

Dosis und Risiko
als Bewertungsgrößen
für die
Langzeitsicherheit
eines Endlagers

Dosis und Risiko als Bewertungsgrößen für die Langzeitsicherheit eines Endlagers

B. Baltes
K.-J. Röhlig
A. Kindt

Mai 2007

Auftrags-Nr.: 854645

Anmerkung:

Das diesem Bericht zu Grunde liegende FE-Vorhaben StSch 4452 wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

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

Kurzfassung

Der Bericht enthält Definitionen zu den Begriffen Sicherheit und Risiko aus einschlägigen Nachschlagewerken und zeigt den unterschiedlichen Gebrauch dieser Begriffe in verschiedenen Disziplinen auf. Im Anschluss daran wird die Sicherheit in der Endlagerung diskutiert und der Sicherheitsnachweis für die Phase nach Verschluss des Endlagers sowie die Rolle der Langzeitsicherheitsanalysen im Sicherheitsnachweis dargestellt. Unter dem Langzeitsicherheitsnachweis wird die Zusammenführung aller Argumente und Analysen zur Begründung der Sicherheit des Endlagersystems sowie zum Vertrauen in die Sicherheitsaussage verstanden. Insofern liefert die Langzeitsicherheitsanalyse einen Teilbeitrag zum Sicherheitsnachweis. Langzeitsicherheitsanalysen ermitteln u. a. die räumliche und zeitliche Verteilung von Radionukliden im Endlagersystem. Zur Bewertung der Analyseergebnisse sind Bewertungsgrößen und Bewertungsmaßstäbe abzuleiten. National und international werden zur Bewertung der Analyseergebnisse (calculation endpoints) meist die Dosis und/oder das Risiko herangezogen. Im vorliegenden Bericht sind für eine Reihe von Ländern die in den jeweiligen nationalen Regelwerken festgelegten Bewertungsgrößen und –maßstäbe zusammenfassend dargestellt. Desweiteren wurden die in diesen Ländern erstellten Langzeitsicherheitsnachweise ausgewertet und die Umsetzung der regulatorischen Vorgaben in den Nachweisen ermittelt. Es zeigt sich, dass zur Bewertung der Langzeitsicherheitsanalysen dosisbasierte Methoden, risikobasierte Methoden oder eine Mischung von beiden in Ansatz gebracht wurden. Die Vor- und Nachteile dieser Ansätze werden im Bericht diskutiert. Insbesondere wurde der Frage nach Aussagekraft und Wesen der Bewertungsgrößen nachgegangen. Ergebnis der Auseinandersetzung ist die Feststellung, dass mit zunehmender Nachweiszeit die Analyseergebnisse Dosis und Risiko keine Prognose zu erwartender Individualbelastungen, sondern vielmehr Indikatoren der Isolation des Endlagersystems darstellen. Schlussfolgerung aus der Bewertung ist ein Nachweiskonzept, das den Nachweis der Isolation der radioaktiven Abfälle in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich zum Ziel hat.

Abstract

The report contains definitions relating to the terms 'safety' and 'risk' from the relevant literature and shows the different uses of these concepts in different disciplines. This is followed by a discussion of the safety of final disposal and a presentation of the concept of the safety case for the phase after the closure of the repository and of the role of the long-term safety analysis in the safety case. The safety case is understood as the combination of all arguments and analyses for underpinning the safety of the repository system and for promoting confidence in the safety statement. In this respect, the long-term safety analysis provides a partial contribution to the safety case. Long-term safety analyses determine, amongst other things, the spatial and time-dependent distribution of radionuclides in the repository system. For the assessment of the analysis results, assessment factors and criteria have to be derived. Nationally and internationally, in most cases the dose and/or the risk are applied for the assessment of the analysis results (calculation endpoints). In the report in hand, a summary is given of the assessment factors and criteria laid down in the respective national regulations of a number of different countries. Furthermore, the long-term safety cases prepared in these countries were evaluated and the implementation of the regulatory requirements in the safety cases examined. It turns out that dose-based methods, risk-based methods, or a combination of both were applied for the assessment of the long-term safety analyses. The advantages and disadvantages of these approaches are discussed in this report. The question of the meaningfulness and the nature of the assessment factors was studied in particular. The conclusion is that with increasing demonstration time, the analysis results 'dose' and 'risk' do not represent a prediction of the expected individual exposure but are rather indicators of the isolation of the repository system. The conclusion derived from this assessment is a safety demonstration concept which aims at demonstrating the containment of the radioactive waste in an isolating rock zone.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Definitionen	3
2.1	Sicherheit	3
2.2	Kollektive Sicherheit	4
2.3	Risiko	8
3	Sicherheit in der Endlagerung	14
3.1	Die Rolle der Langzeitsicherheitsanalysen im Sicherheitsnachweis	15
3.2	Bewertungsgrößen und Maßstäbe zur Bewertung der Langzeitsicherheit	16
4	Festlegung der „endpoints“ für Langzeitsicherheitsanalysen in nationalen Regelwerken	19
4.1	Belgien	25
4.2	Deutschland	26
4.3	Finnland	29
4.4	Frankreich	33
4.5	Kanada	36
4.6	Schweden	42
4.7	Schweiz	45
4.8	United Kingdom (UK)	48
4.9	USA	52
5	Umsetzung der Anforderungen aus den Regelwerken im Langzeitsicherheitsnachweis	55
5.1	Belgien	55
5.2	Finnland	58
5.3	Frankreich	60
5.4	Kanada	63
5.5	Schweden	68

5.6	Schweiz	74
5.7	USA	77
6	Vergleich der Optionen der „calculation endpoints“ Konzentration, Dosis, Risiko	82
6.1	Grundsätze der Endlagerung	82
6.2	Langzeitsicherheitsanalysen	88
6.3	Bewertung der Konsequenzen	89
7	Entscheidungshilfen	94
7.1	Anmerkungen zu den Indikatoren	94
7.2	Fragen zur Implementierung einer Option	96
7.3	Abwägungskriterien	97
7.4	Schlußfolgerung für das weitere Vorgehen	103
8	Literatur	106

1 Einleitung

Für die Entsorgung radioaktiver Abfälle wird in Deutschland die Konzeption der Einlagerung in tiefe geologische Schichten verfolgt. Diese international anerkannte Konzeption gewährleistet die Isolation der Abfälle von der Biosphäre über lange Zeiträume. Die Bewertung des Isolationsvermögens eines Endlagersystems in der Nachbetriebsphase (Langzeitphase) ist Gegenstand des Langzeitsicherheitsnachweises („safety case“). Der Langzeitsicherheitsnachweis ist somit eine Voraussetzung für die Genehmigung eines Endlagers, aber auch eine wesentliche Grundlage im Entscheidungs- und Entwicklungsprozess, der schließlich zu einem genehmigungsfähigen Endlager führt. Er ist ebenso wesentlich für die Verständigung zwischen Antragsteller und Genehmigungsbehörde wie auch mit anderen Interessengruppen. Der Langzeitsicherheitsnachweis stellt ein wesentliches Element im Prozess von Maßnahmen zur Vertrauensbildung in die Standortwahl und das Endlagerkonzept dar.

Wesentliches Element des Langzeitsicherheitsnachweises sind Analysen, die das Endlagersystem und seine potenziellen Entwicklungen auf der Basis von Modellen und numerischen Methoden beschreiben („Safety Assessments“). Diese Analysen tragen zum Systemverständnis bei und demonstrieren durch die rechnerische Abschätzung von Indikatoren für potenzielle Konsequenzen möglicher Entwicklungen des Endlagersystems in der Nachbetriebsphase („Szenarien“) das Isolationspotenzial des Endlagers. Für diese Indikatoren (z. B. Dosis und Risiko, Konzentrationen oder Flüsse von Radionukliden) ist für die Genehmigung eines Endlagers u. a. die Einhaltung von durch das Regelwerk vorgegebenen Grenz- bzw. Richtwerten zu zeigen.

International werden sehr unterschiedliche regulatorische Ansätze für eine Festlegung der zu verwendenden Indikatoren sowie der anzuwendenden Bewertungsgrößen und -maßstäbe für die Demonstration der Sicherheit von Endlagern radioaktiver Abfälle in der Nachbetriebsphase auf der Basis von Sicherheitsanalysen genutzt. So werden Grenz- oder Richtwerte für die für eine Referenzperson berechnete effektive Dosis oder für das individuelle radiologische Risiko verwendet, es kommen aber auch gemischte Ansätze (z. B. Dosis für wahrscheinliche, Risiko für weniger wahrscheinliche Szenarien) sowie Vorgaben hinsichtlich weiterer Sicherheitsindikatoren (Konzentrationen oder Flüsse von Radionukliden) zum Einsatz. Auch die Festlegungen der Analy-

semethoden, mit der der Antragsteller die Einhaltung von Grenzwerten oder Schutzziele zu demonstrieren hat, unterscheiden sich in den einzelnen Regelwerken sowohl hinsichtlich der zu verwendenden Methoden (z. B. deterministische oder probabilistische Ansätze) wie auch der Flexibilität, die dem Antragsteller bei der Auswahl von Methoden gewährt wird.

Im vorliegenden Bericht werden verschiedene Optionen für die regulatorische Vorgabe von Grenz- und Richtwerten für Langzeitsicherheitsanalysen zur Genehmigung von Endlagern für radioaktive Abfälle untersucht und hinsichtlich ihrer Konsequenzen für das Nachweisverfahren sowie ihrer Zweckmäßigkeit bewertet.

2 Definitionen

Die Begriffe Sicherheit und Risiko haben in der Umgangssprache und in der Fachwelt unterschiedliche Bedeutung. Auch unterliegen sie bestimmten, dem jeweiligen Zeitgeist angepassten Wertvorstellungen. Die Definitionen stehen daher ständig auf dem Prüfstand. Die nachfolgende Zusammenstellung ist – soweit nicht anders vermerkt – aus wikipedia übernommen und dokumentiert den Stand: Januar 2006

2.1 Sicherheit

Im Folgenden werden zunächst die Definitionen zur Sicherheit dargestellt, wie sie in verschiedenen Quellen gefunden wurden:

- „**Sicherheit** bezeichnet einen Zustand, der frei von unvermeidbaren Risiken der Beeinträchtigung ist oder als gefahrenfrei angesehen wird. (Definition der DIN EN 61508 (technische Definition))“ de.wikipedia.org/wiki/Sicherheit
- „MEYERS GROSSES LEXIKON von 1980 definiert Sicherheit so: *'Zustand des Unbedrohtseins, der sich objektiv im Vorhandensein von Schutz[einrichtungen] bzw. im Fehlen von Gefahr[enquellen] darstellt und subjektiv als Gewissheit von Individuen oder sozialen Gebilden über die Zuverlässigkeit von Sicherungs- und Schutzeinrichtungen empfunden wird'*. Es bietet sich an, Sicherheit als Abwesenheit ("Komplement") von **Risiko** zu definieren, wobei wir folgende Risikodefinition übernehmen: *'Das Risiko einer Anlage oder Tätigkeit ist die Summe über alle (gefährlichen) Ereignisse der Produkte von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß und eventuell (subjektiven) Gewichtungsfaktoren'*. (Olaf H. Peters, Arno Meyna; Handbuch der Sicherheitstechnik - Carl Hanser Verlag München Wien).“
<http://www.bromba.com/knowhow/sicherh.htm>

Mit dieser Definition ist *Sicherheit* sowohl auf ein einzelnes Individuum als auch auf andere Lebewesen, auf unbelebte reale Objekte oder Systeme wie auch auf abstrakte Gegenstände (z. B. eine Kapitalanlage) bezogen. de.wikipedia.org/wiki/Sicherheit

Die im Folgenden dargestellten Kapitel 2.1.1 bis 2.1.7 sind [de.wikipedia.org/wiki/-Sicherheit](https://de.wikipedia.org/wiki/Sicherheit) entnommen:

2.1.1 Individuelle Sicherheit

Die Sicherheit einer Person kann in physische und wirtschaftliche Sicherheit unterschieden werden. Die physische Sicherheit beschreibt die unmittelbare körperliche Unversehrtheit und Bedrohungsfreiheit, die wirtschaftliche Sicherheit die dauerhafte Gewährleistung der existentiellen Basis, welche die Zukunft der Person absichern.

Sicherheit für den Menschen bezeichnet nicht nur objektive Gefahren- oder Risikofreiheit wie z. B. eine geschützte Unterbringung mit einer gewährleisteten Versorgung aller Bedürfnisse, sondern auch die subjektive Empfindung der Geborgenheit, unabhängig davon, ob sie zutrifft. Dieses Gefühl kann einzelne Personen oder ganze Bevölkerungsgruppen einnehmen.

2.1.2 Öffentliche Sicherheit

Die öffentliche Sicherheit bezeichnet im Polizeirecht die Wahrung der objektiven Rechtsordnung, der Einrichtungen des Staates sowie der Rechtsgüter und Grundrechte des Einzelnen.

2.2 Kollektive Sicherheit

Die kollektive Sicherheit bedeutet in Konfliktsituationen, dass nicht die Sicherheit der einen Seite zu Lasten der anderen erhöht wird (etwa in dem sich der eine Waffen besorgt), sondern in dem man gemeinsam Maßnahmen entwickelt, die die Sicherheit für beide Seiten verbessert, etwa, in dem sich beide Seiten verpflichten, ihre Konflikte friedlich zu lösen und einen unbeteiligten Dritten als Schiedsrichter einschalten. Der Begriff kollektive Sicherheit stammt aus der Außenpolitik und wurde für eine kooperative Form Konfliktlösung verwendet, wie sie exemplarisch im Vertrag von Locarno zum Ausdruck kam.

2.2.1 Technische Sicherheit, Betriebssicherheit

Bei technischen Konstruktionen oder Objekten bezeichnet Sicherheit den Zustand der voraussichtlich störungsfreien und gefahrenfreien Funktion. Im technischen Bereich ist „Sicherheit“ oft davon abhängig, wie sie definiert ist oder welcher Grad von Unsicherheit für die Nutzung der technischen Funktion akzeptiert wird. Tritt bei einer möglichen Störung keine Gefährdung auf, so spricht man einfach nur von Zuverlässigkeit. Dabei gehört die Sicherheit eines Produktes rechtlich zur Produktgewährleistung und zur Produkthaftung.

Ein Modell dafür wäre das Kraftfahrzeugwesen, in dem es zahlreiche sicherheitstechnische Vorschriften und auch regelmäßige sicherheitstechnische Überprüfungen gibt. Dennoch können weder Vorschriften noch Prüfungen verhindern, dass mit dem Kraftfahrzeug absichtlich, böswillig oder unabsichtlich gefährliche Zustände herbeigeführt werden oder dass Teile des Kraftfahrzeugs in gefährlicher Weise nicht mehr funktionieren.

Untersuchungen zu Problemen und Lösungen der Sicherheit in der Technik führt die Sicherheitstechnik durch. Die Maßnahmen, mit denen die Sicherheit von technischen Objekten, Anlagen oder Systemen erreicht werden soll, sind im Grunde Spezialfälle zur Gewährleistung entweder von individueller oder kollektiver Sicherheit der beteiligten Menschen, oder sie sind wirtschaftlich motiviert, um z. B. kostspielige Reparaturen oder Produktionsausfälle oder aber rechtlich begründete Sanktionen bei Schadensfällen zu vermeiden.

Die Sicherheitstechnik wird unterteilt in:

- **unmittelbare Sicherheit:** Lösungen, bei denen die Gefahrenentstehung verhindert wird. Dabei gibt es den safe-life-Ansatz, bei dem durch Klärung aller äußeren Einflüsse, sicherem Bemessen und weiterer Kontrolle ein Versagen ausgeschlossen wird. Der fail-safe-Ansatz besagt, dass es bei einem beschränkten Versagen noch eine gefahrlose Außerbetriebnahme gibt. Ein weiterer Ansatz ist die redundante Anordnung von Baugruppen.
- **mittelbare Sicherheit:** Dabei verhindern zusätzliche Sicherheitseinrichtungen eine mögliche Gefährdung. So verhindern Maschinenverkleidungen bei Dreh-

maschinen eine Gefahr auch, wenn doch einmal ein Drehmeißel abbricht, und sie verhindern einen gefährlichen Eingriff in den Prozess durch den Bediener. Andere Schutzsysteme arbeiten mit Sensoren, so wird Fahrstuhlür nicht geschlossen, wenn Personen sich im Bereich der Tür befinden.

- **hinweisende Sicherheit:** ist die schwächste Form der Sicherheitstechnik. So ist an Strommasten zu lesen, dass man sich in Lebensgefahr begibt, wenn man an ihnen hochklettert. Des Weiteren gibt es z. B. Bedienungsanleitungen, Signalfarben und Ampeln.

Primäre Grundlage für die Betriebssicherheit ist die Bauteilzuverlässigkeit, das heißt Bauteile dürfen nicht durch Überbelastung oder Materialversagen Ihre Funktionsfähigkeit verlieren.

Auf der Bauteilzuverlässigkeit aufbauend ergibt sich die Funktionszuverlässigkeit, wenn die Bauteile auch in Ihrer Kombination sicher funktionieren. So darf es zum Beispiel bei einem Sicherheitsventil nicht zu unvorhersagbarem Klemmen der Bauteile untereinander kommen und ein entsprechender Druck muss zu einem sicheren Öffnen des Ventils führen.

Die Betriebssicherheit ist Grundlage für die Arbeitssicherheit und die Umweltsicherheit einer Anlage.

2.2.2 Wirtschaftliche Sicherheit

Wirtschaftliche Sicherheit bezeichnet einen Zustand, bei dem das Vorhandensein der materiellen oder finanziellen Mittel für die Existenz oder für vorgesehene oder geplante Abläufe und Vorhaben im vorgesehenen Zeitraum gewährleistet ist. Dies kann sowohl das einzelne Individuum betreffen als auch betriebswirtschaftliche Unternehmen oder ganze Staaten.

Im Bereich Recht, Finanz- und Betriebswirtschaft werden hinterlegte Pfänder oder Kauttionen als Sicherheiten bezeichnet.

Um gegen unabweisbare Gefahren gesichert zu sein, können Versicherungen abgeschlossen werden, zum Beispiel Unfallversicherung oder Berufsunfähigkeitsver-

sicherung. Die Versicherung erhöht zwar nicht objektiv die Sicherheit, wohl aber kann sie subjektiv zum Sicherheitsgefühl beitragen und im Eintrittsfall eine Behebung oder anderweitigen Ausgleich des Schadens ermöglichen.

2.2.3 Rechtssicherheit

Rechtssicherheit ist, nach der deutschen Auffassung, die Klarheit, Bestimmtheit und die Beständigkeit staatlicher Entscheidungen sowie die Klärung von umstrittenen Rechtsfragen oder -verhältnissen in angemessener Zeit. Rechtssicherheit ist Element des Rechtsstaatsprinzips. Verfassungsrang kommt der Rechtssicherheit mit Art. 20 GG zu.

2.2.4 Umgangssprachliche Bedeutung

Neben den oben angeführten Bedeutungen wird der Begriff Sicherheit umgangssprachlich dazu verwendet, die hohe Wahrscheinlichkeit des Zutreffens einer Aussage oder eines angekündigten Ereignisses zu markieren.

2.2.5 Safety und Security

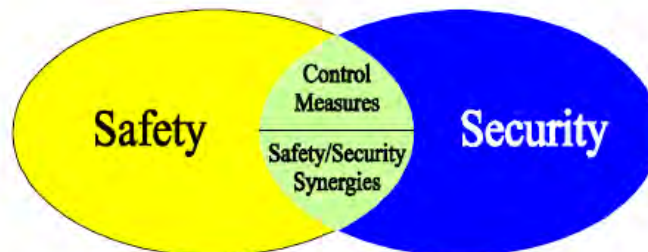
Leider wird im Deutschen nicht zwischen den beiden Themen "Security" und "Safety" unterschieden, beide Begriffe werden allgemein als Sicherheit bezeichnet. Während man "Safety" am ehesten mit dem Schutz von Leben und Gesundheit umreißen kann, beschäftigt sich "Security" mit Sachschutz. de.wikipedia.org/wiki/Sicherheit¹

Der angelsächsische Sprachgebrauch differenziert zwischen "Safety" und "Security". Eine eindeutige Definition oder präzise Unterscheidung gibt es aber auch bei der IAEA nicht. Gegebenenfalls muss die unterschiedliche Bedeutung der beiden Begriffe aus dem Kontext entnommen werden. Nach IAEA Safety Glossary /IAE 06a/ bedeutet:

¹ Anmerkung der Verfasser: Die heutige Interpretation des safety cases umfasst „Safety“ und „Security“

(Nuclear) Safety

The achievement of proper operating conditions, prevention of accidents or mitigation of accident consequences, resulting in protection of workers, the public and the environment from undue radiation hazards.



(Nuclear)Security

The prevention and detection of and response to, theft, sabotage, unauthorized access, illegal transfer or other malicious acts involving nuclear material, other radioactive substances or their associated facilities.

2.3 Risiko

2.3.1 Definitionen

- „**Risiko** ist die kalkulierte *Prognose* eines möglichen *Schadens* bzw. *Verlustes* im negativen *Fall (Gefahr)* oder eines möglichen *Nutzens* bzw. *Gewinns* im positiven *Fall (Chance)*. Was als Schaden oder Nutzen aufgefasst wird, hängt von Wertvorstellungen ab. Deshalb kann Risiko auch als Bedrohung eines Wertes für jemanden durch einen Sachverhalt (wie z. B. Naturereignisse) oder eine Handlung definiert werden. Da die Wertvorstellungen stark divergieren, sind auch die Risikosituationen sehr unterschiedlich. (Was für den einen Verlust ist, bedeutet u. U. für einen anderen einen Gewinn.) Das Antonym zu 'Risiko' ist 'Sicherheit'.“ de.wikipedia.org/wiki/Risiko
- „*Das Risiko einer Anlage oder Tätigkeit ist die Summe über alle (gefährlichen) Ereignisse der Produkte von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß und eventuell (subjektiven) Gewichtungsfaktoren.* (Olaf H. Peters, Arno Meyna;

Handbuch der Sicherheitstechnik - Carl Hanser Verlag München Wien).“ (siehe 2.1 Sicherheit)

„In der Umgangssprache erscheint "Risiko" oft gleich bedeutend mit Gefahr ('gefühlte Gefahr'). Die doppeldeutige Möglichkeit, dass ein Ereignis positiv (Chance) oder negativ (Gefahr) ausfällt, wird in der Volksrepublik China favorisiert, wie das chinesische Wortzeichen für *Risiko* plausibel macht; dieses ist eine Zusammensetzung der Zeichen für *Chance* und *Gefahr*. Dann wäre der deutsche Wortgebrauch einseitig, denn er hat pessimistischere Züge und betrachtet bei Vorhandensein eines Risikos vorzugsweise die Möglichkeit eines negativen Ereignisses. Oft gibt es mehrere Risiken gleichzeitig, und ein Problem bei der Bewertung eines Risikos ist, dass es sich nicht nur um *ein* mögliches Ereignis handelt. Oft auch besteht die Tendenz, wesentliche Risiken zu vernachlässigen und nur das nächstliegende zu betrachten. Ist das Risiko so klein, dass es als vernachlässigbar betrachtet wird, so wird es oft "Restrisiko" benannt. Fehleinschätzungen von Risiken können jedoch immer auch zu sehr negativen Folgen (Katastrophen) führen. Zitat: "*Wer wagt, gewinnt - außer er verliert*". de.wikipedia.org/wiki/Risiko

Nach dem IAEA-Glossary /IAE 06a/ kann dieser Sachverhalt mathematisch als Menge von Tripeln $\{<S_i|p_i|C_i>\}$ ausgedrückt werden.

