriterien beinhalten die Hintergrund - Konzentration der Radionuklide und chemotoxischen Elemente, die üblicherweise in dieser geologischen Formation (hier : der Kanadische Schild) vorkommen. Die Untersuchung beinhaltet einen Vergleich dieser Hintergrundkonzentrationen mit den ermittelten Konzentrationen von radioaktiven und chemisch-toxischen Kontaminanten. Es wird als Beurteilungsmaßstab festgelegt, daß ein Kontaminant aus dem Endlagersystem der Umwelt keinen Schaden zufügt, falls die ermittelte Konzentration innerhalb einer Variationsbreite dieser Hintergrundkonzentration der natürlichen Umgebung fällt. Diese Variationsbreite wird als „Environmental Increment“ (Umwelt-Zusatzbelastung) bezeichnet:

- Der Wert dieser Umwelt-Zusatzbelastung ist die zusätzliche Anzahl von Nukliden, die zum Hintergrundwert hinzugefügt werden kann, ohne die natürliche, lokale und räumliche Variation in der Konzentration zu überschreiten. Dieser Wert ist ausreichend restriktiv, so daß für den Fall, daß die zusätzliche Konzentration von einer Lagerstätte geringer ist als diese, die Existenz eines unterirdischen Lagers kaum erkennbare Umweltauswirkungen verursacht.

Zum Beispiel variiert die Konzentration von Brom im Boden des Kanadischen Schildes typischerweise zwischen 5 und 40 mg/kg, mit einer mittleren Hintergrundkonzentration von etwa 10 mg/kg und einer Standardabweichung von 2 mg/kg. Auf der Grundlage dieser Daten wird als Umwelt-Zusatzbelastung ein Wert von 2 mg/kg festgelegt. Die ermittelte Konzentration von Brom ist 2×10^4 mg/kg, das sind vier Größenordnungen weniger. Ähnliche Beobachtungen gelten für die Brom - Konzentrationen im Wasser. Daraus wurde im vorliegenden Planungsfall geschlossen, daß Brom bezüglich seiner Freisetzung aus dem Endlagersystem keine nachweisbaren Auswirkungen auf die Umwelt haben wird.

Die **Tabelle A-1** enthält die Werte für die zulässige Umwelt-Zusatzbelastung von den fünf interessierenden Kontaminanten. Daten zu Umwelt-Zusatzbelastungen für die Luft liegen für die meisten Kontaminanten nicht vor. Es wird aber davon ausgegangen, daß diese fehlenden Daten die Resultate nicht wesentlich beeinflussen, da die Konzentrationen in der Luft mit den Konzentrationen in Wasser und Boden verbunden sind und relativ kleiner sind als die für Wasser und Boden ermittelten Werte. Ein Vergleich der Umwelt-Zusatzbelastungen mit ermittelten Konzentrationen zeigt, daß von allen 68 Radionukliden und neun chemisch-toxischen Elementen nur zwei Kontaminanten ihre

Umwelt-Zusatzbelastungen für Boden und Wasser überschreiten (auch dann noch, wenn man Konzentrationen von weniger als 10^{-20} mol/kg Trockenboden oder mol/m³ Wasser berücksichtigt).

- Kohlenstoff-14 ist hier größer (oder gleich) seinem zulässigen Wert für die Umwelt-Zusatzbelastung bei Boden und Brunnenwasser; nicht jedoch für Oberflächenwasser, für die Maximalkonzentrationen bezüglich Binnenseen abgeschätzt werden, die einige Größenordnungen kleiner sind als die für Brunnenwasser abgeschätzten Werte. Die meisten der C-14 Radionuklide in der Umwelt sind im übrigen infolge des Zusammenwirkens der kosmischen Strahlung mit dem Stickstoff der Atmosphäre natürlichen Ursprungs.
- Jod-129 übertrifft ebenfalls seinem zulässigen Wert für Umwelt-Zusatzbelastung bei Boden und Brunnenwasser. Dieses Radionuklid existiert in extrem geringer Menge in der Umwelt und entsteht infolge von Reaktionen kosmischer Strahlung mit der Atmosphäre, infolge natürlichen Nuklidzerfalls und infolge der Kernwaffentests.