„1. A multiattribute quantity expressing hazard, danger or chance of harmful or injurious consequences associated with actual or *potential exposures*. It relates to quantities such as the probability that specific deleterious consequences may arise and the magnitude or character of such consequences. ...

- In mathematical terms, this can be expressed generally as a set of triplets, $R = \{< S_i|p_i|X_i >\}$, where S_i is an identification or description of a *scenario* i , p_i is the probability of that scenario and X_i is a measure of the consequence of the *scenario*. The concept of *risk* is also sometimes considered to include uncertainties in the probabilities p_i of the scenarios.

2. The mathematical mean (expectation value) of an appropriate measure of a specified (usually unwelcome) consequence:

$$R = \sum_i p_i \cdot C_i$$

where p_i is the probability of occurrence of *scenario* or *event sequence* i and C_i is a measure of the consequence of that *scenario* or *event sequence*.

- Typical consequence measures C_i include ... probability of *health effects*, etc....
- If the number of *scenarios* or *event sequences* is large, the summation is replaced by an integral.
- The summing of *risks* associated with *scenarios* or *event sequences* with widely differing values of C_i is controversial. In such cases the use of the term „expectation value“, although mathematically correct, is misleading and should be avoided if possible.
- Methods for treating uncertainty in values of p_i and C_i and particularly whether such uncertainty is represented as an element of *risk* itself or as uncertainty in estimates of *risk*, vary.

3. The probability of a specified *health effect* occurring in a person or group as a result of *exposure to radiation*.

- The *health effect(s)* in question must be stated – e.g. *risk* of fatal cancer, *risk* of serious *hereditary effects*, or overall *radiation detriment* – as there is no generally accepted „default“.
- Commonly expressed as the product of the probability that *exposure* will occur and the probability that the *exposure*, assuming that it occurs, will cause the specified *health effects*. The latter probability is sometimes termed the **conditional risk**.”

2.3.2 Risiko in der Statistik

„In der Entscheidungstheorie bezeichnet Risikoaversion die Eigenschaft eines Entscheiders, dass dieser bei der Wahl zwischen mehreren Alternativen mit gleichem Erwartungswert, die Alternative mit dem geringstem Risiko bezüglich des Ergebnis bevorzugt.

Die Wahrscheinlichkeit ergibt sich aus dem Verhältnis der vermuteten Schadensfälle zu den insgesamt möglichen Fällen. So ist das Risiko² mit einem Würfel eine 4 zu werfen, 1 von 6 bzw. 1 zu 5. Falls mit der 4 ein Verlust verbunden ist, entspricht dies der Gefahr, wird hingegen mit der 4 ein Gewinn erzielt, so spricht man von Chance (Chance nur im positiven Sinn). Gefahr und Chance sind hier also Komplementärbegriffe. Ersterer kalkuliert die Wahrscheinlichkeit eines Schadens bzw. Verlustes, letzterer die Wahrscheinlichkeit eines Nutzens bzw. Gewinns.

Die kartesianische Wahrscheinlichkeit setzt die vermuteten zu den möglichen Fällen ins Verhältnis und liegt somit zwischen Null und Eins. Für obiges Beispiel beträgt sie $1 / 6 = 0,1666\dots$. Oft besteht das Risiko in einem Schaden oder einem Verlust. Das negative Ereignis des einen kann durchaus von Nutzen für den anderen sein.“

de.wikipedia.org/wiki/Risiko

2.3.3 Risiko in der Soziologie

Die Soziologie unterscheidet meist 'berechenbare' "Risiken" von nicht berechenbaren "Gefahren". de.wikipedia.org/wiki/Risiko

2.3.4 Risiko in der Wirtschaftswissenschaft

In der Betriebswirtschaftslehre werden Risiken als "Wagnisse" quantifiziert (und sind dann "kalkulatorische Kosten"), Chancen als Nutzenkalkulationen.

de.wikipedia.org/wiki/Risiko

2.3.5 Risiko in der Ingenieurwissenschaft

„Sicherheitsingenieure bezeichnen mit "Risiko" das Produkt von "Eintrittswahrscheinlichkeit" mal "Ereignisschwere" bzw. "Schadensausmaß"; hier treten schwierige Ermittlungs- und Quantifizierungsprobleme auf (vgl. Vulnerabilität) und erfordern ein qualitatives Verfahren zur Risikoabschätzung.

D.h.: Risiko = Eintrittswahrscheinlichkeit x Schadensausmaß

Die *Eintrittswahrscheinlichkeit* bezeichnet dabei die Chance, dass ein Ereignis innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls eintritt. So bedeutet z. B. 0.001/Jahr, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 1:1000 damit zu rechnen ist, dass ein Schadenereignis eintritt.

Die Einheit des *Schadensausmaßes* hängt vom jeweiligen Sachgebiet ab. Es können finanzielle Werte sein (\$), aber auch Tote oder der Totalverlust eines Flugzeuges. Selbstverständlich lässt sich letztendlich jedes Schadensausmaß in Geld bewerten, aber das ist ein anderes Thema.“ de.wikipedia.org/wiki/Risiko

2.3.6 Risikomanagement

„Man kann sich gegen wirtschaftliche Risiken (in der Betriebswirtschaftslehre: "Wagnisse") auch versichern (Versicherung). Unter Risikomanagement versteht man den planvollen Umgang mit Risiken. de.wikipedia.org/wiki/Risiko

Die Entwicklung in den letzten Jahren macht deutlich, dass an das Risikomanagement insbesondere bei Projekten wie der Endlagerung radioaktiver Abfälle immer weitreichendere Anforderungen gestellt werden. Die neue Herausforderung an das Risikomanagement ist verknüpft mit einem neuen Risikokonzept, welches das Risiko von Mensch und Umwelt in einen breiteren Kontext von sozialen, finanziellen und ökonomischen Risiken stellt /KLI 04/. Für das Risikomanagement wird dieses „systemic risk“

² Anmerkung der Verfasser: Korrekt: Wahrscheinlichkeit

Konzept in Risikoklassen gegliedert. Charakteristisch für die Klassen sind Eintrittswahrscheinlichkeiten von Ereignissen, das Schadensausmaß und die Unsicherheit sowohl der Eintrittswahrscheinlichkeit als auch des Schadensausmaßes.“

In diesem Bericht sollen nicht die Möglichkeiten des Risikomanagements in einem Systemic Risk Konzept behandelt werden. Für die Aufgabenstellung dieses Berichtes ist es zielführend, die Qualifizierung der charakteristischen Größen Eintrittswahrscheinlichkeit, Schadensausmaß und Unsicherheit zu diskutieren.

3 Sicherheit in der Endlagerung

Sicherheit³ wird in den jeweiligen nationalen Endlagerprogrammen und Regulatorien als Schutz von Mensch und Umwelt vor den Auswirkungen chemo- und radiotoxischer Stoffe interpretiert. Insbesondere liegen den Endlagerprogrammen die Safety Fundamentals der IAEA /IAE 95, 06b/ zugrunde. Es werden Sicherheitsprinzipien und Sicherheitsanforderungen in Form von Schutzziele formuliert, deren Einhaltung nachzuweisen ist.

Zum Schutz von Mensch und Umwelt müssen die Abfälle so von der Biosphäre isoliert werden, dass von ihnen keine Gefährdung für Mensch und Umwelt ausgeht. Die fundamentale Sicherheitsfunktion bei der Endlagerung in geologischen Formationen ist die Isolation. Basis der Planung und Auslegung eines Endlagers ist ein Sicherheitskonzept, das sich auf geologische Standortgegebenheiten und technische Maßnahmen abstützt.

Der Nachweis der Sicherheit eines Endlagers in der Nachbetriebsphase wird nach heutigen Standards mittels eines „safety case“ geführt. Hierunter wird verstanden:

„A safety case is a collection of arguments, at a given stage of (disposal system) development, in support of the long term safety of the repository. A safety case comprises the findings of a safety assessment and a statement of confidence in these findings. It should acknowledge the existence of any unresolved issues and provide guidance for work to resolve these issues in future development stages“ /NEA 99/

³ Anmerkung der Verfasser: Ab Kapitel 3 wird „Sicherheit“ ausschließlich im Sinne des angelsächsischen Begriffes „safety“ gebraucht.

3.1 Die Rolle der Langzeitsicherheitsanalysen im Sicherheitsnachweis

Die Rolle der Langzeitsicherheitsanalysen im Sicherheitsnachweis wird hier beispielhaft am Entwurf deutscher Sicherheitskriterien der GRS /BAL 03/ dargestellt.

In diesem Entwurf wird die Sicherheit wie folgt definiert /BAL 03/:

„Langzeitsicherheit kennzeichnet denjenigen Zustand des Endlagersystems, bei dem innerhalb des Nachweiszeitraumes nachsorgefrei keine Gefährdung von Mensch und Umwelt von den radioaktiven Abfällen ausgeht.“

In der Fortschreibung der Aktualisierung deutscher Sicherheitskriterien wird gefordert, dass der Nachweis der Sicherheit in der Nachbetriebsphase als umfassende Sicherheitsbewertung des Endlagersystems geführt werden muss und daher geologische, geotechnische, hydrogeologische, radiologische, chemotoxische und technische Aspekte und ggf. Einzelnachweise umfasst. Der Sicherheitsbewertung für die Nachbetriebsphase ist eine wissenschaftlich fundierte Prognose der zeitlichen Entwicklung des Endlagersystems in Bezug auf seine langzeitige Barrierenfunktion zugrunde zu legen. Basis der Sicherheitsbewertung sind die Erkenntnisse aus der Standortcharakterisierung, der geowissenschaftlichen Langzeitprognose sowie den Langzeitsicherheitsanalysen.

Die Ergebnisse der Langzeitsicherheitsanalysen werden zum Nachweis der Einhaltung der Schutzziele herangezogen.

„Der Nachweis der Langzeitsicherheit muss durch eine umfassende standortspezifische Sicherheitsbewertung erbracht werden /BAL 03/. Der Langzeitsicherheitsnachweis umfasst insbesondere

- *die Standortcharakterisierung und eine geowissenschaftliche Langzeitprognose,*
- *die Charakterisierung der technischen Barrieren und ihre Langzeitprognose,*
- *die Umsetzung des Sicherheitskonzeptes und die Beachtung der Planungsgrundsätze,*
- *die Gewährleistung der Kritikalitätssicherheit,*

- *die Darstellung und Analyse des langfristigen Verhaltens des Endlagersystems und seiner Teilsysteme zur Bestätigung des Sicherheitskonzeptes mit Hilfe der Methode der Langzeitsicherheitsanalyse,*
- *der Nachweis der Einhaltung der Sicherheitsprinzipien für die Endlagerung und des Schutzzieles für die Nachbetriebsphase mit Hilfe von Langzeitsicherheitsanalysen für den geforderten Nachweiszeitraum“*

außerdem

- die Bewertung der Sicherheit des Endlagersystems, des Isolationsvermögens des Endlagersystems sowie zur Bewertung von Systemeigenschaften durch Verwendung weiterer Indikatoren,
- die Langzeitsicherheitsanalysen mit den potenziellen Entwicklungen des Endlagersystems aus inneren oder äußeren Ursachen,
- die Berücksichtigung der bestehenden jeweiligen Unsicherheiten wie die Szenarien-, Daten- und Modellunsicherheiten,
- die Synthese aller Argumente und Nachweise zur Begründung der Sicherheit des Endlagersystems.

Die Langzeitsicherheitsanalysen sind somit ein wesentlicher Bestandteil des Sicherheitsnachweises. Sie liefern wesentliche Beiträge in der Sicherheitsargumentation. Hierbei sind die endpoints der Langzeitsicherheitsanalyse die Analyseergebnisse, wie z. B. die Radionuklidkonzentrationen in den Umweltmedien, die Dosis und/oder das Risiko.

Im Folgenden befasst sich dieser Bericht mit den Beiträgen der Sicherheitsanalysen zum Sicherheitsnachweis. Alle weiteren Elemente des Sicherheitsnachweises (safety case) werden hier nicht behandelt.

3.2 Bewertungsgrößen und Maßstäbe zur Bewertung der Langzeitsicherheit

Zur Gewährleistung der Sicherheit eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen werden allgemeine Anforderungen an das Endlagersystem gestellt. Diesen allgemeinen Anforderungen werden Eigenschaften, d. h. charakteristische Merkmale des End-

lagersystems, zugeordnet, zu deren Bewertung im Hinblick auf die Erfüllung der Anforderungen Bewertungsgrößen herangezogen werden. Stehen diese nicht zur Verfügung oder können nicht erhoben werden, so werden weitere Bewertungsgrößen, sog. Indikatoren, herangezogen, welche indirekt eine Bewertung der Eigenschaften erlauben. Um Indikatoren zur Bewertung der zu belegenden Eigenschaften, wie das Isolationsvermögen, heranziehen zu können, müssen diese folgende Bedingungen erfüllen /AKE 02/:

- sie müssen für die Bewertung der zu belegenden Eigenschaft erheblich sein und
- es müssen die für eine Bewertung erforderlichen Informationen verfügbar bzw. messbar und zuverlässig interpretierbar sein.

Die Aussagekraft dieses Bewertungsverfahrens hängt somit ab von der Korrelation des Indikators mit der zu belegenden Eigenschaft (z. B. Isolation), von der Möglichkeit, eindeutige Bewertungsmaßstäbe zu finden, und von Umfang und Qualität der verfügbaren Information. Mit zunehmender Korrelation und dem wachsenden Vermögen, einen Bewertungsmaßstab zu quantifizieren, wächst die Aussagekraft der Indikatoren hinsichtlich der zu belegenden Eigenschaft. Auf das Endlagersystem angewendet gilt: es wird die übergeordnete Anforderung "Gewährleistung der Langzeitsicherheit", d. h. Erfüllung der Sicherheitsprinzipien der Endlagerung und Einhaltung der Schutzziele, gestellt. Der Anforderung werden die Eigenschaften des Endlagersystems, d. h. Isolation, aber auch Retention und Retardation, zugeordnet. Diese sind im Hinblick auf die Erfüllung der Anforderung Langzeitsicherheit zu bewerten. Diese Eigenschaften des Endlagersystems wiederum können durch charakteristische Größen demonstriert und bewertet werden. Für die Optimierung und regulatorische Bewertung des Endlagersystems sind vor allem die Größen von Interesse, die eine Bewertung des Gesamtsystems erlauben. Hierzu werden derzeit insbesondere die Größen herangezogen, die die potenziellen Auswirkungen des Endlagers in der Biosphäre beschreiben.

Integrale Bewertungsgrößen für die Sicherheit des Endlagersystems sind solche, anhand derer die potenziellen Auswirkungen in der Biosphäre bewertet werden können. In einem sorgfältig ausgelegten Endlager mit dem Schwerpunkt auf geologischen Barrieren wirkt die Isolation durch Retention/Retardation derart, dass Auswirkungen in der Biosphäre erst in Zeiträumen jenseits Hunderttausender Jahre zu erwarten sind. Die

Auswirkungen sind somit einer Messung und Überprüfung nicht zugänglich. Sie können nur durch Modellrechnungen, unter Berücksichtigung der Unsicherheiten, ermittelt werden. Größen wie die Fluidbewegung, der Radionuklidtransport, die Radionuklidkonzentration charakterisieren das Barrierenverhalten des Endlagersystems. Sie können somit als Indikatoren für die Sicherheit des Endlagers und/oder Indikatoren zur Belegung von Systemeigenschaften herangezogen werden /IAE 94, 03, 05, ICRP 00/.

Die Funktion von Teilsystemen oder einzelner Barrieren wird an Hand von Funktions- und/oder Systemindikatoren bewertet. Mit ihrer Hilfe kann auch die Wirksamkeit von Teilsystemen oder Komponenten bewertet werden.

Hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit lassen sich die Bewertungsgrößen wie folgt klassifizieren /BAL 01/:

- Direkte Sicherheitsindikatoren erlauben die integrale Bewertung der Sicherheit des Endlagersystems.
- Indirekte Sicherheitsindikatoren ermöglichen die Bewertung der Eigenschaften Isolation und Retention/Retardation des Endlagersystems. Mit ihrer Hilfe ist ein Schluss auf die Sicherheit des Endlagers möglich.
- Systemindikatoren stehen zur Bewertung von Eigenschaften von Teilsystemen und Komponenten des Endlagers zur Verfügung.

4 Festlegung der „endpoints“ für Langzeitsicherheitsanalysen in nationalen Regelwerken

Die Bewertungsgrößen und Bewertungsmaßstäbe an Hand derer die Ergebnisse der Langzeitsicherheitsanalysen bewertet werden sollen, sind in den mit der Endlagerung befassten Ländern zum überwiegenden Teil in den jeweiligen nationalen Regelwerken vorgegeben. Der Grad der Konkretisierung ist jedoch unterschiedlich und reicht von Empfehlungen bis hin zu relativ konkret vorgegebenen Handlungsanweisungen und Nachweisverfahren. Für die Länder USA, Schweden, Finnland, Kanada, Schweiz, Frankreich, Belgien, UK und Deutschland wurde eine Auswertung der jeweiligen Regelwerke im Hinblick auf die Behandlung der „endpoints“ der Langzeitsicherheitsanalysen vorgenommen. Ziel der Auswertung ist es, die Konkretisierung der Bewertung der Analyseergebnisse und deren Interpretation im Hinblick auf die Sicherheit des Endlagers in den einzelnen Regelwerken aufzuzeigen.

Zur Auswertung wurde ein Template entworfen, Schwerpunkte der Auswertung sind:

- Grundlagen (Regeln)
- Calculation endpoint (Dosis, Risiko)
- Limit / target / constraint
- Vorgaben zum Vorgehen bei Ermittlung des endpoints
- Rechenvorschriften in den Standards
- Probabilistik vs. Deterministik
- Umgang mit Unsicherheiten
- Vorgaben zu Szenarien / Eintrittswahrscheinlichkeit
- Vorgaben zur Behandlung der Individual- oder Kollektivbelastung (Zeit, Ort, jährliche oder Lebenszeitbelastung)
- Umgang mit risk dilution

- Zeitrahmen

In der nachfolgenden Tabelle sind die wichtigsten Ergebnisse vergleichend zusammengefasst. Die entsprechenden Einzelergebnisse sind in den anschließenden Kapiteln 4.1 bis 4.9 dargestellt.

Tabelle 4-1: Regulatorische Anforderungen zur Bewertung der Langzeitsicherheit

Land	Wert	Grenz- /Richtwert	Szenarien	Berechnung
„Dosis“ (und ggf. ergänzende Indikatoren)				
Tschechien	Dosis 0,25 mSv/a	constraint	Szenarien unter 10^{-6} /a nicht betrachten	
NL	Dosis 0,1 mSv/a	limit		
	0,04 mSv/a für Normalentwicklung	Optimierungsziel		
USA: YMP	Dosis 0,15 mSv/a Konzentrationen	bis 10 000 a Grenzwert (in Revision!)	ungestörte Entwicklung	
Finnland	Dosis 0,1 mSv/a (anfangs) Nuklidströme (später)	limit	Szenarien mit mehr als 0,5 mSv/a: Wahrscheinlichkeit $<10^{-6}$ /a	getrennte Bewertung von Wahrscheinlichkeit und Konsequenz, erwartete und weniger wahrscheinliche Entwicklung
„Dosis und Risiko“				
Slowakei (Oberflächenlager)	Dosis 0,1 mSv/a	limit	Normalentwicklung	
	Dosis 1 mSv/a	limit	intruder scenario	
Schweiz	Dosis 0,1 mSv/a Risiko 10^{-6} /a Unwahrscheinliche Szenarien: Opferperspektive	zu keiner Zeit Überschreitung		Angabe Schwankungsbreite relevante Daten, Abschätzungen Risiko: Produkt aus Schaden und Häufigkeit, auch Summe solcher Produkte

Land	Wert	Grenz- /Richtwert	Szenarien	Berechnung
Frankreich	Dosis 0,25 mSv/a (hohe Wahrscheinlichkeit) Risikokonzept=Produkt für hypothetische Situationen möglich	bis 10 000 a Grenz-, dann Referenzwert	Referenzsituation und hypothetische Ereignisse (Vorgaben)	
Belgien	Dosis 0,1-0,3 mSv/a (hohe Wahrscheinlichkeit)	constraint		
	Risiko 10^{-6} /a (niedrige Wahrscheinlichkeit)	constraint		
Ungarn	Dosis 0,1 mSv/a	limit	disruptive events unter 10^{-7} /a nicht betrachten	probabilistisch für individual disruptive events
	Risiko 10^{-5} /a für individual disruptive events	limit		
Spanien	Dosis 0,1 mSv/a	limit	high probability	
	Risiko 10^{-6} /a	limit	lower probability	
Kanada neu	keine Vorgabe, jährliche Dosis, Risiko (disaggregiert darstellen!), weitere (alle als targets)	constraint	normal evolution; extreme conditions containment failure scenarios, including intrusion scenarios	keine Vorgabe, deterministisch und probabilistisch genannt, bei deterministischen Extremwerten 5. / 95. Perzentile der Eingangsdaten verwenden

Land	Wert	Grenz- /Richtwert	Szenarien	Berechnung
„Risiko“				
Kanada alt	Risiko $10^{-6}/a$	limit	Wahrscheinlichkeit. durch Häufigkeit oder expert judgement	Summierung Szenarienwahrscheinlichkeit*Dosis*Konversion Wahlmöglichkeit: deterministisch oder probabilistisch-arithmetisches Mittel Diskussion: 5% dürfen mehr als 1 mSv/a, aber das ist durch Risikokriterium schon abgedeckt 10 000 a
Schweden	Risiko $10^{-6}/a$	1000-Jahresfrist limit für numerische Rechnungen, dann assessment ...	abdeckende Auswahl (nicht notwendigerweise berechnet – „or otherwise assessed“ Szenarien mit hoher Dosis getrennt wahrscheinlich/weniger wahrscheinlich/residual	integral, deterministische und probabilistische Methode ergänzend: Klimavarianten bekommen Wahrscheinlichkeit 1 Unterschiede je nach kritischer Gruppe? mehr als 1 mSv/a getrennt ausweisen Risk dilution: Zwei Rechenwege: annual risk as average of all realisations / risk for a group that is assumed to live after the event and affected by its maximum consequence

Land	Wert	Grenz- /Richtwert	Szenarien	Berechnung
UK	Risiko 10^{-6} /a nach institutioneller Kontrolle	target	dose $\geq 0,5$ Sv/a → deterministische Effekte berücksichtigen, dis-aggregierte Darstellung hohe Dosis/niedrige Wahrscheinlichkeit: qualitative Argumente möglich	risk assessment may be based on probability, dose-risk conversion

4.1 Belgien

4.1.1 Regelwerk

Einschlägige regulatorische Anforderungen an die Langzeitsicherheit eines Endlagers fehlen derzeit in Belgien. ONDRAF/NIRAS ist aufgefordert worden, im Rahmen eines Sicherheitsberichts für ein generisches Endlager im Ton die Langzeitsicherheit zu demonstrieren /OND 01/. In diesem Bericht wird beim Nachweis der Langzeitsicherheit auf die nationalen und internationalen Vorgaben Bezug genommen.

4.1.2 Festlegungen des Regelwerkes

Es gibt derzeit keine regulatorischen Vorgaben zur Behandlung der Nachbetriebsphase eines Endlagers in Belgien (s. 4.2.1). Im Peer Review zum o. g. Sicherheitsbericht wird darauf hingewiesen, dass es an der Zeit ist, der Intention des SAPHIR 2 zu folgen und im Dialog zwischen Behörden und Politikern einen regulatorischen Rahmen für die geologische Endlagerung zu entwickeln.

4.2 Deutschland

4.2.1 Regelwerk

Es liegen „Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk“ aus dem Jahre 1983 vor, die derzeit in Überarbeitung sind. GRS hat 2003 einen Vorschlag zur Aktualisierung dieser Kriterien vorgenommen, in den die Empfehlungen und Kommentare von RSK und SSK eingearbeitet wurden: /BAL 03/

4.2.2 Festlegungen des Regelwerkes

Calculation endpoint

- Wahrscheinliche Szenarien: effektive Dosis 0,1 mSv im Kalenderjahr für eine Einzelperson der Bevölkerung als Richtwert
- Weniger wahrscheinliche Szenarien: effektive Dosis von 1 mSv im Kalenderjahr als Richtwert für eine Einzelperson der Bevölkerung

Limit / target / constraint

- Individualschutz: Begrenzung des Risikos eines Individuums, einen schweren gesundheitlichen Schaden aus der Strahlenexposition zu erleiden.
- Angemessener Schutz der Umwelt: Dabei wird davon ausgegangen, dass die Einhaltung der Schutzziele für den Menschen auch einen ausreichenden Schutz der Umwelt gewährleistet.

Vorgaben zum Vorgehen bei Ermittlung des endpoints

- **Rechenvorschriften in den Standards**

Ermittlung der effektiven Dosis (Summe der gewichteten Organdosen in den in Anlage VI Teil C der StrlSchV angegebenen Geweben oder Organen des Körpers durch äußere oder innere Strahlenexposition).

- **Probabilistik vs. Deterministik**

Sowohl für die wahrscheinlichen als auch für die weniger wahrscheinlichen Szenarien werden die Konsequenzen unter expliziter Berücksichtigung von Daten-

unsicherheiten ermittelt. Als Konsequenz in diesem Sinne wird die in dieser Rechnung ermittelte obere Grenze eines 90 %-Konfidenzintervalls für das 90-Perzentil der Dosis festgelegt.

- **Umgang mit Unsicherheiten**

Berücksichtigung der bestehenden jeweiligen Unsicherheiten wie den Szenarien-, Daten- und Modellunsicherheiten

Sowohl für die wahrscheinlichen als auch für die weniger wahrscheinlichen Szenarien werden die Konsequenzen unter expliziter Berücksichtigung von Datenunsicherheiten ermittelt.

- **Vorgaben zu Szenarien / Eintrittswahrscheinlichkeiten**

Wahrscheinliche Szenarien: Szenarien, deren Eintreten im Nachweiszeitraum von 1 Million Jahren eine hohe Wahrscheinlichkeit zuzuordnen ist.

Weniger wahrscheinliche Szenarien: Szenarien, deren Eintreten im Nachweiszeitraum von 1 Million Jahren eine wesentlich geringere Eintrittswahrscheinlichkeit zuzuordnen ist als den wahrscheinlichen Szenarien.

Nicht weiter zu betrachtende Szenarien: Szenarien, deren Auftreten eine sehr kleine Eintrittswahrscheinlichkeit zuzuordnen ist.

Szenarien, die der Klasse der „nicht weiter zu betrachtenden Szenarien„ zuzuordnen sind, brauchen in den Langzeitsicherheitsanalysen nicht behandelt zu werden.

Szenarien, die das unbeabsichtigte menschliche Eindringen beschreiben, werden zusammengefasst. Zur Behandlung in Langzeitsicherheitsanalysen sind Referenzszenarien heranzuziehen. Szenarien, die das beabsichtigte Eindringen des Menschen in das Barrierensystem beschreiben, sowie kriegerische Einwirkungen bleiben außer Betracht.

- **Vorgaben zur Behandlung der Individual- oder Kollektivbelastung (Zeit, Ort, jährliche oder Lebenszeitbelastung)**

Die effektive Dosis bezieht sich auf den Menschen mit seinen heute geltenden Verhaltensweisen.

- **Umgang mit risk dilution**

Keine Thematisierung von risk dilution

Zeitraumen

- Der Langzeitsicherheitsnachweis ist für den Zeitraum von einer Million Jahre zu erbringen.

- Zur Behandlung der Szenarien, die das unbeabsichtigte menschliche Eindringen beschreiben, ist davon auszugehen, dass das Wissen über das Endlager mindestens 500 Jahre erhalten bleibt. Als Zeitpunkt für ein Eingriffsszenario braucht daher kein früherer Zeitpunkt gewählt werden.

4.3 Finland

4.3.1 Regelwerk

- General regulations for the safety of spent fuel disposal (1999), Government Decision 478/1999 /GOV 99/
- Long-term safety of disposal of spent nuclear fuel, STUK Guide YVL 8.4 (2001) /STU 01/
- E. Ruokola: Consideration of unlikely events and uncertainties in the Finnish safety regulations for spent fuel disposal in /STU 04/

4.3.2 Festlegungen des Regelwerkes

Calculation endpoint

- Die jährliche Effektivdosis der der höchsten Strahlenexposition ausgesetzten Person der allgemeinen Bevölkerung soll unter 0,1 mSv liegen.
- Die durchschnittliche jährliche Effektivdosis der übrigen Bevölkerung soll unbedeutend gering sein.

Diese Dosen sollen über einen Zeitraum eingehalten werden, in denen die Strahlenexposition des Menschen adäquat vorhersagbar ist – mindestens aber für mehrere tausend Jahre.

Über diesen Zeitraum hinaus gilt, dass

- die radiologischen Auswirkungen der Abfälle vergleichbar sind mit denen der natürlichen Radioaktivität
- radiologische Auswirkungen in großem Umfang unbedeutend gering sind.

In Ergänzung dazu hat der finnische Regulator /STU 01/ folgende Richtwerte für Aktivitätsfreisetzungen in die Umwelt festgelegt:

- 0.03 GBq/a for the long-lived, alpha emitting radium, thorium, protactinium, plutonium, americium and curium isotopes
- 0.1 GBq/a for the nuclides Se-79, I-129 and Np-237
- 0.3 GBq/a for the nuclides C-14, Cl-36 and Cs-135 and for the long-lived uranium isotopes
- 1 GBq/a for Nb-94 and Sn-126

- 3 GBq/a for the nuclide Tc-99
- 10 GBq/a for the nuclide Zr-93
- 30 GBq/a for the nuclide Ni-59
- 100 GBq/a for the nuclides Pd-107 and Sm-151

Diese Richtwerte gelten für Aktivitätsfreisetzungen aus Szenarien der erwarteten Entwicklung, die erst nach mehreren tausend Jahren beginnen. Diese Freisetzungen können allenfalls über 1 000 Jahre gemittelt werden. Die Summe der Verhältnisse zwischen den nuklidspezifischen Freisetzungen und den jeweiligen Richtwerten soll kleiner als eins sein.

Limit / target / constraint

- Der Dosisrichtwert für Mitglieder einer sich selbst versorgenden Bevölkerungsgruppe liegt bei 0,1 mSv pro Jahr.
- Für unwahrscheinliche Ereignisse gilt ein äquivalenter Dosisrichtwert (d.h. mit der berechneten Dosis x der Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens muss der Dosisrichtwert eingehalten werden).
- Bei einer größeren Anzahl betroffener Personen soll eine durchschnittliche Dosis von 1 bis 10 μ Sv pro Jahr nicht überschritten werden.
- STUK fordert die Betrachtung einer Anzahl unwahrscheinlicher Ereignisse.
(Im Falle der Bohrung eines Tiefbrunnens ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass eine solche Bohrung in der Endlagerregion niedergebracht wird, aber die Wahrscheinlichkeit niedrig, dass dies in einem bestimmten Jahr geschieht, (nicht mehr als 10^{-2}). Die Kriterien erlauben theoretisch ziemlich hohe Individualdosen von etwa 10 mSv/Jahr, gleichwohl diese noch im Bereich von "natürlichen" Dosen bei Tiefbrunnen sind. STUK hat beschlossen, dass dieses Szenario quantitativ analysiert und gegen die erwarteten Dosiskriterien beurteilt werden kann.) /STU 04/
- Zudem ist der Schutz der belebten Natur zu besorgen:
 - Artenschutz: Keine schädlichen Auswirkungen auf Fauna und Flora
 - Individualschutz: Keine schädlichen Auswirkungen auf seltene Tier- und Pflanzenarten sowie Haustiere
 - Erhalt der Biodiversität (heute lebende Arten)

Vorgaben zum Vorgehen bei der Ermittlung des endpoints

Die Einhaltung von langfristigen Strahlungsschutzziele ist durch eine Sicherheitsanalyse für die erwarteten Entwicklungen und die wenig wahrscheinlichen Störfälle zu de-

monstrieren. Die Sicherheitsanalyse soll aus einer numerischen Analyse bestehen, die sich auf experimentelle Studien und - wenn quantitative Analysen nicht möglich oder zu unsicher sind - auf qualitative Expertenmeinung abstützt.

- **Rechenvorschriften in den Standards**

- Die jährliche Effektivdosis wird berechnet aus der in einem Jahr erhaltenen Effektivdosis durch externe Strahlenexposition und der Dosis aus Ingestion. Dabei handelt es sich um die gewichteten Äquivalentdosen von Geweben und Organen unter Berücksichtigung der verschiedenen Strahlungswichtungsfaktoren der einzelnen Gewebe und Organe.
- Die Einhaltung von langfristigen Strahlungsschutzziele ist durch eine Sicherheitsanalyse für die erwarteten Entwicklungen und die wenig wahrscheinlichen Störfälle zu demonstrieren. Die Sicherheitsanalyse soll aus einer numerischen Analyse bestehen, die sich auf experimentelle Studien und - wenn quantitative Analysen nicht möglich oder zu unsicher sind - auf qualitative Expertenmeinung abstützt.

- **Probabilistik vs. Deterministik**

Der Grundansatz in der Langzeitsicherheit wird im Wesentlichen deterministisch geführt.

Wenn jedoch bei weniger wahrscheinlichen Szenarien (Eintrittswahrscheinlichkeit kleiner als 1) die resultierende Individualdosis deterministische Strahlenwirkungen impliziert (Dosen oberhalb 0,5 Sv) darf die Eintrittswahrscheinlichkeit pro Jahr höchstens 10^{-6} betragen.

- **Umgang mit Unsicherheiten**

- Die Unsicherheiten von Daten und Modellen in der Sicherheitsanalyse und ihre Sicherheitsrelevanz sollen getrennt bewertet werden.
- Modellvereinfachend und zur Festlegung der Inputdaten soll davon ausgegangen werden, dass die Wirksamkeit jeder Barriere nicht überschätzt, aber auch nicht übermäßig unterschätzt wird.
- Ergänzende Betrachtungen wie eingrenzende Analysen und Vergleiche mit natürlichen Analoga werden gefordert.

- **Vorgaben zu Szenarien / Eintrittswahrscheinlichkeiten**

Es werden zwei Arten von Szenarien betrachtet:

- Erwartete Entwicklungen mit hoher Wahrscheinlichkeit (auch menschliche Aktivitäten)
- Weniger wahrscheinliche Szenarien (auch menschliche Aktivitäten)

Die Szenarientwicklung basiert auf der FEP Analyse

STUK empfiehlt die Szenarientwicklung nach Zeitabschnitten vorzunehmen und gegebenenfalls stilisierte Szenarien zu betrachten.

- **Vorgaben zur Behandlung der Individual- oder Kollektivbelastung (Zeit, Ort, jährliche oder Lebenszeitbelastung)**

Zur Ermittlung der Individualdosis wird eine sich selbstversorgende Familie oder eine kleine Dorfgemeinschaft, die in der Endlagerregion mit der am höchsten erwarteten Strahlenexposition lebt und Zugang zu einem kleinen See oder einem Brunnen hat, der mit Oberflächenwasser gespeist wird, betrachtet.

In Ergänzung soll die mittlere jährliche Effektivdosis für eine größere Personengruppe, die an einem See oder an der Küste lebt und dort kontaminiertes Wasser konsumiert, bei der Sicherheitsbewertung betrachtet werden. Die Akzeptanz der resultierenden Dosen hängt von der Anzahl der betroffenen Personen ab. Die Individualdosis sollte aber nicht höher sein als ein Hundertstel.....ein Zehntel des Richtwertes der am höchsten belasteten Person.

- **Umgang mit risk dilution**

Keine Thematisierung von risk dilution

Zeitraumen

Die Richtwerte sollen über einen Zeitraum eingehalten werden, in denen die Strahlenexposition des Menschen adäquat vorhersagbar ist – mindestens aber für mehrere tausend Jahre.

Der finnische Regulator /STU 04/ unterscheidet folgende Zeitfenster:

- Betriebszeit: Jahrzehnte
- Ökologisch voraussagbare Zukunft: Vom Verschluss des Endlagers bis zu mehreren tausend Jahren.
- Zeit extremer Klimaveränderungen: Von mehreren tausend zu einigen zehntausend Jahren
- Weit entfernte Zukunft: Jenseits von einigen zehntausend Jahren

4.4 Frankreich

4.4.1 Regelwerk

BASIC SAFETY RULE Rule No. 111.2. /RFS 91/ (wird gegenwärtig überarbeitet)

4.4.2 Festlegungen des Regelwerkes

Calculation endpoint

The safety assessments will include determination of individual exposure expressed as equivalent doses.

To maintain consistency between exposure in the reference situation and potential exposure associated with hypothetical situations, consideration may be given to using the risk concept (the product of the probability of the occurrence of the event and the effect of the associated exposure) to allow for the probability of occurrence of each situation giving rise to exposure.

Limit / target / constraint

Reference situation

For a period of at least 10,000 years: The limit of 0.25 mSv/year will be applied for determining the acceptability of the radiological consequences.

Beyond this period the same 0.25 mSv/year limit shall be used as a reference value.

Hypothetical situations

To maintain consistency between exposure in the reference situation and potential exposure associated with hypothetical situations, consideration may be given to using the risk concept (the product of the probability of the occurrence of the event and the effect of the associated exposure) to allow for the probability of occurrence of each situation giving rise to exposure.

Vorgaben zum Vorgehen bei Ermittlung des endpoints

The safety assessments will include determination of individual exposure expressed as equivalent doses. The characteristics of man will be considered to be constant (sensitivity to radiation, nature of food, contingency of life, and general knowledge without assuming scientific progress, particularly in the technical and medical fields).

- **Rechenvorschriften in den Standards**

Individual exposure expressed as equivalent doses

Therefore, individual exposure expressed as a dose equivalent, associated with hypothetical situations for which allowance must be made in the design of the repository must be maintained well below levels liable to give rise to deterministic effects.

- **Probabilistik vs. Deterministik**

Keine detaillierten Vorgaben

- **Umgang mit Unsicherheiten**

Evaluation of individual exposure must be accompanied by ranges of uncertainty and all available material pertinent to demonstrating its conservative nature. Sensitivity studies must also be carried out in order to identify the most important parameters and to justify the simplification hypotheses applied in evaluating the radiological consequences.

- **Vorgaben zu Szenarien / Eintrittswahrscheinlichkeiten**

For the purposes of the safety analysis, consideration is given to:

a reference situation, corresponding to the possible future of the repository as regards events which are certain or highly probable

hypothetical situations corresponding to the occurrence of random events, of natural origin or associated with human activity

Reference situation:

Events associated with the presence of the repository:

the impact of the latter will consist of the initiation of processes associated with the emission of heat, mechanical, physical and chemical changes, as well as desaturation of the natural medium around the repository. All the processes of gradual degradation of the artificial barriers (corrosion of the containers and the containment matrixes, aging of the engineered barriers and seals etc.) must be taken into consideration,

a series of highly probable natural events (changes in climate, subsidence and up-lifting). The climatic changes (external geodynamics) are accompanied by processes such as erosion/ sedimentation cycles, and changes in surface hydrology and ground-water movements.

Hypothetical situations corresponding to random events:

The events allowed for in these situations shall be either events of the same nature as those considered in the reference situation but of exceptional amplitude, or events which are of high uncertainty as to when and how they will take place. Such events are divided into two categories, those of natural origin and those associated with human activity

- **Vorgaben zur Behandlung der Individual- oder Kollektivbelastung (Zeit, Ort, jährliche oder Lebenszeitbelastung)**

Furthermore, for modelling of the biosphere, hypothetical critical groups are to be adopted, representative of individuals liable to receive the highest doses, including individuals living in at least partial self-sufficiency

- **Umgang mit risk dilution**

Keine Thematisierung von risk dilution

Zeitraahmen

For a period of at least 10,000 years: The limit of 0.25 mSv/year will be applied for determining the acceptability of the radiological consequences.

Beyond this period the same 0.25 mSv/year limit shall be used as a reference value. The events and processes adopted for the purposes of the safety analysis shall be made to the following periods:

- an "initial" period of 500 years an intermediate period of 50,000 years
- a subsequent period after 50,000 years

4.5 Kanada

4.5.1 Regelwerk

- Background Information and Regulatory Requirements Regarding the Concept Assessment Phase: R-71 /AECB 85/
Untergesetzlich, noch in Kraft, Mischung aus policy statements und regulatory guidance /FER 05/
- Requirements and Guidelines for the Disposal of Radioactive Wastes - Long Term Aspects: R-104 /AECB 86/
Untergesetzliche Leitlinie (Grundlage für /AECL 94a, b/), inzwischen außer Kraft, teilweise (policy aspects) nun in /CNSC 04/ eingegangen, guidance soll durch /CNSC 06/ ersetzt werden /FER 05/
- Regulatory Policy: P-290 /CNSC 04/
Untergesetzliche policy statements
- Regulatory Guide: G-320 /CNSC 06/
Untergesetzliche Leitlinie, beinhaltet die Behandlung radiologischer und chemotoxischer Gefahren für Mensch und Umwelt

4.5.2 Festlegungen des Regelwerkes (G-320)

Calculation endpoint

The long term safety of radioactive waste management is usually demonstrated by directly comparing predictions with current regulatory limits, such as dose and contaminant concentrations. Several other safety indicators, such as those that reflect containment barrier effectiveness or site-specific characteristics that can be directly related to contaminant release and transport phenomena, can also be presented to illustrate the long term performance of a waste management system. Some examples of additional parameters include:

1. Container corrosion rates; 2. Waste dissolution rates;
3. Groundwater age and travel time;
4. Fluxes of contaminants from a waste management facility;
5. Concentrations of contaminants in specific environmental media (for example, con-

centration of radium in groundwater); or

6. Changes in toxicity of the waste.

Limit / target / constraint

Long term safety assessments of a facility or contaminated site should provide reasonable assurance that the regulatory radiological dose limit for public exposure (currently 1 mSv/a) will not be exceeded. However, to account for the possibility of exposure to multiple sources and to help ensure that doses resulting from the facility being assessed are as low as reasonably achievable (ALARA), an acceptance criterion that is less than the regulatory limit should be used.

For example, for design optimization, the ICRP recommends a design target, referred to as a „dose constraint,“ of no more than about 0.3 mSv/a. While the dose constraint is used as a design target in the optimization process, it is not used as a limit for compliance. The dose constraint should therefore not be used to account for uncertainties in assessment model predictions.

Vorgaben zum Vorgehen bei Ermittlung des endpoints

Radiological exposure can be expressed as a radiological dose or as a radiological risk that reflects the probability of developing a health or genetic effect from the exposure. The effects or radiological exposure are classified as and “deterministic effects” or as “stochastic effects,” depending on the likelihood that an effect will develop. Deterministic effects will occur if the dose exceeds a threshold, whereas the likelihood of stochastic effects is directly proportional to the magnitude of the dose. Since the acceptable dose limit (1 mSv/a) for individuals who are not nuclear energy workers is orders of magnitude less than the threshold for any deterministic effect, only stochastic effects are discussed further in this document.

The probability of stochastic effects is evaluated as the product of the dose and a probability coefficient for stochastic effects. This probability coefficient is commonly referred to as a “risk conversion factor,” and reflects the likelihood of developing a health or genetic effect from a radiological exposure at low doses and dose rates.

The probability coefficient for stochastic effects currently recommended by the ICRP is 0.073 per Sievert for the general public (ICRP 1991). The probability of stochastic effects corresponding to the 1 mSv/a statutory effective dose limit for members of the public is about 7×10^{-5} per year. Similarly, the probability of stochastic effects corresponding to a dose constraint of 0.3 mSv/a is about 2×10^{-5} per year.

Because the probability of stochastic effects is directly proportional to the dose, the risk

conversion factor is a constant value. Use of either radiological dose or the associated probability of stochastic effects in long term safety assessments may be acceptable. The consequence of any assessment scenario, then, can be expressed as a dose or as a probability of stochastic effect.

- **Rechenvorschriften in den Standards**

The form of radiological acceptance criteria should be consistent with the approach and strategy chosen for the long term assessment. The dose calculated by deterministic assessments can be compared directly to radiological acceptance criteria expressed as dose, or both the assessment results and the acceptance criteria can be expressed as probability of stochastic effects by applying the risk conversion factor.

Probabilistic assessments calculate a potential risk based on the likelihood of an exposure occurring and the consequence of each exposure (whether expressed as a dose or as a probability of stochastic effect). The result of the assessment is the sum over all significant scenarios of the product of the probability of the scenario and the probability of stochastic effects. Each radiological acceptance criterion must be expressed as risk (i.e., the probability of stochastic effects) for direct comparison to probabilistic assessment results.