Da C-14 und I-129 ihre zulässigen Umwelt-Zusatzbelastungen überschritten haben, erfolgte eine Untersuchung ihrer möglichen Auswirkungen auf Boden und Wasser. Es wurden deren chemisch-toxischen als auch radiotoxischen Auswirkungen untersucht, mit nachfolgenden allgemeinen Ergebnissen. (Die etwas detailliertere Betrachtung von möglichen radiologischen Auswirkungen auf die nichtmenschlichen Lebensformen wurde bereits im Abschnitt 5 behandelt.)

Chemisch-toxische Auswirkungen von I-129 sind deshalb unwahrscheinlich, weil der Anstieg der Konzentrationen von I-129 aus dem Endlagersystem im Vergleich zu den bestehenden Konzentrationen von Jod in der Umwelt vernachlässigbar ist. Jod (prinzipiell als das stabile Isotop Jod-127 vorkommend) ist überall in der Biosphäre vorkommend; für Trockenböden werden mittlere Konzentrationen von 4×10^5 mol/kg angegeben, dies ist eine um fünf Größenordnungen größere Menge als die maximal abgeschätzte Kontamination von I-129 in Böden (s. Tabelle A -1).

Chemisch-toxische Auswirkungen von C-14 sind nicht anzunehmen. Kohlenstoff wird allgemein als nicht-toxisches Element betrachtet. Tatsächlich ist dieses Element ein für alle Lebensformen notwendiger Nährstoff. Auch wenn Kohlenstoff chemisch-toxisch

sein würde, so ist er reichlicher (als stabiles Isotop C-12) in der Umwelt vertreten als es jemals aufgrund einer Kontamination durch eine Endlagerstätte für radioaktive Abfälle sein könnte.

Die radiologischen Auswirkungen infolge C-14 und I-129 können ebenfalls als nicht signifikant betrachtet werden. Die Individualdosis infolge dieser beiden Radionuklide sind erheblich kleiner als die jährliche Gesamtdosis infolge natürlicher radioaktiver Belastungen für Zeiträume bis zu 10^5 Jahren. Obwohl sich diese Dosisabschätzungen auf die kritische Bevölkerungsgruppe beziehen, sind keine anderen Lebensformen bekannt, die aufgrund vergrößerten Nahrungskettentransfers oder Empfindlichkeit gegenüber C-14 oder I-129 signifikante Schäden erleiden könnten. (Im Abschnitt 5 wird dieser Aspekt noch etwas näher betrachtet.)

Zusammenfassend wird festgestellt, daß keine signifikanten Schäden der Umwelt von den kleinen Konzentrationen von C-14 und I-129 (und allen anderen Kontaminanten) zu erwarten sind, die möglicherweise aus der Endlagerstätte freigesetzt werden können.

Verteiler

Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Referat RS III 4 (B) 5 x

Bundesamt für Strahlenschutz

KT 1.1 2 x

ET- 2 7 x

davon 2 x z.Hd. 

ET-1 2 x

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

2 x

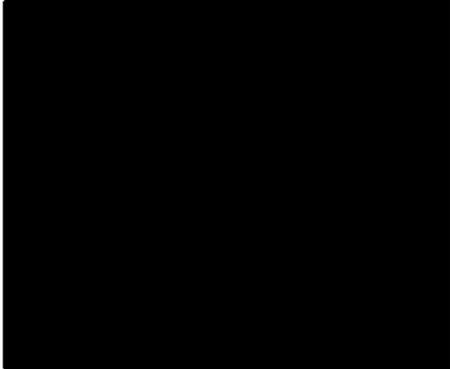
davon 1 x z.Hd. 

Forschungszentrum Karlsruhe

 1 x

Institut für nukleare Entsorgung INE 1 x

GRS

Geschäftsführer  je 1 x

Bereichsleiter je 1 x

Projektbetreuung je 1 x

Abt. 703 1 x

Autor 3 x

Abt. 401 1 x

Abt. 602 1 x

Gesamtauflage: 37 x