In probabilistic assessments, high consequence scenarios with low probability can have the same potential risk as low consequence scenarios with high probability. If a probabilistic approach is adopted in addition to a direct comparison of calculated potential risk and the risk acceptance criterion, the assessment results should be evaluated as the distribution of doses compared to dose acceptance criteria, including discussion of the probability of the doses occurring.

- **Probabilistik vs. Deterministik**

Vgl. vorhergehende Punkte

- **Umgang mit Unsicherheiten**

A formal uncertainty analysis of the predictions should be performed to identify the sources of uncertainty. This analysis should distinguish between uncertainties arising from:

1. Input data;
2. Scenario assumptions;
3. The mathematics of the assessment model; and
4. The conceptual models.

- **Vorgaben zu Szenarien / Eintrittswahrscheinlichkeiten**

A scenario is an assumed set of future conditions or events to be modeled in an assessment. A long term assessment scenario should be sufficiently comprehensive to account for all of the potential future states of the site and the biosphere. It is common for a safety assessment to include a central scenario of the normal, or expected, evolution of the site and the facility over time, and additional scenarios that examine the potential impact of disruptive events or modes of containment failure.

Each scenario presented in a safety assessment should include specific information about:

1. The timeframe on which the assessment is based;
2. The duration (start to finish) during which institutional controls are relied upon as a safety feature; and
3. The identity and characteristics of the assumed receptors and critical groups.

A safety assessment should present and justify the techniques and criteria used to develop the scenarios that are analyzed. Scenarios should be developed in a systematic, transparent, and traceable manner through a structured analysis of relevant features, events, and processes (FEPs) that are based on current and future conditions of site characteristics, waste properties, and receptor characteristics and their lifestyles. The approach to scenario development should be consistent with the rigor of the assessment, taking into consideration the purpose of the assessment, the hazard of the waste, and the nature of the decision for which the assessment is being undertaken. Accordingly, scenario development can range from “brainstorming” to formal analysis of FEPs and extrapolation of current lifestyle information.

A great deal of work has been done globally on assembling lists of FEPs that have been used in past assessments, particularly through the Nuclear Energy Agency and the BIOMOVs project (NEA 2000, NEA 2003, BIOMOVs 1996). These lists not only provide a basis for comparison with site-specific scenarios, they can also be used to develop initial generic scenarios in the absence of site-specific data, or as default FEPs for developing stylized scenarios.

Stylized scenarios are generic representations of a group of scenarios, where part of the waste management system is treated in a standardized or simplified way. Stylized scenarios based on default information and data have been developed for the biosphere, climate change and glaciation, and exposure pathways (NEA 2001, IAEA 2003, SKI 1995, OPG 2001). The application of stylized scenarios may be

useful where sitespecific information is lacking, or where the purpose of the assessment does not require detailed site-specific information. As assessment time scales become longer, the use of stylized scenarios for distant future conditions becomes more important.

The safety assessment should demonstrate that the set of scenarios developed is credible and comprehensive. Some FEPs or scenarios may be excluded from the assessment if there is an extremely low likelihood that they would occur, or if they would have trivial impact. Considering the range of scenarios that can be developed for different waste management systems at different stages in their life cycles, applicants are expected to propose the criteria for excluding FEPs and scenarios and consult with CNSC staff as to their acceptability. The approach and screening criteria used to exclude or include scenarios should be justified and well-documented

- **Vorgaben zur Behandlung der Individual- oder Kollektivbelastung (Zeit, Ort, jährliche oder Lebenszeitbelastung)**

Vgl. vorhergehende Punkte

- **Umgang mit risk dilution**

Keine Thematisierung von risk dilution

Zeitrahmen

There is no time limit associated with the statutory objective to “prevent unreasonable risk, to the environment and to the health and safety of persons..” (NSCA, 9(a)(i)), or with the principle that the predicted impact on the health and safety of persons and the environment from the management of radioactive waste are no greater than the impacts that are permissible in Canada at the time of the regulatory decision (as discussed in CNSC regulatory policy P-290, Managing Radioactive Waste).

Assessments of the future impact that may arise from the radioactive waste are expected to include the period of time during which the maximum impact is predicted to occur. In some cases, only the magnitude of the maximum impact, independent of time, may be sufficient for the assessment (e.g., in bounding assessments using calculations based on solubility constraints).

The assessment should provide a rationale for the assessment time frame. The approach taken to determine respective periods of time used in the assessment should take into account the following elements:

1. Hazardous lifetime of the contaminants associated with the waste;

2. Duration of the operational period (before the facility reaches its end state);
3. Design life of engineered barriers;
4. Duration of both active and passive institutional controls; and
5. Frequency of natural events and human-induced environmental changes (e.g., seismic occurrence, flood, drought, glaciation, climate change, etc.).

The assumed performance time frames of engineered barriers and the evolution of their safety function with time should be documented and justified, with reference to current national or international standards where appropriate.

4.6 Schweden

4.6.1 Regelwerk

- “The Swedish Radiation Protection Institute’s Regulations concerning the Protection of Human Health and the Environment in connection with the Final Management of Spent Nuclear Fuel or Nuclear Waste” (SSI FS 1998:1) /SSI 98/
 - SSI FS 2005:5: The Swedish Radiation Protection Authority’s guidelines on the application of the regulations (SSI FS 1998:1) concerning protection of human health and the environment in connection with the final management of spent nuclear fuel and nuclear /SSI 05/
- “The Swedish Nuclear Power Inspectorate’s regulations concerning safety in final disposal of nuclear waste” (SKIFS 2002:1) (in /SKI 02/)
 - “The Swedish Nuclear Power Inspectorate’s General Recommendations ...” (in /SKI 02/)

4.6.2 Festlegungen des Regelwerkes

Calculation endpoint

- annual risk of harmful effects (SSI FS 1998:1)
- Kollektivdosis über 10 000 Jahre resultierend aus Belastung in den ersten 1000 Jahren zu Optimierungszwecken
- longer periods: use dose as one of several safety indicators /SKI 02/

Limit / target / constraint

- limit („shall be designed so that ... does not exceed”) annual risk 10^{-6} (SSI FS 1998:1)

Vorgaben zum Vorgehen bei Ermittlung des endpoints

probability coefficients ICRP 60 (SSI FS 1998:1)

7.3%/Sv auch in /SSI 05/

- **Rechenvorschrift in den Standards**
annual average on the basis of an estimate of the lifetime risk for all relevant exposure pathways for every individual /SSI 05/
- **Probabilistik vs. Deterministik**
both deterministic and probabilistic methods, probabilities estimated as far as possible; kein Kommentar zur Nutzung für Risikoberechnung /SKI 02/
- **Umgang mit Unsicherheiten**
main scenario as starting point (number of calculation cases);
uncertainties: scenario, system, models, parameter, spatial variation: described and handled in consistent & structured manner, both deterministic and probabilistic methods, probabilities estimated as far as possible; kein Kommentar zur Nutzung für Risikoberechnung /SKI 02/
less probable: scenario uncertainty /SKI 02
- **Vorgaben zu Szenarien / Eintrittswahrscheinlichkeiten**
Ein Fall soll unter der Annahme einer konstanten Biosphäre gerechnet werden (SSI FS 1998:1)
FEPs which can lead to dispersion of radioactive substances after closure (SKIFS 2002:1)
main / less probable / other or residual scenarios:
main: probable evolution (external) + realistic or justified pessimistic assumptions (internal)
less probable: scenario uncertainty, impact of human activities
residual: illustrative, HI /SKI 02/
few possible climate evolutions with realistic biosphere conditions for each, total risk evaluated separately for every assumed climate change by totalling risk from scenarios and calculation cases (also Wahrscheinlichkeit 1 für jede Klima-Annahme, alles andere ist zu rechtfertigen), intrusion separately (countermeasures ...); illustrative Szenarien (early loss of function) outside risk analysis /SSI 05/
- **Vorgaben zur Behandlung der Individual- oder Kollektivbelastung (Zeit, Ort, jährliche oder Lebenszeitbelastung)**
representative individual in the group exposed to greatest risk (SSI FS 1998:1),
group: where individuals receive a highest risk down to a tenth of this risk; larger group (z. B. Verteilung über See): arithmetic average in group can be used; small

group (drinking well) compliance if greatest risk for individual is lower than 10^{-5} per year /SSI 05/

- **Umgang mit risk dilution**

Zwei Rechenwege: annual risk as average of all realisations / risk for a group that is assumed to live after the event and affected by its maximum consequence /SSI 05/

Zeitrahmen

1000 Jahre: quantitative Analyse des Einflusses auf menschliche Gesundheit und Umwelt; danach: assessment based on various possible sequences for the development ... (SSI FS 1998:1)

as long as barrier functions are required but at least ten thousand years (SKIFS 2002:1)

Vergleich mit natürlichen Substanzen zur Festlegung des Zeitrahmens, Schwierigkeiten jenseits einer Million Jahre, ersten Eiszeitzyklus (100.000 a) berücksichtigen, erste 1000 Jahre entsprechend SSI-Regel mit heutiger Biosphäre /SKI 02/

4.7 Schweiz

4.7.1 Regelwerk

- Richtlinie für schweizerische Kernanlagen HSK-R-21/d mit Stand November 1993 /HSK 93/
- Kernenergieverordnung /KEV 04/

4.7.2 Festlegungen des Regelwerkes

Calculation endpoint

- zu keiner Zeit Überschreitung einer jährlichen Individualdosis von 0,1 mSv
- infolge unwahrscheinlicher Vorgänge und Ereignisse: zu erwartendes radiologisches Todesfallrisiko für eine Einzelperson soll zu keiner Zeit ein Millionstel pro Jahr übersteigen.

Limit / target / constraint

- Individualschutz: Limit (begrenzte Personenzahl)
- überregionale Auswirkungen mit sehr großer Bevölkerung: die zulässige Dosis kann geringer als die Limite angesetzt werden, Umkehrung möglich.
- Vorbehalte gelten auch bezüglich der im Schutzziel 2 festgelegten Risikolimits.

Vorgaben zum Vorgehen bei Ermittlung des endpoints

- Angabe der Schwankungsbreiten der relevanten Daten bei der Dosis- resp. Risikoberechnung.
- Konservative Annahmen bei bestehenden Unsicherheiten
- Abschätzung von Unsicherheiten aufgrund nicht möglicher Erfassung von Barriereeigenschaften
- Abschätzung von Unsicherheiten aufgrund fehlender Kenntnis oder vereinfachter Modellierung von Freisetzungs- und Ausbreitungsmechanismen

- **Rechenvorschriften in den Standards**

Ermittlung der Individualdosis als effektive Dosis (Summe der mit den Wichtungsfaktoren W_T gewichteten Äquivalentdosen in allen Organen und Geweben).

Ermittlung des Risikos: Produkt aus einem potenziellen Gesundheitsschaden und der Häufigkeit, mit der dieser Schaden eintritt. Auch Summe solcher Produkte.

- **Probabilistik vs. Deterministik**

Vgl. „Calculation endpoint“

- **Umgang mit Unsicherheiten**

Den Unsicherheiten muss Rechnung getragen werden. (siehe Vorgaben)

Dosisberechnungen für die ferne Zukunft sind nicht als effektive prognostizierte Strahlenexpositionen einer definierbaren Bevölkerungsgruppe zu verstehen. Es handelt sich dabei vielmehr um einen Indikator zur Bewertung der potenziellen Radionuklidfreisetzung in die Biosphäre.

- **Vorgaben zu Szenarien / Eintrittswahrscheinlichkeiten**

Bei den Szenarien, welche die mutmaßlichen Varianten der Entwicklung des Endlagersystems umschreiben, gilt die im Schutzziel 1 spezifizierte jährliche Dosislimite von 0,1 mSv.

Der Projektant kann zeigen, dass auch bei Einwirkung gewisser, in der mutmaßlichen Entwicklung nicht berücksichtigter Vorgänge und Ereignisse die Dosislimite von Schutzziel 1 eingehalten wird.

Für die übrigen zu betrachtenden Vorgänge und Ereignisse, insbesondere für solche, die zur Überschreitung der Dosislimite gemäß Schutzziel 1 führen würden, hat der Projektant das restliche Gesamtrisiko zu ermitteln. Dieses restliche Gesamtrisiko soll zu keiner Zeit die im Schutzziel 2 festgelegte Risikolimit von einem Millionstel pro Jahr übersteigen.

Vorgänge und Ereignisse mit extremer Unwahrscheinlichkeit und solche, die bedeutend schwerwiegendere nicht-radiologische Konsequenzen haben, sowie absichtliche menschliche Eingriffe in das Endlagersystem brauchen in der Sicherheitsanalyse nicht betrachtet zu werden.

Es sind Vorkehrungen zu treffen, um die Information über das Endlager aufrecht zu erhalten und damit die Wahrscheinlichkeit eines frühen unbeabsichtigten Eingriffs in das Endlagersystem zu vermindern.

- **Vorgaben zur Behandlung der Individual- oder Kollektivbelastung (Zeit, Ort, jährliche oder Lebenszeitbelastung)**

Der Dosisgrenzwert bezieht sich auf die Strahlenexposition eines durchschnittlichen Individuums innerhalb der von den potenziellen Auswirkungen aus einem Endlager meist betroffenen Bevölkerungsgruppe.

- **Umgang mit risk dilution**

Keine Thematisierung von risk dilution

Zeitraumen

- Keine Angabe über Zeitbegrenzung; (unbegrenzt)
- Dosis- resp. Risikoberechnungen mindestens bis zu den maximalen potenziellen Konsequenzen aus dem Endlager
- In den ersten 1000 Jahren ist ein vollständiger Einschluss der Radionuklide anzustreben.

4.8 United Kingdom (UK)

4.8.1 Regelwerk

Radioactive Substances Act 1993

Disposal Facilities on Land for Low and Intermediate Level Radioactive Wastes Guidance and Requirements for Authorisation

SEPA - Department of the Environment for Northern Ireland /ESD 97/

4.8.2 Festlegungen des Regelwerkes

Calculation endpoint

- Individualschutz
 - Phase der institutionellen Kontrolle (dose constraint):
dose constraint: 0,5 mSv/a
(quellenbezogen nicht über 0,3 mSv/a)
 - Phase nach institutioneller Kontrolle (risk target):
 10^{-6}
- Risk assessment may be based on probabilistic techniques

Limit / target / constraint

- Dose constraint (Definition)
A restriction on annual dose to an individual, which may either relate to a single source or to a complete site, in order to ensure that when aggregated with doses from all sources, excluding natural background and medical procedures, the dose limit is not exceeded. The Government has set a maximum dose constraint value of 0.3 mSv/y when determining applications for discharge authorisations from a single new source, and a dose constraint value of 0.5 mSv/y for a complete site (which may include several sources with more than one operator)
- Dose limit (Definition)
For the purposes of discharge authorisations, the UK has (since 1986) applied a

limit of 1 mSv/y to members of the public from all man-made sources of radioactivity

Vorgaben zum Vorgehen bei Ermittlung des endpoints

- Institutionelle Kontrolle:
Individualschutz (repräsentatives Mitglied der kritischen Gruppe (begrenzte Anzahl von Personen)): effektive Dosis $\geq 0,5$ mSv/y
- Nach institutioneller Kontrolle:
Individualschutz (repräsentatives Mitglied einer potenziell exponierten Gruppe) konsistent mit einem risk target von 10^{-6}

- **Rechenvorschriften in den Standards**

Effective dose (Definition)

The summation of the equivalent doses to the individual tissues of the body, weighted by the appropriate tissue weighting factor, see ICRP Publication 60 (Ref 2)

For the purpose of estimating the risk, a dose-risk factor of 0.06 per Sv should be used for situations in which the dose rate is less than 0.5 Sv/y. If there are situations which may give rise to dose rates of 0.5 Sv/y or more, the assessment of risk should take account of the contribution of deterministic radiation effects to the assessed radiological risk.

- **Probabilistik vs. Deterministik**

Probabilistic risk assessment (Definition)

In the context of performance assessment of a waste disposal facility, the assessment of radiological risk, in quantitative terms, taking account of quantifiable uncertainty

If there are situations which may give rise to dose rates of 0.5 Sv/y or more, the assessment of risk should take account of the contribution of deterministic radiation effects to the assessed radiological risk

- **Umgang mit Unsicherheiten**

Treatment of uncertainty

The developer will need to demonstrate that the safety case takes adequate account of all relevant uncertainties.

This will entail:

- definition of the scope of the assessment;

- systematic identification of all relevant sources of uncertainty;
- quantification of significant uncertainties, where practicable;
- implementation of measures to reduce overall uncertainty; and
- maintenance of a detailed audit trail

- **Vorgaben zu Szenarien / Eintrittswahrscheinlichkeiten**

The developer should therefore present the range of possible doses which each potentially exposed group may receive, together with the probability that the group receives any given dose. Where events or processes are identified that could lead to high doses but at low and uncertain probability, quantitative assessments of risk may be supplemented by qualitative arguments.

The developer may advance arguments to justify a very low probability of inadvertent actions affecting the disposal system for a period following closure by reference to the proposed postclosure management plans. However, in the longer term, institutional controls cannot be relied upon and the developer will be expected to assess the likelihood and consequences of possible future human actions.

- **Vorgaben zur Behandlung der Individual- oder Kollektivbelastung (Zeit, Ort, jährliche oder Lebenszeitbelastung)**

The exposed group receiving the highest dose from the given source is the critical group.

For the period before control over a specialised disposal facility is withdrawn, the critical group concept provides a valid and well established approach to assessing the dose to members of the public for comparison with the dose constraints.

For the period after control is withdrawn, exposure of any given group is not certain to occur and an assessment might identify a number of potentially exposed groups. Any given level of exposure is associated with a certain probability that it will be received. The exposed group potentially receiving the highest dose may not be the group at highest risk, because the probability of receiving the dose must also be considered. All groups potentially receiving a significant dose need to be considered to determine which of them is at greatest risk.

- **Umgang mit risk dilution**

Keine Thematisierung von risk dilution.

Zeitraumen

No definite cut-off in time is prescribed either for the application of the risk target or the period over which the risk should be assessed. The timescales over which assessment results should be presented is a matter for the developer to consider and justify as adequate for the wastes and disposal facility concerned.

4.9 USA

Yucca Mountain

4.9.1 Regelwerk

- 40 CFR Part 191 /EPA 05/
- 40 CFR Part 197 /EPA 01/
Der 40 CFR 197 wird derzeit einer Revision unterzogen /EPA 05a/ .
- NRC Standards im 10 CFR 63 /NRC 01/

4.9.2 Festlegungen des Regelwerkes

Calculation endpoint (40 CFR 197)

- “annual dose to the reasonably maximally exposed individual of less than 0.15 mSv effective dose equivalent” über 10 000 Jahre für die ungestörte Entwicklung des Systems
- jenseits 10 000 Jahre „peak dose“ als Indikator, kein Grenzwert
(revision: 3.5 mSv/a)
- Grundwasserschutz: Begrenzung für die Radionuklidkonzentrationen im Grundwasser
 - Radium 226 und Radium 228 -> 5 Picocurie/Liter
 - Alpha Aktivität -> 15 Picocurie/Liter
 - kombinierte Beta und Photonen emittierende Radionulide -> 40 mSv/a
- HI bis 10 000 Jahre: wie in der Normalentwicklung Dosisgrenzwert 0,15 mSv/a
jenseits 10 000 Jahre: kein Bewertungsmaßstab

Limit / target / constraint

- Individualschutz: Grenzwert der effektiven Individualdosis (Limit)
- Grundwasserschutz: Grenzwerte für die Radionuklidkonzentrationen (Limit)
- Dosisgrenzwert für die Szenarien menschliche Eingriffe (HI) bis 10 000 Jahre (Limit)

Vorgaben zum Vorgehen bei Ermittlung des endpoints

Obwohl ein Dosisgrenzwert vorgegeben ist, wurde dieser risikobasiert ermittelt. EPA leitet den Grenzwert für Bevölkerung ab von einem akzeptablen Risiko von 8.5 fatal cancer pro 1 Mio. Bevölkerung. Der Dosisgrenzwert wurde mit dem Konversionsfaktor von 0,075 per Sv errechnet.

(ICRP's coeff. 0.073 /Sv → corresponds to annual expected dose of about 15 μ Sv)

- **Rechenvorschriften in den Standards**

- Die Standards erfordern vom Antragsteller eine Berechnung der Äquivalentdosis unter Berücksichtigung der Unsicherheiten (reasonable expectation). Hieraus wird ein probabilistischer Ansatz abgeleitet.
- Annual committed effective dose equivalent:
40 CFR 197 gibt in der Revision eine Berechnungsvorschrift entsprechend ICRP 26/30 bzw. ICRP 60/72 vor.

- **Probabilistik vs. Deterministik**

Die Standards fordern die Einhaltung der Dosisgrenzwerte unter Berücksichtigung der Unsicherheiten. Hieraus leiten NRC und DOE ein methodisches Vorgehen mittels eines probabilistischen Ansatzes ab.

- **Umgang mit Unsicherheiten**

Die Standards fordern den Umgang mit Unsicherheiten.
DOE behandelt in der TSPA Unsicherheiten (Daten, Modell)

- **Vorgaben zu Szenarien / Eintrittswahrscheinlichkeiten**

Die Standards schreiben die Behandlung der ungestörten Entwicklung des Systems vor, sagen aber gleichzeitig, dass alle potenziellen Transportwege und Expositionen zu analysieren sind.

Human intrusion: Diese Szenarien müssen betrachtet werden. Der Zeitpunkt des Eindringens ist frühestens, wenn die Abfallgebinde einen Zustand erreicht haben, dass sie von der Bohrmannschaft nicht detektiert werden können. Als Szenario wird das Eindringen mittels Bohrung genannt.

Als Schutzziel wird bei einem Eintrittszeitpunkt innerhalb 10 000 Jahre der Dosisgrenzwert herangezogen. Jenseits 10 000 Jahre ist kein quantitativer Standard gesetzt.

- **Vorgaben zur Behandlung der Individual- oder Kollektivbelastung (Zeit, Ort, jährliche oder Lebenszeitbelastung)**

40 CFR 197 definiert die RMEI (reasonably maximally exposed individual):

RMEI ist eine hypothetische Person, die

- in der erreichbaren Umgebung des Endlagers lebt, insbesondere an der Stelle der errechneten maximalen Radionuklidkonzentration,
- Lebens- und Ernährungsgewohnheiten der heute im Amargosa Valley lebenden Menschen aufweist und
- 2 Liter Wasser pro Tag trinkt, das aus einem Brunnen stammt, der an der Stelle steht, für die das Maximum der Radionuklidkonzentration errechnet wurde.

- **Umgang mit risk dilution**

Weder die Regulatorien noch DOE thematisieren den Umgang und die Minimierung von risk dilution.

Im Peer Review wird auf diese Problematik hingewiesen und für zukünftige Arbeiten gefordert, dass Maßnahmen zur Verhinderung von risk dilution sorgfältig zu beschreiben sind /NEA 02/.

Zeitraumen

- 10 000 Jahre: quantitative Analyse des Einflusses auf menschliche Gesundheit und Umwelt; danach: qualitative Argumentation
- jenseits 10 000 Jahre: solange die Barrierenfunktionen erhalten sind, maximal 1 Mio Jahre

5 Umsetzung der Anforderungen aus den Regelwerken im Langzeitsicherheitsnachweis

5.1 Belgien

5.1.1 Sicherheitsberichte und Peer Reviews

- SAFIR 2: Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2 (NIROND 2001–05 E December 2001) /OND 01/ unter Berücksichtigung des
- International Peer Review zu SAFIR 2: Belgian R&D Programme on the Deep Disposal of High-level and Long-lived Radioactive Waste (OECD/NEA 2003) /NEA 03/

5.1.2 Auslegung und Behandlung in den Sicherheitsberichten

Calculation endpoint

- Ermittlung der Individualdosis für alle Szenarien
- Zusätzlich Ermittlung des Risikos für weniger wahrscheinliche Szenarien gemäß:

<p>$R = (\text{the probability of exposure}) \times (\text{the dose received}) \times (\text{the risk factor}).$ (The ICRP proposes a risk factor of $5 \cdot 10^{-2}$ per Sv for the probability of a fatal cancer for the entire population)</p>
--

- Die effektive Individualdosis wird als Sicherheitsindikator interpretiert, für Szenarien mit einer Wahrscheinlichkeit deutlich kleiner als “potential exposure”.
- Die Kollektivdosis wird als Sicherheitsindikator mit begrenzter Aussagekraft angesehen.
- Es wird gefordert, weitere Sicherheitsindikatoren aufzunehmen.

Das IRT weist erfreut darauf hin, dass ONDRAF/NIRAS unter einem Sicherheitsnachweis nicht einfach den numerischen Vergleich von Dosis oder Risiko versteht, sondern eine umfangreiche Analyse, in die quantitative und qualitative Argumente zur Demonstration eines safety case eingebracht werden. Die von ONDRAF/NIRAS empfohlenen Ansätze von Sicherheitsfunktionen und alternativen Sicherheitsindikatoren

sind nützliche Tools zur Überprüfung der verschiedenen Komponenten eines Endlagersystems.

Limit / target / constraint

- Es gibt keine Festlegung durch den belgischen Regulator
- In SAPHIR 2 wurden die Empfehlungen der ICRP 81 zugrunde gelegt
- Für einen Dosisrichtwert von 0,3 mSv pro Jahr werden für das korrespondierende Risiko Proportionalitätsfaktoren von 1 bis $2 \cdot 10^{-5}$ pro Jahr verwendet

Vorgehen bei Ermittlung des endpoints

• Rechenvorschrift

Vergleiche „Calculation endpoints“ und „Limit/target/constraint“

• Probabilistik vs. Deterministik

In SAPHIR 2 werden deterministische und stochastische Analysen durchgeführt.

• Umgang mit Unsicherheiten

Es wird unterschieden in:

- Szenarienunsicherheiten
- Modellunsicherheiten
- Parameterunsicherheiten
- Zur Behandlung der Unsicherheiten werden verschiedene Zeitabschnitte vorgegeben:
 - 0 bis 500 Jahre
 - 500 bis 20 000 Jahre
 - 20 000 bis 1 000 000 Jahre
 - über 1 000 000 Jahre
- Die quantitativen Analysen werden bis etwa 1 000 000 Jahre durchgeführt.
- Die Biosphäre wird mittels einer Referenzbiosphäre behandelt.
- In SAPHIR 2 liegt das Schwergewicht in der Behandlung der Parameterunsicherheiten.

• Vorgehen bei der Entwicklung von Szenarien / Eintrittswahrscheinlichkeiten

- Szenarien auf der Basis einer FEP-Liste
- Referenzszenario: Normalentwicklung mit 2 Varianten („simplified normal-evolution scenario“ und „normal-evolution scenario“)

- **Vorgehen bei der Behandlung der Individual- oder Kollektivbelastung (Zeit, Ort, jährliche oder Lebenszeitbelastung)**

Vgl. „Calculation endpoints“ und „Limit/target/constraint“

Die Individualdosis entspricht der jährlichen effektiven Äquivalentdosis eines Individuums der kritischen Gruppe oder in einer repräsentativen Bevölkerungsgruppe. Diese Gruppe muss so definiert werden, dass die erwarteten gesundheitlichen Auswirkungen für zukünftige Generationen nicht höher sind als die heute akzeptierten. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten müssen auch für potenzielle Expositionen mit niedriger Eintrittswahrscheinlichkeit betrachtet werden.

- **Umgang mit risk dilution**

Keine Thematisierung von risk dilution.

Zeitraumen

- Kein cut-off seitens des belgischen Regulators
- Der Langzeitsicherheitsnachweis wird entlang folgender Zeitfenster geführt:
 - 0 bis 500 Jahre: Informationen über das Endlager liegen vor
 - 500 bis 20 000 Jahre: die geologische Barriere ist stabil, ab 500 Jahre menschliches Eindringen möglich
 - 20 000 bis 100 000 Jahre: Berücksichtigung einer Eiszeit
 - 100 000 bis 1 000 000 Jahre: Berücksichtigung von Eiszeiten und Interglazialperioden sowie Bewegungen der Erdkruste
 - Jenseits von 1 000 000 Jahren: qualitative Behandlung

5.2 Finland

5.2.1 Sicherheitsberichte und Peer Reviews

- Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara - TILA-99 -, VTT Energy, March 1999 POSIVA 99-07, ISBN 951-652-062-6 /POS 99/
- Plan for Safety Case of Spent Fuel Repository at Olkiluoto, POSIVA 2005-01, February 2005 /POS 05/
- Olkiluoto Site Description 2004, POSIVA 2005-03, May 2005 /POS 05a/

5.2.2 Auslegung und Behandlung in den Sicherheitsberichten

Calculation endpoint

Vgl. Regelwerk

Limit / target / constraint

Vgl. Regelwerk:

Endpoint Criterion	Criterion
Annual effective dose to the most exposed members of the public	Less than 0.1 mSv
Average annual effective dose to the other members of the public	Insignificantly low
Biodiversity of currently living populations	No decline
Effects on populations of fauna and flora	No significant detriment
Effects on individuals of domestic animals and rare plants and animals	No detrimental effects

Zur Behandlung der non-human Biota verweist POSIVA auf IAEA, ICRP und EG (FASSET und ERICA)

Vorgehen bei Ermittlung des endpoints

- **Rechenvorschrift**

Vgl. Regelwerk

Hinsichtlich der Bewertung der Strahlenexposition aller Umweltkompartimente anhand verschiedener Sicherheitsindikatoren verweist POSIVA beispielhaft auf einen Ansatz von Broed et al. /BRO 04/.

- **Probabilistik vs. Deterministik**

Ansatz vornehmlich deterministisch

- **Umgang mit Unsicherheiten**

Die Unsicherheiten in der Entwicklung des Endlagersystems und seiner natürlichen Umgebung werden im Rahmen einer deterministischen Unsicherheitsanalyse und z. T. in den Rechnungen zur Freisetzung und zum Transport der Radionuklide durch Variation der Modellparameter berücksichtigt.

Weitergehende Ansätze sowohl in der Entwicklung als auch in der Modellierung sind in Bearbeitung.

- **Vorgehen bei der Entwicklung von Szenarien / Eintrittswahrscheinlichkeiten**

- Die Szenarien werden basierend auf der FEP-Analyse entwickelt
- Referenzszenario: Keine Freisetzung in die Biosphäre
- Sensitivitäts- und „what if“ Analysen (in großem Umfang)
- Neuere Szenarientwicklungen berücksichtigen die Evolution und die daraus resultierenden Szenarien

- **Vorgehen bei der Behandlung der Individual- oder Kollektivbelastung (Zeit, Ort, jährliche oder Lebenszeitbelastung)**

Vgl. Regelwerk

POSIVA hat mehrere Biosphären-Ansätze mit unterschiedlich definierten kritischen Gruppen verwendet und hinsichtlich bestehender Unsicherheiten diskutiert.

- **Umgang mit risk dilution**

Vgl. Regelwerk

Zeitraumen

- Vgl. Regelwerk
- Untersuchte Zeitperioden (Normalentwicklung):
 - Bis 100 Jahre
 - 100 bis 10 000 Jahre
 - 100 000 bis 1 000 000 Jahre
 - Jenseits 1 000 000 Jahre

5.3 Frankreich

5.3.1 Sicherheitsberichte und Peer Reviews

- Dossier 2001 Argile /AND 01a, b/
- The French R&D Programme on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste. An International Peer Review of the "Dossier 2001 Argile" /HOO 03/
- Dossier 2005 Argile /AND 05/
- Disposal of High-Level and Long-Lived Radioactive Waste in France. An International Peer Review of the "Dossier 2005 Argile" concerning Disposal in the Callovo-Oxfordian Formation /HOO 06/

5.3.2 Auslegung und Behandlung in den Sicherheitsberichten

- **Calculation endpoint:**
jährliche Dosis (Dossier 2001),
außerdem:
prozentualer Anteil der zurückgehaltenen Radionuklide in verschiedenen Komponenten (Dossier 2001, Dossier 2005),
molare Ströme an verschiedenen Komponentenübergängen (Dossier 2001, Dossier 2005)
chemotoxische Belastungen (nur Dossier 2005): Konzentrationen, bedingte Individualrisiken (stochastische Effekte – Krebs) und „Quotients de danger“ (Schwellwerteffekte – Nicht-Krebs-Effekte)
- **Limit / target / constraint:**
Regelwerk: bis 10 000 a Grenz- dann Referenzwert

Vorgehen bei Ermittlung des endpoints

- **Rechenvorschrift:**
keine Vorgabe
- **Probabilistik vs. Deterministik**
Deterministische Vorgehensweise. Probabilistische Methoden geplant, aber noch nicht umgesetzt.

- **Umgang mit Unsicherheiten**

Darstellung nur für Dossier 2005, da Methodik im Dossier 2001 noch unausgereift: In einer qualitativen Sicherheitsanalyse werden Unsicherheiten identifiziert und im Hinblick auf ihre Bedeutung für die Sicherheitsfunktionen über ihre Behandlung entschieden:

- neuer Rechenfall im Rahmen bestehender Szenarien (Normal- oder Alternativentwicklung): von besonderer Bedeutung für die Behandlung von Unsicherheiten in der quantitativen Sicherheitsanalyse → (deterministische) Sensitivitätsanalyse; Parameterwerte und Annahmen: Unterscheidung nach “phenomenological”, “conservative”, “pessimistic”
- neues Alternativ-Szenario
- „Abfangen“ durch Endlagerauslegung
- Behandlung im Forschungsprogramm

- **Vorgehen bei der Entwicklung von Szenarien / Eintrittswahrscheinlichkeiten**

Dossier 2005: keine „klassische“ Szenarienanalyse. Die Szenarien wurden vom Regelwerk ausgehend und im Hinblick auf die Sicherheitsfunktionen definiert; Eintrittswahrscheinlichkeiten wurden nicht abgeleitet. Für jede Haupt-Sicherheitsfunktion wurde ein Alternativ-Szenario, bei dem diese Funktion beeinträchtigt ist, abgeleitet. Darüber hinaus ein Szenario, das alle Funktionen betrifft:

- “limiting water circulation“ → seal failure scenario
- “limiting the release of radionuclides and immobilising them in the repository” → failure of thermal waste containers
- “delay and attenuate radionuclide migration” → intrusive borehole
- generalised failure of all safety functions → severely degraded evolution

- **Vorgehen bei der Behandlung der Individual- oder Kollektivbelastung (Zeit, Ort, jährliche oder Lebenszeitbelastung)**

Konzept der kritischen Gruppe. Standort: Ort mit größter Belastung. Ernährungsgewohnheiten und Lebensstil entsprechend heutiger Erfahrungen, mögliche Klimaänderungen werden in die Betrachtung einbezogen. Sicherheitsreserve durch Annahme einer weitgehenden Selbstversorgung.

- **Umgang mit risk dilution:**
Keine Thematisierung von risk dilution.
- **Zeitraumen:**
Berechnungszeiträume 10^6 Jahre

5.4 Kanada

5.4.1 Sicherheitsberichte und Peer Reviews

- AECL: Environmental Impact Statement on the Concept for Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste /AECL 94a/ auf der regulatorischen Basis von /AECB 86/
- AECL: The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: Postclosure Assessment of a Reference System /AECL 94b/ auf der regulatorischen Basis von /AECB 86/
- OPG: Third Case Study – Postclosure Safety Assessment /OPG 04a/
- OPG: Evolution of a Canadian Deep Geologic Repository: Base Scenario /OPG 04b/
- OPG: Evolution of a Canadian Deep Geologic Repository: Defective Container Scenario /OPG 04c/

/OPG 04a-c/ beziehen sich nur auf das Policy Statement /CNSC 04/, das zur Zeit der Erstellung von /OPG 04a-c/ noch im Entwurf vorlag. Da in diesem Entwurf keine quantitativen Sicherheitskriterien angegeben waren, wurden die Empfehlungen der ICRP 81 zugrunde gelegt (vgl. 5.5.2.2)

5.4.2 Auslegung und Behandlung in den Sicherheitsberichten

5.4.2.1 /AECL 94a, b/

Calculation endpoint

Risiko entsprechend /AECB 86/

Limit / target / constraint

entfällt

Vorgehen bei Ermittlung des endpoints

- **Rechenvorschrift**
entsprechend /AECB 86/

- **Probabilistik vs. Deterministik**

Disaggregierter Ansatz – verschiedene Methoden für verschiedene Szenarien. Die aus diesen Szenarien resultierenden Konsequenzen (Dosen) für verschiedene kritische Gruppen wurden separat ermittelt und zur Bestimmung des Gesamtrisikos mit dem Risikokonversionsfaktor und den geschätzten Eintrittswahrscheinlichkeiten multipliziert und summiert:

für Normalentwicklung beide Ansätze komplementär:

Parameterunsicherheiten wurden mittels einer probabilistischen Unsicherheitsanalyse berücksichtigt. Die Verteilungen für die Parameter wurden mittels formalisierter Verfahren zur Berücksichtigung von Expertenmeinungen ermittelt. Eine explizite Berücksichtigung der Unsicherheit zeitabhängiger Prozesse erfolgte nicht (Ausnahme: Behälterstandzeiten). Die Ergebnisse wurden für die deterministische Analyse (mit Medianwerten für die Parameter) als zeitabhängige Dosisentwicklung dargestellt. In einer deterministischen Sensitivitätsanalyse wurde der Einfluss von Parameterunsicherheiten demonstriert. Die Ergebnisse der probabilistischen Analyse wurden als Kurvenscharen, Kurven für das arithmetische Mittel und sein 95 %-Konfidenzintervall sowie Histogramme für die maximale Freisetzung dargestellt. Die Argumentation bezüglich einer Einhaltung des einem Risiko von $10^{-6}/a$ entsprechenden Dosisgrenzwerts von $5 \cdot 10^{-5}$ Sv/a berücksichtigt sowohl verteilungsunabhängige Toleranzintervalle als auch die Ergebnisse separater worst-case-Simulationen.

Szenario „open boreholes“: deterministisch-argumentativ:

Es wurde zunächst mit numerischen Analysen gezeigt, dass offen gebliebene Bohrlöcher in einer Entfernung von mehr als 30 m vom Endlager nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die berechnete Dosis haben. Es wird anschließend argumentiert, dass offen bleibende Bohrlöcher mit einer geringeren Entfernung zum Endlager durch Qualitätssicherungsmaßnahmen praktisch auszuschließen sind und das Szenario somit keinen wesentlichen Beitrag zum Gesamtrisiko liefert. Für die inadvertent human intrusion scenarios wird zunächst deren Eintrittswahrscheinlichkeit geschätzt ($< 5 \cdot 10^{-6}$ für ein solches Ereignis in 10 000 Jahren, $< 25 \cdot 10^{-12}$ für zwei unabhängige derartige Ereignisse). "We assume, therefore, that there is no need to consider the occurrence of two or more such events. We have determined that a practical approach to evaluate a low-probability scenario is to treat it separately from high-probability scenarios. Thus we not included the factor for inadvertent intrusion in the SYVAC scenarios, and we do not estimate impacts for human intrusion using the system model in SYVAC3-CC3. (If we were to in-

clude in SYVAC3-CC3 an event whose probability of occurrence is 10^{-6} , we would need to perform more than 3 million randomly sampled simulations to be confident (at the 95 % level) that the event would have been selected in at least one simulation)"

- **Umgang mit Unsicherheiten**

Sensitivitätsanalysen, vertrauensbildende Maßnahmen, Unsicherheitsanalyse wie oben beschrieben

- **Vorgehen bei der Entwicklung von Szenarien / Eintrittswahrscheinlichkeiten**

s. oben

- **Vorgehen bei der Behandlung der Individual- oder Kollektivbelastung (Zeit, Ort, jährliche oder Lebenszeitbelastung)**

entsprechend /AECB 86/

- **Umgang mit risk dilution**

Keine Thematisierung von risk dilution.

Zeitraumen

Rechnung über 10 000 Jahre. Für alle drei Szenariengruppen werden Zeiträume diskutiert, die über den Berechnungszeitraum von 10 000 Jahren hinausgehen. Diese Diskussion stützt sich im Wesentlichen auf die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen und kommt zu dem Schluss, dass im betrachteten Zeitraum keine plötzlichen und dramatischen Zuwächse der Konsequenz zu erwarten sind.

5.4.2.2 /OPG 04a-c/

Calculation endpoint

„Historically, the Canadian regulatory document R-104 (AECB 1987) provided quantitative criteria for safety assessment of a deep geologic repository. However, Canadian regulations related to nuclear waste disposal are currently being revised, and R-104 has been withdrawn. A new draft policy document P-290 (CNSC 2003) has been issued by the Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC). The Third Case Study is consistent with this draft CNSC policy statement. However, this policy does not provide quantitative safety criteria.

For the Third Case Study, we compare calculated dose rates to the recommendations of the International Committee on Radiation Protection, ICRP 81 (ICRP 2000), as well

as to the average Canadian natural background dose rate. Complementary indicators of safety are also derived from natural background data.

The key quantitative recommendations made in ICRP 81 are as follows:

- Exposure from natural processes and inadvertent human intrusion should be considered.
- For natural processes, assessed doses should be compared with a doses constraint to a member of the public of 3×10^{-4} Sv/a.
- For human intrusion, intervention (e.g., modification of repository design) should be made to reduce the probability of human intrusion or to limits its consequences where intrusion could lead to sufficiently high doses to those living around the site. This intervention is not likely to be justifiable for an annual dose of below 0.01 Sv/a, while it is almost always justifiable for an annual dose above 0.01 Sv/a.

With respect to natural background, we consider the following indicators:

- the Canadian average background dose rate to humans from natural sources (0.0017 Sv/a, Grasty and LaMarre 2004),
- the natural background concentration of radionuclides in Canadian surface waters, and
- the natural flux of radionuclides from the geosphere to the surface biosphere.“

Limit / target / constraint

s. oben

Vorgehen bei Ermittlung des endpoints

- **Rechenvorschrift**

ICRP 60 (auch Dosis-Risiko-Konversion wird zitiert, diese wird später nur für HI-Szenarien benutzt)

- **Probabilistik vs. Deterministik**

s. oben

- **Umgang mit Unsicherheiten**

Anspruch: „best-estimate (realistic)“, aber Probabilistik für einige Parameter oder Verwendung von Konservatismen für unsichere Parameter (letzteres auch in screening, „what-if“ und Sensitivitätsstudien); realistische oder konservative Modelle, geostatistischer Ansatz (fracture network model), keine Zeitabhängigkeit der Parameter, aber Probabilistik betrachtet über Analysezeitraum mögliche Wertebe-

reiche

Software Quality Assurance

defective container scenario: deterministische best-estimate und what-if Studien. Probabilistische Unsicherheits (SRS)- und Sensitivitäts (FLHS)-Analysen mit zwei teilweise diversitären Modellen, Betrachtung arithmetisches Mittel und 95. Perzentile, Darstellung auch über CCDF's, „High-risk re-analysis“ Verwendung weiterer Sicherheitsindikatoren (aus SPIN, s. oben)

- **Vorgehen bei der Entwicklung von Szenarien / Eintrittswahrscheinlichkeiten**

Keine volle Szenarienanalyse, sondern Basisszenario und zwei weitere festgelegte Szenarien. Für das Basisszenario erfolgen Beschreibungen des Prozessverständnisses (u.a. auf der Basis von Prozessmodellen) sowie eine Diskussion der Unsicherheiten, aber keine Freisetzungsrechnungen. Diese werden nur für das „defective container scenario“ vorgenommen. Allerdings erscheint dieses Szenario eher einer erwarteten Entwicklung zu entsprechen als das sogenannte Base Szenario: Die Wahrscheinlichkeit für einen frühen Behälterdefekt liegt bei 2×10^{-4} pro Behälter, mit einem Wertebereich von $[10^{-4} \dots 10^{-3}]$ pro Behälter. Damit werden vermutlich etwa 2 der 112 000 einzulagernden Behälter von Anfang an defekt sein.

Sonderfall HI: Hand-Abschätzungen für Konsequenzen (aus früheren Studien – sowohl für intruder als auch für Anwohner) und dubiose Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit (Opferperspektive) führt zu niedrigem Risiko. Bei der Abschätzung wird deutlich vom radioaktiven Zerfall Kredit genommen.

- **Vorgehen bei der Behandlung der Individual- oder Kollektivbelastung (Zeit, Ort, jährliche oder Lebenszeitbelastung)**

Lokale Biosphäre, lebenslang anwesender „self-sufficient farmer“ (überschätzt Konsequenzen, die aus gegenwärtiger Verhaltensweise kämen)

- **Umgang mit risk dilution**

Keine Thematisierung von risk dilution.

Zeitraumen

1 Million Jahre für Analyserechnungen (mit integralem Vergleich der Aktivität des Inventars mit der von Uranerz, wie es im kanadischen Schild auftritt, begründet)

5.5 Schweden

5.5.1 Sicherheitsberichte und Peer Reviews

- SR-Can Interim report /SKB 04/, weiterhin Berücksichtigung des
- SR-Can Planning report /SKB 03/ und von
- SR-97 /SKB 99/ sowie des
- International Peer Review des SR-Can Interim report /SAG 04/

5.5.2 Auslegung und Behandlung in den Sicherheitsberichten

Calculation endpoint

Vgl. Regelwerk

Limit / target / constraint

Vgl. Regelwerk

Vorgehen bei Ermittlung des endpoints

- **Rechenvorschrift**
peak of the means (besser interpretierbar)
- **Probabilistik vs. Deterministik**
Each scenario / variant may be evaluated probabilistically. Probabilistische Sensitivitätsanalysen
- **Umgang mit Unsicherheiten**
System uncertainty concerns completeness issues, handled through the proper management of FEPs in the FEP database.
Conceptual uncertainty For each process, the knowledge base, including remaining uncertainties, is described and, based on that information, a handling of the process in the safety assessment is established.
Data uncertainty (includes correlations between data, the distinction between uncertainty due to lack of knowledge (epistemic uncertainty) and due to natural variability (aleatory uncertainty) and situations where conceptual uncertainty is treated through a widened range of input data). Conceptual uncertainty and data uncertainty are to some extent intertwined. Also, there are several conceivable strategies for deriving input data. One possibility is to strive for pessimistic data in

order to obtain an upper bound on consequences in compliance calculations, another option is the full implementation of a probabilistic assessment requiring input data in the form of probability distributions. Procedure, takes the form of a protocol to be used for all relevant data for the safety assessment. Flexible so that anything from a well-motivated estimate of a single data value to a full expert elicitation of probability distributions can be handled

The *selection of scenarios* is a task of subjective nature, meaning that it is difficult to propose a method that would guarantee the correct handling of all details of scenario selection. However, several measures will be taken to build confidence in the selected set of scenarios:

- A structured and logical approach to the scenario selection, see further chapter 8.
- The use of function indicators in order to focus the selection on safety relevant issues, see chapter 6.
- The use of bounding calculation cases to explore the robustness of the system to the effects of alternative ways of selecting scenarios, including unrealistic scenarios that can put an upper bound on possible consequences.
- A check that all FEPs have been properly handled in the assessment, carried out after the analysis of repository evolution for all scenarios, and the possibility of complementing the scenario selection as a result of that check.
- The use of independent reviews.

Each scenario / variant may be evaluated probabilistically

Variant: probabilistic cases where alternative assumptions to those in the base case are made. In general, these cases represent alternative formulations of the base case that are of relevance for a compliance calculation. The two first variations concern general methodological issues in probabilistic calculations, namely the effects of input parameter correlations and of the form of selected input distributions. Thereafter, two cases are presented that elucidate conceptual uncertainties regarding the fuel dissolution and the internal evolution of a failed canister. Finally, a case exploring pessimistically neglected co-precipitation effects is set up. All cases are calculated probabilistically in 5,000 realisations, with all data except those specific to the variant case as in the base case. Thereby, the effects illustrated in the variant cases are evaluated in the overall context of data uncertainties.

More drastic alternative assumptions: so called “what if” cases, that are not

based on uncertainties in the underpinnings of the base case, but are rather formulated to understand the roles of the different parts of the system.

- **Vorgehen bei der Entwicklung von Szenarien / Eintrittswahrscheinlichkeiten**

Scenarios and variants that are meant to capture the broad features of a number of representative possible future exposure situations – reasonable coverage. Conditional risk for each, then weighed together

International peer review:

„*Strategy for Scenario Analysis*

SSI's regulation (SSI FS 1998:1) requires projections of individual risk to be made as the calculation endpoint of the safety assessment, and implicitly requires consideration of the likelihood of occurrence of scenarios. By contrast, the SKI regulation (SKIFS 2002:1) calls for the evaluation of scenarios in three categories: main scenario, less probable scenarios and residual (other) scenarios. We recognise that addressing both sets of requirements in a single assessment is a challenge. However, we understand that SSI is in the process of developing further guidance on how it expects safety assessment calculations to be structured and presented, and hope that SSI's work may ease the problems of addressing two different sets of regulations.

The assignment of likelihood of occurrence to scenarios is widely recognised to be a difficult task. During the review meeting, it became evident that SKB is striving to avoid this problem as far as possible by incorporating all potential evolutions associated with the risk calculation within a main scenario. Hence, all uncertainties regarding the initial system state and its evolution are represented within the main scenario, either as discrete and mutually exclusive variants of that scenario (e.g. representing different climate assumptions, different design variants or different hydrogeological conceptual models), or through probabilistic parameter variation.

The calculated conditional risks associated with each variant of the main scenario are then combined in order to demonstrate compliance with the SSI's risk standard. The SR-Can report calls this process "risk summation". However, it is not obvious from the Main Report how this summation will be carried out in practice and the issue was only partially clarified during the hearings with SKB. In fact, the results from each variant are not summed at all; rather, for the purposes of compliance assessment SKB seems to be considering the variant that yields the highest calculated conditional risk at any given point during the assessment period. In

our opinion, therefore, it is potentially misleading to use the term „aggregation“ or „summation“.

SKI regulations require consideration of less probable scenarios for the analysis of uncertainties that are not included in the main scenario. In principle, less probable scenarios should be included within the risk summation, in order that their contribution to overall risk can be taken into account for comparison with SSI's risk standard. However, in SKB's analysis, the only situations currently identified as falling into this category are those associated with future human actions that may damage the integrity of the repository system. Since future human actions are explicitly excluded from the risk integration required by SSI (SSI, 1999), no less probable scenarios are included in SKB's risk summation; however, the regulations do require that the potential consequences of intrusion be evaluated, in order to gauge the robustness of the disposal system to such disturbances.

Residual scenarios are primarily "what if" calculations exploring the impact of barrier degradation. However, the residual scenarios also include human intrusion exposure scenarios. By definition, none of these scenarios are included in the risk calculation.

Overall, the IRT considers that SKB's strategy for scenario development, selection and evaluation is not clear from the current description of the safety assessment methodology, and recommends a clearer, more systematic explanation and presentation.

A major part of the difficulty appears to stem from a lack of clarity in the language being used to describe the basis for scenario selection, with confusion over terms such as "risk summation", "scenario variants" and "calculation cases". In addition, SKB's description of a scenario as being "*defined by specifying an initial state of the engineered barrier system, an initial state (a conceptual interpretation) of the site and prescriptions for the handling of internal processes and external influences in the analysis of the scenario*" suggests the possibility that there may be a mixing of scenario and conceptual uncertainties."

- **Vorgehen bei der Behandlung der Individual- oder Kollektivbelastung (Zeit, Ort, jährliche oder Lebenszeitbelastung)**

There is a choice between calculating an average dose to individuals in a regional group on the one hand and to highly exposed individuals within that larger group on the other, and the risk criteria to be applied in the two cases are $10^{-6}/\text{yr}$ and $10^{-5}/\text{yr}$, respectively. It is argued that the larger, regional group should utilise an

area of the order of many square kilometres. Considering that a well or a mire used for agriculture at a particular location at the Forsmark site can reasonably be used for only up to a few hundred years during a temperate period and that such a well or mire can only support a very limited number of persons, see further Appendix C, it seems reasonable to use the higher risk-limit of $10^{-5}/\text{yr}$ ($140 \mu\text{Sv}/\text{yr}$) in these cases. As mentioned, assessing compliance is not a concern in this Interim report. It is however important to clarify the principles for the use of the two risk Klärungsbedarf angemahnt (vor Erstellung /SSI 05/)

- **Umgang mit risk dilution**

Present peak of the means, risk dilution ist inhärent im Risikokriterium enthalten. Ähnliches Phänomen bei Biosphäre wird durch diesbezügliche konservative Annahmen abgefangen. Außerdem Vorsicht bei Verbreiterung der Wahl von Verteilungsfunktionen (auch wenn diese gegen pessimistische Seite erfolgt), disaggregierte Diskussion der Ergebnisse, eventuell zusätzliche Darstellung mean of the peaks.

The mean of the peaks is $0.096 \mu\text{Sv}/\text{yr}$ ($0.2 \mu\text{Sv}/\text{yr}$), i.e. a factor of less than 2 higher than the peak of the mean dose. It is, therefore, concluded that for this input data set, risk dilution effects are small. This is largely due to the fact that once a canister has failed, releases will continue essentially undiminished for a long period of time, so that similar peak doses are obtained irrespective of the canister failure time. The dispersive properties of the system and the fuel dissolution that causes releases for millions of years after failure, thus limit this type of risk dilution effects.

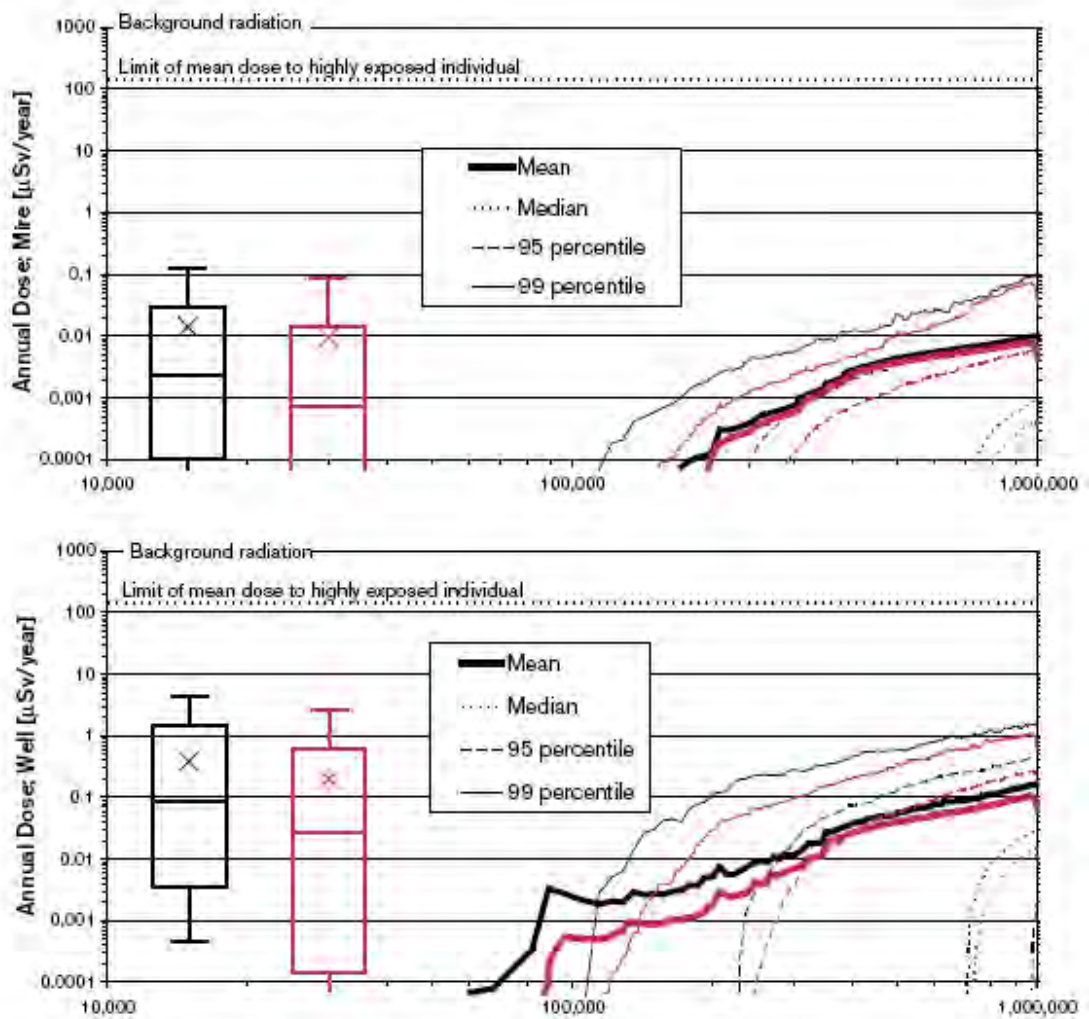


Figure 12-3. The results of the base case probabilistic calculation for mire (upper) and well recipients. Red curves are results obtained with the numerical model, black curves are analytical results. The box-and-whisker plots to the left show the 99, 95, 50, 5 and 1 percentiles of the peak dose distributions; the crosses are the mean values from these distributions.

Zeitraumen

Klärungsbedarf angemahnt (vor Erstellung /SSI 05/)

5.6 Schweiz

5.6.1 Sicherheitsberichte und Peer Reviews

- NAGRA: Project Opalinus Clay - Safety Report (Entsorgungsnachweis) /NAG 02/
- Die Sicherheit der geologischen Tiefenlagerung von BE, HAA und LMA in der Schweiz - Eine internationale Expertenprüfung der radiologischen Langzeitsicherheitsanalyse der Tiefenlagerung im Opalinuston des Zürcher Weinlandes /NEA 04/

5.6.2 Auslegung und Behandlung in den Sicherheitsberichten

Calculation endpoint

Vgl. Regelwerk

Limit / target / constraint

Vgl. Regelwerk

Vorgehen bei Ermittlung des endpoints

- **Rechenvorschrift**

Vgl. Regelwerk

- **Probabilistik vs. Deterministik**

Es wurden sowohl deterministische als auch probabilistische Sensitivitätsanalysen durchgeführt.

Um das Systemverhalten zu bewerten, wurden verschiedene und komplementäre Ansätze verwendet. Einerseits wurden deterministische Analysen durchgeführt, um ein breites Spektrum an Fällen abzudecken, andererseits wurden probabilistische Methoden verwendet, um systematisch die Folgen von verschiedenen Parametervariationen zu erfassen, die in den Bereich der Unsicherheiten fallen.

- **Umgang mit Unsicherheiten**

In den Sicherheitsanalysen werden folgende Unsicherheiten berücksichtigt:

- Szenarienunsicherheiten durch Variation der FEPs
- Unsicherheiten der konzeptualen Modelle durch Alternativen
- Parameterunsicherheiten

Darüber hinaus wird die Ungewissheit der Vollständigkeit, die auf der Möglichkeit beruht, dass einige wichtige FEPs hätten übersehen werden können, überprüft.

Die Unsicherheiten in der Behandlung der Biosphäre werden durch stilisierte Modellannahmen abgehandelt.

Zum Test der Robustheit des Systems und im Hinblick auf die Parameterunsicherheiten wird eine begrenzte Anzahl von „what if“ Parametern in Ansatz gebracht. (Hierzu empfiehlt das IRT, die Aufstellung von klareren Kriterien.)

Das IRT kommt zum Schluss, dass wegen der sehr günstigen Eigenschaften des Opalinustons eine große Bandbreite von Ungewissheiten im Verhalten der technischen Barrieren und der Abfallmatrix toleriert werden kann, ohne damit die Sicherheit eines Tiefenlagers im Opalinuston in Frage zu stellen. Gleichwohl empfiehlt das IRT der Nagra, an den wichtigsten Eigenschaften eines robusten Systems von technischen Barrieren, wie es gegenwärtig vorgeschlagen wird, festzuhalten und ihre Arbeiten zur Verringerung von Ungewissheiten fortzuführen.

- **Vorgehen bei der Entwicklung von Szenarien / Eintrittswahrscheinlichkeiten**
 - Szenarientwicklung aus den FEPs
 - Bildung von Szenarienklassen
 - Referenzszenario (langsamer advektiver Transport durch eine dichte Tonbarriere) und Varianten
 - Alternativszenarien (weniger wahrscheinlich, z. B. ausgelöst durch menschliche Tätigkeiten)
 - „What if“ Szenarien
 - Unbeabsichtigtes menschliches Eindringen (Ermittlung der Dosis als Konsequenz)
 - Der Referenzfall basiert auf der erwarteten Entwicklung, derzeit präferierten Hypothesen, der Referenzauslegung der konzeptuellen Modelle (Referenzmodell und stilisierte Modelle) und folgenden prinzipiellen Phänomenen:
 - Radioaktiver Zerfall
 - Zeitraum des vollständigen Einschusses der Brennelemente und des hochaktiven Abfalls im Behälter
 - Einschuss in den Abfallmatrizen
 - Geochemische Immobilisierung und Rückhaltung der freigesetzten Radionuklide durch die Abfallmatrizen

- Begrenzung der Mobilität der freigesetzten Radionuklide beim Transport durch die Tonbarrieren
 - Verdünnung durch regionale Grundwasserleiter und Verminderung der Freisetzung in der Biosphäre
- **Vorgehen bei der Behandlung der Individual- oder Kollektivbelastung (Zeit, Ort, jährliche oder Lebenszeitbelastung)**
 - Vgl. Regelwerk
 - (s. ebenso ICRP 81)
- **Umgang mit risk dilution**
 - Vgl. Regelwerk

Zeitraumen

Mehrere Millionen Jahre

5.7 USA

Yucca Mountain

5.7.1 Sicherheitsberichte und Peer Reviews

- Total System Performance Assessment for the Site Recommendation (TSPA-SR) /DOE 00/
- Total System Performance Assessment-License Application (TSPA-LA) Methods and Approach /DOE 03/
- An International Peer Review of the Yucca Mountain Project TSPA-SR /NEA 02/

5.7.2 Auslegung und Behandlung in den Sicherheitsberichten

Wie unter 5.1.1 ausgeführt, werden die Größen

- „Calculation endpoint“ und
- „Limit / target / constraint“ sowie
- das Vorgehen bei Ermittlung des endpoints und die
- Rechenvorschrift in den Standards

im Regelwerk festgelegt.

- **Probabilistik vs. Deterministik**

Der Implementer DOE verwendet in der TSPA für jedes Szenario einen probabilistischen Ansatz und ermittelt den Dosis-Zeitverlauf unter Berücksichtigung der Datenunsicherheiten. Ergebnisse der Analysen sind die Dosis-Zeitverläufe einer jeden Rechnung, der Median, der Mean, sowie die Perzentilen 5 % und 95 %).

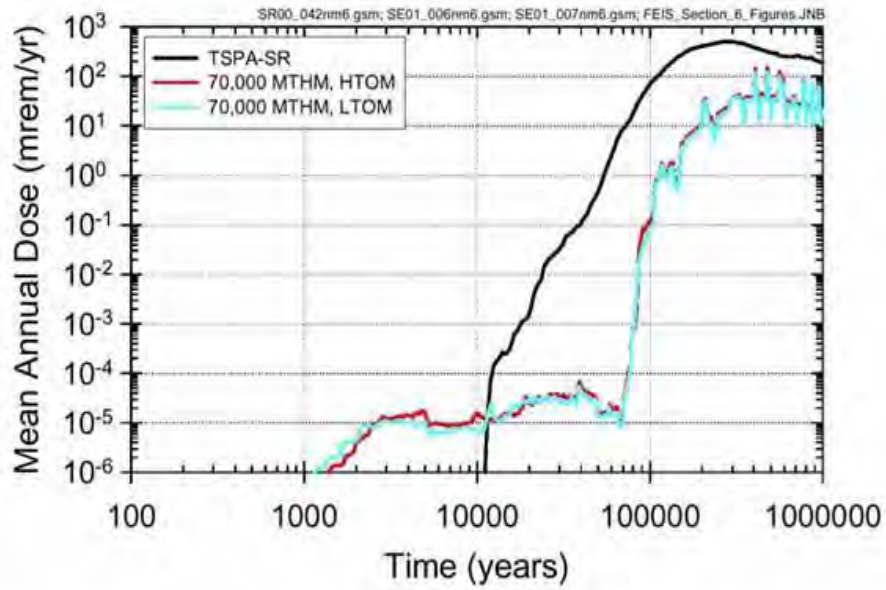


Figure 6-3 Comparison Plot of the Mean Annual Dose versus Time for the TSPA-SR Case, the High Temperature Operating Mode and the LTOM for the 70,000-MTHM Inventory at the RMEI Location Downgradient from a Yucca Mountain Repository

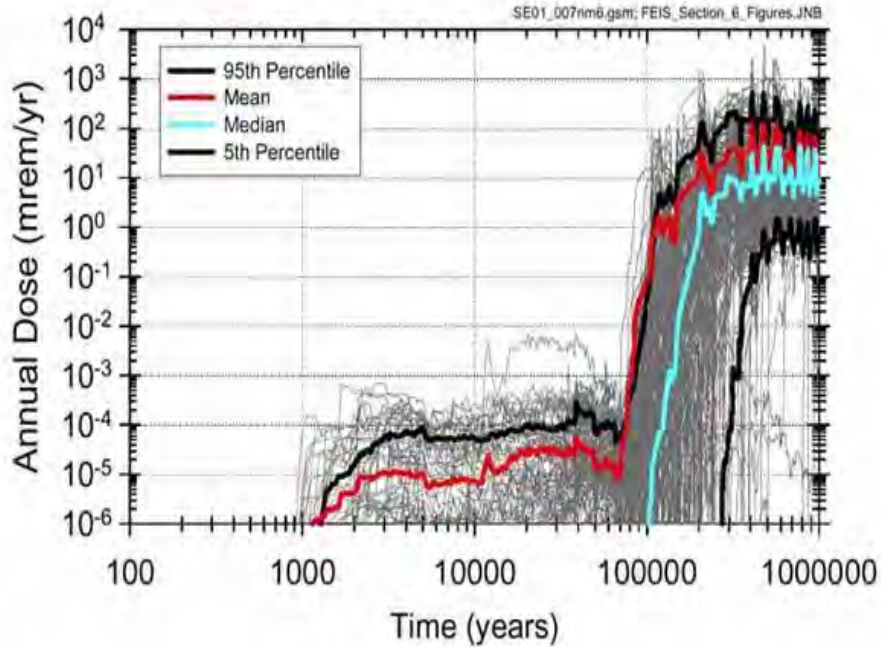
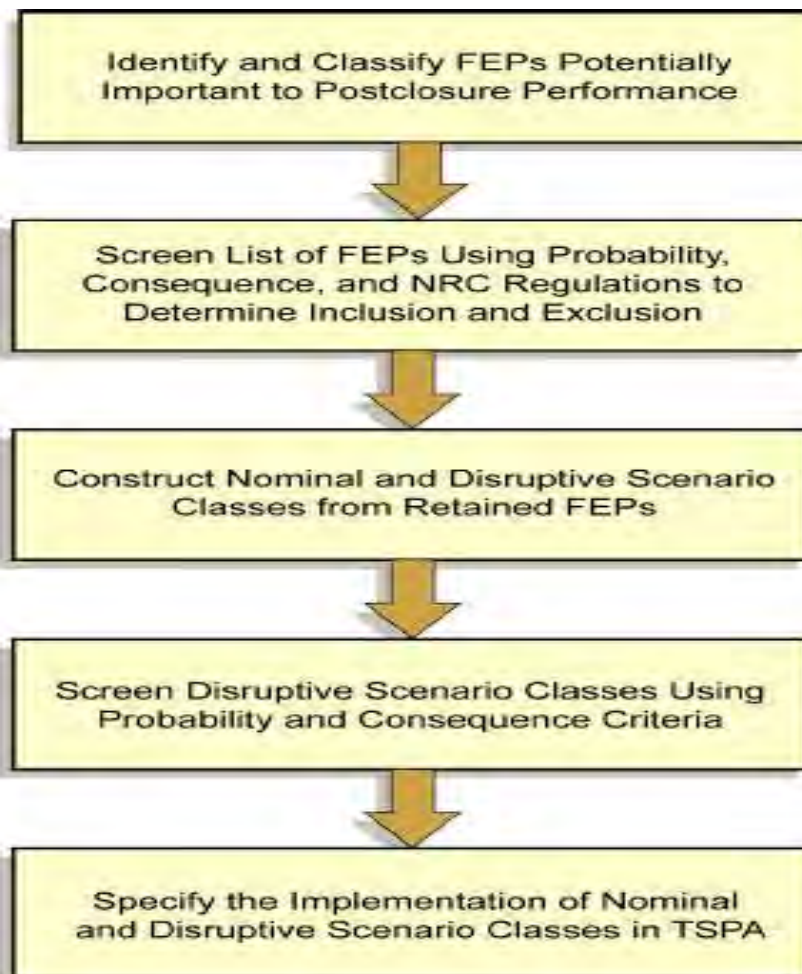


Figure 6-6 Annual Dose versus Time for 300 Probabilistic Simulations of the 70,000-MTHM Inventory for the LTOM at the RMEI Location Downgradient from a Repository. The Figure Displays the Results for Each Simulation and the 5th and 95th Percentiles, and the Mean and Median of these Simulations.

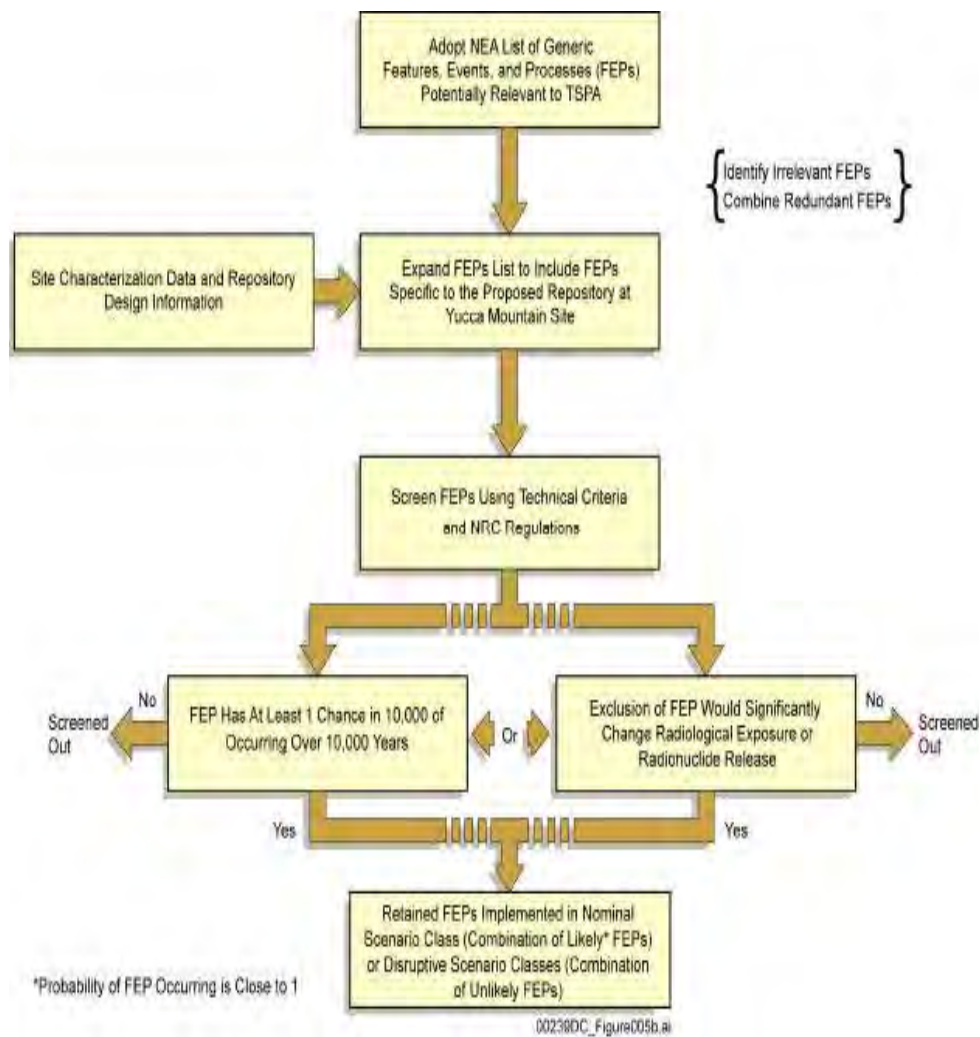
- **Umgang mit Unsicherheiten**
 - probabilistische Behandlung von Datenunsicherheiten
 - die Initiierung von natürlichen Ereignissen sowie die Location z. B. vulkanischer Aktivitäten werden wie Datenunsicherheiten behandelt

- **Vorgehen bei der Entwicklung von Szenarien / Eintrittswahrscheinlichkeiten**
(siehe Figures 6-3 und 6-6 /DOE 03/)
 - FEP Liste und Screening der FEP
 - Verwerfen der FEP mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit $< 10^{-6}$
 - Bildung von Szenarienklassen:
 - nominales (undisturbed) Szenario
 - disruptive events -> vulkanische Aktivität, Magmaintrusion, seismische Aktivität
 - Die nominale Szenarienkategorie umfasst die folgenden generellen Prozesse:
 - Unsaturated zone flow
 - Engineered barrier system environment (including near-field thermal, physical, and chemical environments)
 - Waste package and drip shield degradation
 - Waste form degradation
 - Engineered barrier system flow and transport
 - Unsaturated zone transport
 - Saturated zone flow and transport
 - Biosphere
 - Die Szenarienkategorie Magmaintrusion umfasst 2 Modellfälle:
 - vulkanische Eruption im Bereich des Endlagers
 - magmatische Intrusion eines Bereichs des Endlagers



PSWIFT1NRC.125NRC.9/28/98 11

00239DC_Figure006a.a



- **Vorgehen bei der Behandlung der Individual- oder Kollektivbelastung (Zeit, Ort, jährliche oder Lebenszeitbelastung)**

Vgl. Regelwerk

- **Umgang mit risk dilution**

Das OECD/NEA Review Team empfahl der DOE in ihrem Review 2002 den Umgang mit risk dilution intensiver zu behandeln und darzulegen.

Zeitraumen

10.000 Jahre quantitative Bewertung

6 Vergleich der Optionen der „calculation endpoints“ Konzentration, Dosis, Risiko

6.1 Grundsätze der Endlagerung

In Deutschland wird der langzeitige Schutz von Mensch und Umwelt vor den Auswirkungen ionisierender Strahlung radioaktiver Abfälle durch Isolation von der Biosphäre angestrebt. Die Isolation der radioaktiven Abfälle soll durch Endlagerung in tiefen geologischen Formationen erfolgen. Die Hauptlast der Isolation soll durch die Geologie und die technischen Verschlussmaßnahmen der Endlagerzugänge getragen werden.

Im Folgenden wird schwerpunktmäßig die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen an einem Standort mit - im Hinblick auf die Isolation - günstigen geologischen Eigenschaften verfolgt. Konzepte mit Schwergewicht auf technische Barrieren – wie etwa in Schweden – werden hier nicht näher behandelt.

Radioaktive Abfälle

Radioaktive Abfälle können eine Gefährdung für Mensch und Umwelt darstellen. Ihr radiologisches Gefährdungspotenzial und seine zeitliche Entwicklung hängen vom Aktivitätsinventar sowie von der Art und Strahlung, der Radiotoxizität und der Halbwertszeit der in den Abfällen enthaltenen Radionuklide ab. Zum Schutz von Mensch und Umwelt müssen die Abfälle von der Biosphäre so isoliert werden, dass von ihnen keine Gefährdung für Mensch und Umwelt ausgeht. Die erforderliche Isolationszeit bestimmt sich aus der zeitlichen Entwicklung des Gefährdungspotenzials der Radionuklide. Viele Radionuklide zerfallen rasch, so dass sie nicht lange von der Biosphäre isoliert werden müssen. Andere Radionuklide mit einem Gefährdungspotenzial für Mensch und Umwelt haben z. T. sehr lange Halbwertszeiten, was bei entsprechend großem Aktivitätsinventar zu hohen Anforderungen an die Isolation dieser Radionuklide führt.

Endlagerung

Die Aufgabe der Endlagerung wird wie folgt definiert:

Die Endlagerung radioaktiver Abfälle hat

- *den langzeitigen Schutz von Mensch und Umwelt vor den potenziell schädlichen Auswirkungen der eingelagerten radioaktiven Abfälle zu gewährleisten,*
- *Sorge dafür zu tragen, dass zukünftigen Generationen keine unzumutbaren Lasten und Verpflichtungen auferlegt werden, und*
- *Handlungen zu vermeiden, deren Auswirkungen auf zukünftige Generationen größer sind als für die heutige Generation*

Durch die Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen an einem Standort mit einer günstigen geologischen Gesamtsituation werden die Anforderungen an die Isolation der radioaktiven Abfälle für lange Zeiträume erfüllt.

Die Endlagerung verfolgt das Prinzip des Konzentrierens und Isolierens der radioaktiven Abfälle in einer günstigen geologischen Gesamtsituation. Die fundamentale Sicherheitsfunktion bei der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ist die Isolation. Isolation ist hierbei im technischen Sinn nicht mit einer Null-Emission von Radionukliden aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich gleichzusetzen, sondern kann über eine maximal zulässige Freisetzungsrates von Radionukliden definiert werden. Dies bedeutet, dass das Endlagersystem günstige Einschluss-, Rückhalte- und Verzögerungseigenschaften aufweisen muss, um die Isolation zu gewährleisten. Weiter muss das Endlagersystem über eine langfristige Stabilität der günstigen Eigenschaften sowie eine gute Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit der Eigenschaften verfügen.

Zur Isolation von Radionukliden werden Gesteinsbereiche verwendet, die aufgrund ihrer physikalischen und chemischen Beschaffenheit - wie keine oder geringe Durchlässigkeit gegenüber Fluiden und hohe Rückhaltefähigkeit gegenüber Radionukliden - einschlusswirksame Eigenschaften aufweisen. Weitere für die Endlagerung günstige Eigenschaften sind ein ausreichend großer Gebirgsbereich, ein einfacher geologisch-tektonischer Bau, das Fehlen tief reichender Grundwasserleiter mit meteorischem Wasser, geringe rezente Tektonik sowie günstige gebirgsmechanische Eigenschaften der Einlagerungsformation.

Sicherheitskonzept

Basis der Planung und Auslegung eines Endlagers ist ein Sicherheitskonzept, das sich auf die geologischen Standortgegebenheiten und technische Maßnahmen abstützt. Aufgrund Jahrhunderte langer Erfahrungen mit dem Bergbau wird die Endlagerung in einem Bergwerk favorisiert, das eine Erkundung wesentlicher Parameter der geologischen Gesamtsituation von unter Tage und eine auf die Gegebenheiten optimierte Planung und Einlagerung erlaubt. Zur Gewährleistung eines sicheren Betriebes werden geeignete Einlagerungs- und Handhabungstechniken sowie betriebliche Sicherheitsmaßnahmen realisiert. Entscheidend für die Langzeitsicherheit eines Endlagers sind das Isolationspotenzial des Endlagersystems, mit den Sicherheitsfunktionen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs /AKE 02/ sowie der technischen Maßnahmen. Anforderungen an die Abfälle leiten sich aus den Sicherheitsanforderungen an den Betrieb und Nachbetrieb ab. Dem Antragsteller obliegt es, die Endlagerungs- und Einlagerungsbedingungen im Einzelfall festzulegen und diese behördlich genehmigen zu lassen.

Standortauswahl und Langzeitprognose

Die radioaktiven Abfälle müssen an einem geeigneten Standort so von der Biosphäre isoliert werden, dass von ihnen keine Gefährdung für Mensch und Umwelt ausgeht. Dazu werden Standorte mit einer günstigen geologischen Gesamtsituation ausgewiesen, die über einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich mit einem über lange Zeiträume wirksamen Isolationsvermögen verfügen. Diesen Standorten ist gemein, dass sie gut charakterisierbar und ihre Entwicklungsgeschichten über geologische Zeiträume zurückverfolgbar und interpretierbar sind. Das bedeutet, dass sich für einen so ausgewählten Standort die Entwicklungsgeschichte insbesondere für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich über viele Millionen Jahre zurückverfolgen und wissenschaftlich interpretieren lässt. Sind darüber hinaus in diesen Zeiträumen für dieses geologische System keine wesentlichen Veränderungen der sicherheitsrelevanten Merkmale zu verzeichnen, so können wissenschaftlich begründet Prognosen über die möglichen zukünftigen Entwicklungen für Zeiträume in der Größenordnung von einer Million Jahren gemacht werden. Aufgrund zunehmender Unsicherheiten ist für darüber hinaus gehende Zeiträume eine wissenschaftlich begründete geologische Langzeitprognose kaum noch möglich. Analog zu der geologischen Langzeitprognose ist eine

wissenschaftlich begründete Langzeitprognose für technische Maßnahmen über den Zeitraum durchzuführen, für den ihre Wirksamkeit gefordert wird.

Nachweis der Sicherheit

Der Nachweis der Sicherheit des Endlagers während des Betriebs und in der Nachbetriebsphase wird standort- und konzeptspezifisch geführt. Der Langzeitsicherheitsnachweis basiert auf der Abfallcharakterisierung, der Standortcharakterisierung, der geowissenschaftlichen Langzeitprognose, der Charakterisierung und Langzeitprognose der technischen Barrieren sowie auf den Langzeitsicherheitsanalysen. Der Langzeitsicherheitsnachweis wird über einen Zeitraum geführt, für den eine wissenschaftlich fundierte Aussage über die Entwicklung des Endlagersystems getroffen werden kann. Dabei wird den bestehenden Unsicherheiten (Daten-, Modell- und Szenarienunsicherheiten) Rechnung getragen.

Nachweiszeitraum

Der Nachweiszeitraum ist der Zeitraum, für den die Einhaltung der Sicherheitskriterien für die Langzeitsicherheit eines Endlagers nachzuweisen ist. Einerseits nehmen die Radiotoxizität der in das Endlager eingebrachten Radionuklide und damit das Gefährdungspotenzial des Endlagers mit zunehmender Zeit ab. Andererseits werden die Prognosen über die Entwicklung des Endlagersystems mit zunehmender Zeit immer unsicherer; jenseits eines Zeitraums in der Größenordnung von 1 Mio. Jahren ist eine wissenschaftlich begründete Prognose über die geologischen Verhältnisse kaum noch möglich. Daher wird für den Nachweiszeitraum eine Zeitdauer von 1 Mio. Jahren als ausreichend lang angesehen.

Kriterien zur Bewertung der Sicherheit und zur Einhaltung der Schutzziele

Die Schutzziele der Endlagerung unterliegen grundsätzlich keiner zeitlichen Begrenzung. Der Nachweis auf ihre Einhaltung hingegen stößt aufgrund der zu betrachtenden Zeiträume an die Grenze des Erkenntnisvermögens. Während für sorgfältig ausgewählte Standorte wissenschaftlich fundierte Aussagen über das Endlagersystem und seine Entwicklung über einen Zeitraum von ca. 1 Mio. Jahren möglich ist, ist eine fundierte Aussage über die Entwicklung der Biosphäre auf höchstens einige tausend Jahre möglich. Eine Prognose über die Entwicklung des Menschen und der menschlichen

Gesellschaft mit ihren Ansprüchen und Bedürfnissen ist bestenfalls für Zeiträume von 4 bis 6 Generationen möglich.

Vor diesem Dilemma, die Bedürfnisse und Ansprüche, die Akzeptanz von Belastungen und Einschränkungen künftiger Gesellschaften nur über einen vergleichsweise kurzen Zeitraum prognostizieren zu können, ist die Ableitung von Kriterien, die vornehmlich auf einem Individual- und Gesellschaftsschutz heutiger Prägung beruhen und ggf. einer Änderung gesellschaftlicher Anforderungen unterliegen, nicht Ziel führend. Vielmehr müssen ein Konzept und ein Bewertungsmaßstab für die Sicherheit der Endlagerung in der Nachbetriebsphase gefunden werden, die unabhängig von der gesellschaftlichen Entwicklung sind.

Das Konzept der langfristigen Isolierung des radioaktiven Abfalls in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Verbund mit geotechnischen Maßnahmen kann den Anforderungen an die Einhaltung der Schutzziele gerecht werden. Insbesondere kann durch die Isolation die Einhaltung der Anforderungen an die Sicherheit und den Nachweis gewährleistet werden, ohne auf Bewertungsgrößen und Bewertungsmaßstäbe zurückzugreifen, die von der gesellschaftlichen Entwicklung abhängen. Isolation soll wie folgt definiert werden:

Isolation beschreibt im **Allgemeinen** einen Zustand, bei dem der Transport einer Substanz oder von Energie vermindert oder verhindert wird, d.h. der durch Isolierung/Abdichtung mittels isolierender Materialien (Isolatoren) erreichte Zustand. (Vollkommene Isolatoren gibt es nicht.)

Isolation bedeutet **bei der Endlagerung**, den Transport radioaktiver Stoffe in die Biosphäre so zu behindern, dass der Einschluss der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich über lange Zeiträume gewährleistet werden kann. Eine über lange Zeiträume nicht ausschließbare Freisetzung von Radionukliden aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich muss in Menge und Konzentration der Radionuklide, die in die Biosphäre gelangen, soweit begrenzt werden, dass die vorgegebenen Schutzziele eingehalten werden. Die Isolation wird durch die Wirksamkeit des Barrierensystems erreicht.

Bewertungsgrößen zur Quantifizierung des Isolationspotenzials eines Endlagersystems sind somit der Zeitpunkt der Freisetzung aus dem einschlusswirksamen Gebirgs-

bereich und die Freisetzungsrates. Zur Ableitung eines Bewertungsmaßstabes für die freigesetzte Radioaktivität kann die natürliche am Standort vorliegende Radioaktivität aus dem geogenen Hintergrund herangezogen werden. Beispielsweise kann gefordert werden, dass zu keinem Zeitpunkt (innerhalb des Nachweiszeitraumes) die rechnerisch ermittelte freigesetzte Radioaktivität größer sein darf als ein Bruchteil der natürlichen geogenen Radioaktivität. Die Quantifizierung des Bruchteils muss sich an der Geringfügigkeit des Eintrags orientieren und muss vom Regulator festgelegt werden. Der Bezug auf die geogen bedingte Hintergrundstrahlung am Standort hat den Vorteil, dass er über den gesamten Nachweiszeitraum (ca. 1 Mio. Jahre) als konstant angenommen werden kann. Das so gewählte Konzept orientiert sich an geogenen Gegebenheiten, welche heute und in ferner Zukunft die natürlichen radiologischen Standortbedingungen für Mensch und Umwelt liefern, ohne dass die tatsächlichen Entwicklungen der menschlichen Gesellschaft und ihrer Anforderungen oder der Biosphäre über lange Zeiträume abgeleitet werden müssen. Diese Entwicklungen sind zudem nur über vergleichsweise kurze Zeiträume wissenschaftlich begründet möglich. Für dieses Konzept des geogenen Maßstabes können quantitative Kriterien zur Beurteilung des Isolationspotenzials eines Endlagersystems abgeleitet werden.

Der Regulator könnte beispielsweise festlegen:

Ein Endlagersystem ist so auszuwählen, dass bei seiner Normalentwicklung eine Freisetzung von Radionukliden aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich in den ersten 10^4 Jahren nicht zu besorgen ist. Für den Nachweiszeitraum von 10^6 Jahren soll die Freisetzungsrates von Radionukliden klein sein gegenüber den natürlich auftretenden Radionuklidkonzentrationen.

Der endgelagerte radioaktive Abfall beinhaltet auch eine Anzahl von Radionukliden, die in der Natur nicht auftreten. Für diese ist bei Anwendung obigen Kriteriums ein direkter Vergleich mit der natürlichen geogenen Strahlenexposition nicht möglich. Als Vergleichsgröße dieser Gruppe von Radionukliden bietet sich die radiologische Konsequenz in Form von Dosis oder Radiotoxizität an. Der Dosisbeitrag der anthropogen eingetragenen Radionuklide soll klein sein gegenüber der natürlichen Strahlenexposition (z. B. bei einer Dosis aufgrund der Hintergrundstrahlung von 1 bis 2 mSv/a => Dosiskriterium: 0,1 mSv/a). Zu ihrer Berechnung werden Referenz-Biosphären, Referenz-Menschen und/oder Referenz-Biota zugrunde gelegt.

In diesem Konzept wird der Schutz von Mensch und Umwelt durch die Isolation der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich gewährleistet. Die Isolation definiert sich für lange Zeiträume aus dem Einschluss der Radionuklide und für über sehr lange Zeiträume nicht ausschließbare Freisetzungen über die Begrenzung der Freisetzungsrates aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Als gemeinsame Bewertungsgröße für die Standortgegebenheiten und den anthropogenen Eintrag kann neben der Konzentration die Dosis und/oder der Radiotoxizitätsindex für den geogenen Hintergrund herangezogen werden. Bei dieser Vorgehensweise sind die Bewertungsgrößen Konzentration, Dosis und Radiotoxizitätsindex als Indikator für das Isolationsvermögen des Endlagersystems zu werten und nicht als prognostizierte potenzielle Belastungen von Mensch und Umwelt.

6.2 Langzeitsicherheitsanalysen

Da das Endlager in der Nachbetriebsphase einer sicherheitstechnischen Überprüfung nicht unmittelbar zugänglich ist, sind an die Nachweisführung der langfristigen Einhaltung von Schutzzielen, das heißt des Isolationsvermögens des Endlagersystems hohe Anforderungen zu stellen. Ausreichend gesicherte wissenschaftliche Erkenntnisse u. a. über das Verhalten des Endlagersystems, das Verhalten von Teilsystemen (z. B. das Verhalten des Endlagerbergwerkes), den Ablauf spezieller Ereignisse und Prozesse (z. B. Verhalten des Abfalls bei Anwesenheit von Grundwasser oder Lauge) und die Auswirkung unterschiedlicher Standortentwicklungen (z. B. Hebungen, Klimaveränderungen) bilden die Grundlage der Langzeitsicherheitsanalyse. Die Beschreibung der wesentlichen Faktoren, Ereignisse und Prozesse im Endlagersystem führt zur Szenarientwicklung und zu konzeptuellen Modellvorstellungen. Zur analytischen Behandlung der Entwicklung des Endlagersystems müssen die konzeptuellen Modelle in numerische Modelle umgesetzt werden. In der Szenarienanalyse werden die potenziellen natürlichen Entwicklungen des Endlagersystems sowie Entwicklungen aufgrund menschlicher Aktivitäten identifiziert, für welche in der Konsequenzenanalyse die Auswirkungen in den Umweltmedien ermittelt werden.

Ergebnisse der Langzeitsicherheitsanalysen sind u. a.

- die zeitlichen Entwicklungen des Endlagersystems und seiner Sicherheitsfunktionen,

- die räumliche und zeitliche Verteilung von Radionukliden im Endlagersystem,
- Konzentrationsverläufe von Radionukliden im Endlagersystem über die Zeit,
- Entwicklungen von Teilsystemen oder Komponenten,
- Stoffströme im Endlagersystem.

Die Langzeitsicherheitsanalysen müssen den jeweiligen Szenarien-, Daten-, Modellunsicherheiten beim Nachweis der Langzeitsicherheit Rechnung tragen.

6.3 Bewertung der Konsequenzen

Ein primäres Ergebnis der Langzeitsicherheitsanalysen ist die räumliche und zeitliche Konzentrationsverteilung von Radionukliden und Schadstoffen im Modellgebiet. Die Langzeitsicherheitsanalyse liefert eine Information über die Verteilung der Radionuklide in diskreter Form. Mit den Konzentrationen der Radionuklide und Schadstoffe in den Umweltmedien liegen Indikatoren vor, die eine integrale Sicherheitsbewertung des Endlagersystems in seiner Gesamtwirkung erlauben. Der Indikator Konzentration lässt den Vergleich der errechneten Konzentration mit Konzentrationen natürlich vorkommender Radionuklide und Stoffe zu. Damit liegt ein konzeptionell einfacher Indikator vor. Andererseits liefert er keine Information über das Maß der Auswirkungen auf die Lebensformen. Er lässt auch keinen direkten Vergleich von Konzentrationen von Radionukliden und Stoffen zu, die in der Natur nicht auftreten. Als Bewertungsmaßstäbe für den Indikator Konzentration sind globale und regionale Konzentrationen von Elementen in Gesteinen und im Grundwasser heranzuziehen /BAL 01/.

Nationale und internationale Projekte befassen sich mit dem Wesen der Langzeitsicherheitsanalyse und ihren Aussagen im Hinblick auf die Langzeitsicherheit von Endlagern. Es ist common sense, dass Langzeitsicherheitsanalysen keine Prognosen der zu erwartenden Entwicklungen und Belastungen darstellen. Die Ergebnisse der Analysen sind vielmehr als Indikatoren der Sicherheit und des Verhaltens des Endlagersystems und seiner Teilsysteme zu werten. Als Beispiel für diese Einordnung sei hier das SPIN Projekt der EU /EUR 02/ zitiert. In diesem Projekt wurden 21 safety indicators und performance indicators identifiziert und auf ihre Wirkung untersucht.

Die Untersuchung zeigt, dass neben den Freisetzungsraten, die Konzentration, die Radiotoxizitätskonzentration in den Biosphärenwässern und die Dosis als Sicherheitsindikatoren herangezogen werden können. Ihnen ist gemein, dass sie eine Aussage über das Gesamtverhalten des Endlagersystems ermöglichen.

6.3.1 Sicherheitsindikatoren als „endpoints“

Indikator: Konzentrationen von Radionukliden und sonstigen Stoffen in den Umweltmedien (Boden, Wasser, Luft)

Mit den errechneten Konzentrationen der Radionuklide und Schadstoffe in den Umweltmedien liegen Indikatoren zur integralen Sicherheitsbewertung des Endlagersystems in seiner Gesamtwirkung vor. Je geringer die Freisetzung von Radionukliden und damit die Konzentrationen in den Umweltmedien umso stärker ist die Isolationswirkung. Der Indikator Konzentration lässt den Vergleich der errechneten Konzentration mit Konzentrationen natürlich vorkommender Radionuklide und Stoffe zu. Er ist als Indikator für das Isolationsvermögen des Endlagersystems zu werten. Bewertungsmaßstäbe für den Indikator Konzentration liefern globale und regionale Konzentrationen von Elementen in Gesteinen und im Grundwasser /BAL 01, MIL 00, IAE 94, 03, 05/. Kriterien für die Bewertungsgröße und den Bewertungsmaßstab sind in Kapitel 6.1 vorgeschlagen. Damit liegt ein konzeptionell einfacher Indikator vor, der unabhängig ist von den einzelnen Schutzziele. Dieser lässt aber keinen direkten Vergleich freigesetzter Radionuklide und Stoffe zu, die in der Natur nicht auftreten.

Zur Entwicklung eines Bewertungsmaßstabes von Radionuklidkonzentrationen in den Umweltmedien aufgrund von Freisetzungen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich kann das Prinzip der „Geringfügigkeit“ der Konzentrationserhöhung genutzt werden. Hierbei ist zu belegen, dass eine geringfügige Konzentrationserhöhung die Konsequenzen für Mensch und Umwelt aus der bereits natürlich vorliegenden Konzentration nur geringfügig verändert. Zur Ableitung von Vergleichsmaßstäben für die aus dem Endlager freigesetzten Radionuklide und Schadstoffe sind die in der Natur, insbesondere in der Geosphäre und im Grundwasser, vorhandenen Radionuklidkonzentrationen und Elementkonzentrationen untersucht worden. Wie die Untersuchungen zeigen, sind die Schwankungsbreiten der mittleren globalen Elementkonzentrationen im Festgestein und die Variationsbreite der Spurenelemente in Grundwässern gering. Als Maß-

tab für die Geringfügigkeit könnten diese Schwankungsbreiten oder ein noch festzulegender Bruchteil der am Standort vorliegenden natürlichen Radionuklidkonzentrationen herangezogen werden. Einschränkend ist dabei, dass die Datenbasis für tiefe Grundwässer lediglich eine Abschätzung erlaubt. An konkreten Standorten hingegen können die Radionuklidkonzentrationen und Elementkonzentrationen in den geologischen Schichten und in den entsprechenden Grundwässern ermittelt werden und als Basis zur Bewertung der Ergebnisse der Modellrechnungen dienen.

Sicherheitsindikator: Dosis

Die Dosis wird in internationalen Regelwerken und Sicherheitsberichten als Indikator für die Sicherheit der Anlage und den Schutz von Mensch und Umwelt in der Nachbetriebsphase eines Endlagers gewertet. Die Ansätze zur Interpretation des Sicherheitsindikators Dosis sind jedoch unterschiedlich.

Fall 1:

Die Dosis als integrale Bewertungsgröße der Auswirkung der Endlagerung in der Biosphäre ist ein direkter Indikator für die Sicherheit des Endlagersystems. Die Bekanntheit und Verständlichkeit des radiologischen Dosisbegriffs sowie seine Nutzung in kerntechnischen Anlagen als sicherheitstechnischer Maßstab sind von Vorteil. Die Dosis ermöglicht den Vergleich der verschiedensten Belastungsarten untereinander und damit auch mit natürlich auftretenden Belastungen. Nachteilig bei der Ermittlung der Dosis sind die schwer ermittelbaren Transferfaktoren. Weiterhin fehlen Maßstäbe zur Bewertung der Auswirkungen auf die Biota und insbesondere der Auswirkungen chemotoxischer Stoffe auf Mensch und Umwelt. Bei letzteren fehlen für die meisten Stoffe auch Vergleichsmaßstäbe in der Natur. Eine weitere Unsicherheit liegt in der unbekanntem Entwicklung der Biosphäre, einschließlich der Entwicklung des Menschen und seiner Lebensgewohnheiten vor dem Hintergrund der langen Nachweiszeiträume. Zur Ermittlung der Dosis müssen die Biosphäre und die menschliche Gesellschaft postuliert werden. Die so ermittelten Konsequenzen stellen somit keine Prognose der zu erwartenden Dosis in ferner Zukunft dar. Sie sind vielmehr eine Bewertungsgröße für eine errechnete potenzielle Auswirkung.

Als radiologisches Schutzziel für die Phase nach Verschluss eines Endlagers wird die Begrenzung der Dosis eines Individuums herangezogen. International und in den je-

weiligen nationalen Regelwerken liegt der Bewertungsmaßstab für die Dosis zwischen 0,1 – 0,3 mSv pro Jahr /BOR 05, ICRP 00/. Diese ist abgeleitet aus der natürlichen Strahlenexposition am Standort (in Deutschland: 1 bis 2 mSv pro Jahr) oder aus der Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition (in Deutschland: 0,3 mSv pro Jahr)

Fall 2:

Ein anderer methodischer Ansatz (Kapitel 6.1) definiert die Dosis als Indikator für das Isolationsvermögen des Endlagersystems und orientiert sich nicht an potenziellen Auswirkungen auf künftig existierende (humane oder nicht humane) Biota, sondern an potenziellen Änderungen von Schadstoffkonzentrationen in den Umweltmedien. Die Dosis wird nicht als künftige radiologische Belastung, sondern als Weg zur Aggregation der berechneten Radionuklidkonzentrationen verstanden, der dann auch die Bewertung von Konzentrationen künstlicher Radionuklide ermöglicht. Als Bewertungsmaßstab für den die Isolation beschreibenden Indikator Dosis könnte die mittlere Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition innerhalb Deutschlands von etwa 0,3 mSv/a gewählt werden. Der von RSK und SSK vorgeschlagene Bewertungsmaßstab von 0,1 mSv/a als Richtwert für die Dosis für wahrscheinliche Entwicklungen des Endlagersystems wird in diesem Konzept als Indikator für das Isolationsvermögen des Endlagersystems verwendet.

Indikator: Radiotoxizitätskonzentration im Biosphärenwasser

Dieser Indikator zielt auf die radiologische Belastung des Menschen durch Ingestion von kontaminiertem Wasser ab. Hierbei wird die instantane Vermischung der freigesetzten Radionuklide in den betrachteten Wasserkörper unterstellt. Biosphärentransporte werden nicht unterstellt. Als Bewertungsmaßstab kann die natürliche Belastung mit Radionukliden und Schadstoffen heutiger Grundwässer sowie deren Schwankungsbreite herangezogen werden. Für lange Zeiträume lassen sich die zu erwartenden natürlichen Konzentrationen von Radionukliden und Schadstoffen im Wasser aus den regionalen und den Standortgegebenheiten sowie der Erosion der Gesteinskörper abschätzen, so dass ein langfristig wirksamer Indikator zur Verfügung steht.

Dieser Indikator stellt eine sicherheitsrelevante Wichtunggröße dar, durch die die Unsicherheiten aus der Prognose der Biosphärenentwicklung umgangen werden können.

Für diesen Ansatz können Referenzwerte zur Beurteilung der Geringfügigkeit von anthropogenen Einträgen abgeleitet werden /EUR 02/, die zur Bewertung der Sicherheit des Endlagers dienen.

Indikator: Risiko

Das Risiko stellt die Verknüpfung zwischen der Wahrscheinlichkeit eines Szenarios und dem Schadensausmaß dar. Mit dem Risiko einer Auswirkung des Endlagersystems steht ein weiterer Indikator zur integralen Bewertung der Sicherheit des Endlagersystems zur Verfügung. Der Sicherheitsindikator Risiko soll den Vergleich von Belastungen aus dem Endlager mit natürlichen und anthropogenen Belastungen auf gleicher Basis ermöglichen. Bewertungsmaßstab ist das heute gesellschaftlich akzeptierte Risiko aus Industrie und Großtechnologie.

Vorteil des Sicherheitsindikators Risiko ist seine Anwendbarkeit zur vergleichenden Bewertung verschiedenster Technologien hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Mensch und Umwelt, da er die Darstellung von Auswirkungen auf einer einheitlichen Basis erlaubt.

Nachteilig auf den Sicherheitsindikator Risiko wirkt sich aus, dass sowohl seine Akzeptanz als auch sein Bewertungsmaßstab von der Entwicklung der Wertorientierung der Gesellschaft und des Einzelnen abhängen. Hinsichtlich des Bewertungsmaßstabes des Sicherheitsindikators Risiko wird international die Prämisse zugrunde gelegt, dass zukünftigen Generationen keine größeren Risiken zugemutet werden dürfen als sie heute von der Gesellschaft akzeptiert werden.

Für Endlager in tiefen geologischen Formationen wird der Bewertungsmaßstab als Grenzwert oder Richtwert formuliert, wie: als Konsequenz einer potenziellen Freisetzung radioaktiver Stoffe aus dem Endlager in die Biosphäre soll ein potenzielles Todesfallrisiko für eine Einzelperson zu keiner Zeit $10^{-5}/a - 10^{-6}/a$ übersteigen /ICRP 00/.

Darüber hinaus erlaubt der Indikator Risiko eine hohe Konsequenz bei niedriger Eintrittswahrscheinlichkeit. Die Tatsache, dass bei einer Multiplikation von Eintrittswahrscheinlichkeit und Konsequenz das eine gegen das andere *linear* aufgewogen wird, ist jedoch nicht unumstritten.

7 Entscheidungshilfen

7.1 Anmerkungen zu den Indikatoren

In der Abfolge der Indikatoren Konzentration (Nuklidströme), Dosis und Risiko erfolgt eine Aggregation von immer komplexer werdenden Analyseergebnissen auf vereinfachende Größen, wie beispielsweise von der Konzentration einer Vielzahl von Radionukliden in den Umweltmedien für ein jeweiliges Szenario auf die Dosis, welche die Auswirkungen der Radionuklidkonzentrationen auf ein Individuum aggregiert (effektive Dosis). Im nächsten Schritt zum Risiko werden die Szenarien, ihre Eintrittswahrscheinlichkeiten und die aus ihrem Ablauf resultierenden Konsequenzen auf die Individuen (effektive Dosen) sowie deren gesundheitliche Auswirkungen zu einer Risikozahl aggregiert.

Vorteil der Aggregation ist die Entwicklung einer vereinfachenden Bewertungsgröße, nachteilig ist jedoch der mit jedem Aggregationsschritt verbundene Verlust an komplexer Information sowie die mit jedem Aggregationsschritt zusätzlich eingeführten Unsicherheiten. So beruht die Bestimmung der effektiven Dosis der Referenzperson auf Hypothesen zur Biosphäre; bei einer Risikoberechnung werden Unsicherheiten hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Szenarien wie auch in Bezug auf die Dosis-Wirkungs-Beziehung eingeführt. Dies führt in den jeweiligen nationalen Regelungen dazu, dass neben den aggregierten Größen auch die Angabe der disaggregierten Elemente der Bewertungsgrößen gefordert wird. Hintergrund dieser Anforderung ist beispielsweise bei der Anwendung des Indikators Risiko, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Schadensausmaß zur Bewertung der Konsequenz bekannt sein müssen.

Im Folgenden werden einige grundsätzliche Überlegungen zu den „calculation endpoints“ Dosis und Risiko angestellt, welche wesentlich für die Entwicklung einer Entscheidung zur Verwendung als Bewertungsgrößen in einem Regelwerk sind.

Beiden Bewertungsgrößen, Dosis und Risiko, ist die Berechnung der Konsequenz „effektive Dosis“ aus den Radionuklidkonzentrationen in den Umweltmedien gemein.

Für jedes zu untersuchende Szenario wird eine Langzeitsicherheitsanalyse durchgeführt, in der die Konzentrationen von Radionukliden, die aus dem Endlager in die Bios-

phäre gelangen, errechnet werden. Als Konsequenz hieraus lässt sich die potenzielle effektive Dosis für ein Individuum berechnen. Für ein sorgfältig geplantes Endlager werden Freisetzungen in die Biosphäre - sowohl für die Normalentwicklung des Endlagersystems als auch für weniger wahrscheinliche Entwicklungen - erst jenseits vieler zehntausender oder hunderttausender von Jahren errechnet. Für diese Zeiträume stehen jedoch keine belastbaren Prognosen der Biosphärenentwicklung (inklusive Mensch und Umwelt) zur Verfügung. Daher können potenzielle Konsequenzen aus den errechneten Radionuklidkonzentrationen, wie die effektive Dosis der Referenzperson, nur auf der Basis heute festzulegender Biosphärenmodelle errechnet werden. Im Vergleich der jeweiligen nationalen Sicherheitsanalysen (Kapitel 4) ist festzustellen, dass in der Regel mehrere Biosphärenmodelle zum Einsatz gelangen, wie etwa die heutige Situation am Standort sowie weitere Modellvorstellungen potenzieller Entwicklungen, wie sie aus der Historie des Standortes ableitbar sind.

Die den Langzeitsicherheitsanalysen zugrunde liegenden Unsicherheiten unterstreichen den indikativen Charakter der auf dieser Basis ermittelten Konsequenz, der effektiven Dosis der Referenzperson, aus den potenziellen Radionuklidkonzentrationen in den Umweltmedien zur Bewertung der radiologischen Sicherheit.

Zur Ermittlung des **Risikos** der Referenzperson, einen schweren gesundheitlichen Schaden als Konsequenz einer Exposition aufgrund freigesetzter Radionuklide aus dem Endlager in die Biosphäre zu erleiden, werden die Grundlagen

- Eintrittswahrscheinlichkeit des jeweils zu untersuchenden Szenarios,
- die aus dem Szenario resultierende effektive Dosis,
- der Konversionsfaktor (schwerer gesundheitlicher Schaden/Sv)⁴

⁴Der üblicherweise verwendete Konversionsfaktor von $0,073 \text{ Sv}^{-1}$ stellt eine extreme Vereinfachung hoch komplexer und teilweise auch nicht verstandener Zusammenhänge dar /ICRP 90/.

- die Gesamtheit aller wesentlichen Szenarien mit ihren jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeiten (in der Summe ~1)

benötigt. Das bedeutet eine weitere Zunahme der ohnehin schon vorhandenen Unsicherheiten.

Darüber hinaus muss der Anwender des Risikokriteriums sich vergegenwärtigen, was die Ermittlung des Risikos für ein Individuum entlang der Zeitachse 10^6 Jahre bedeutet:

Zur Ermittlung dieses Risikos muss für ein jedes Szenario die Wahrscheinlichkeit ermittelt werden, dass eine Person, die zu einer bestimmten Zeit lebt, von dem untersuchten Szenario betroffen wird. In der Summe beziehen sich alle Eintrittswahrscheinlichkeiten der zu betrachtenden Szenarien und die jeweiligen Konsequenzen (effektive Dosen) auf eine und dieselbe Person, d. h. dieselbe Zeit der Einwirkung. Es muss also das Risiko der Person ermittelt werden, betroffen zu werden (Opferperspektive) /BAL 04/. Das ist grundsätzlich die Art der Risikoermittlung aus der Perspektive potenziell Betroffener, wie sie in probabilistischen Analysen über die verschiedenen Realisationen gemacht wird.

7.2 Fragen zur Implementierung einer Option

Zum Vergleich der Optionen Dosis / Risiko werden im Folgenden aus den in den vergangenen Kapiteln gemachten Ausführungen Argumente für oder gegen die jeweilige Option abgeleitet:

Zur Bewertung der Ergebnisse der Langzeitsicherheitsanalyse werden Dosis und Risiko herangezogen. Bewertungsmaßstab (Limit, Target) für die von einem Individuum erhaltene Dosis (in Deutschland) ist ein Bruchteil der natürlichen radiologischen Hintergrundbelastung oder die Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition. Bewertungsmaßstäbe für das Risiko orientieren sich an dem Risiko für ein Individuum, einen schweren gesundheitlichen Schaden aus der Dosis (Limit, Target) zu erleiden sowie aus der Ableitung heutiger von der Gesellschaft akzeptierter Risiken.

Wie oben angesprochen, sind die Analyseergebnisse nicht als Prognose, sondern als Indikator für die Sicherheit des Endlagersystems zu werten.

Hieraus resultieren Fragen an die Umsetzung der Optionen in einem Regelwerk. Diese Fragen werden nicht im Rahmen dieses Vorhabens behandelt, sondern müssen Gegenstand der Entwicklung von Sicherheitskriterien der Endlagerung sein.

1. Welche Rolle können die Analyseergebnisse und deren Bewertung in einem Regelwerk spielen?
2. Kann anhand ihrer „Größe“ der Grad für den Schutz von Mensch und Umwelt abgeleitet werden?
3. Wie kann das Analyseergebnis zur Bestätigung der Erfüllung der Anforderungen nach Schutz des Individuums und Schutz der Umwelt beitragen; welche Kriterien können im Regelwerk verankert werden?
4. Was kann das Regelwerk - unter Berücksichtigung der oben ausgeführten Einschränkungen in der Aussage der Analyse - im Hinblick auf die Demonstration der Einhaltung des Schutzzieles fordern?
5. Wie wird das Schutzziel mit der Unsicherheit des Nachweises auf Einhaltung verknüpft?
6. Welchem Anspruch soll das Schutzziel und die Nachweismethode genügen und über welche Zeiträume?

7.3 Abwägungskriterien

Im Hinblick auf die Optionsentscheidung sind weitere Bewertungen wichtig:

1. Schutzziele

Bewertungsmaßstäbe für die Optionen Dosis und Risiko, die aus den heutigen Lebensgewohnheiten des Menschen abgeleitet wurden, können nur für einen Zeitraum herangezogen werden, für den wissenschaftlich fundierte Aussagen über die Entwicklung des Menschen und seiner Ernährungs- und Verhaltensgewohnheiten sowie über die Entwicklung der menschlichen Gesellschaft möglich sind. Jenseits dieses Zeitraumes werden die Analyseergebnisse Dosis / Risiko in der Entwicklung und im Verlauf als Indikator für das Isolationsvermögen des Endlagersystems gewertet. Für ein gut ausgelegtes Endlagersystem muss gefordert werden, dass in den ersten 10^4 Jahren keine Freisetzung aus dem einschlusswirksamen Bereich des Endlagersystems zu besorgen ist. Somit liegt

der Zeitraum, für den Freisetzen zu bewerten sind, jenseits der Prognosezeiträume für Biosphäre und menschliche Gesellschaft.

2. Zeitrahmen, für den das Kriterium gelten soll

Einige der nationalen Regelwerke differenzieren ihre Anforderungen an die Bewertungsgrößen und Bewertungsmaßstäbe nach verschiedenen Zeiträumen. Bislang wurden in deutschen Regelwerken die Anforderungen zeitlich nicht eingeschränkt. Die Anforderung an den Individual- und Umweltschutz ist zeitlich nicht limitiert, lediglich die Nachweismöglichkeit auf Einhaltung der Schutzziele ist auf den Zeitraum beschränkt, für den wissenschaftlich fundierte Aussagen für die Entwicklung des Endlagersystems möglich sind.

3. Bedarf an Daten und Informationen

Für die jeweilige Option werden standortspezifische Daten und Informationen benötigt. Hierbei müssen die Möglichkeiten bewertet werden, diese in einem ausreichenden Tiefgang und mit der erforderlichen Sicherheit/Belastbarkeit zu beschaffen. Die verbleibenden Unsicherheiten und der Spekulationsgehalt sind im Hinblick auf die Anforderung „Nachweis der Langzeitsicherheit“ in die Bewertung mit einzubeziehen.

4. Bewertung der Analyseergebnisse

Da die Analyseergebnisse keine Prognosen darstellen, sollten auch die Schutzziele und Bewertungsmaßstäbe nicht als Grenzwerte sondern als Richtwerte formuliert werden.

5. Methodischer Zwang durch Optionswahl

Aus der Festlegung auf eine regulatorische Option folgen Konsequenzen für die Durchführung von Langzeitsicherheitsanalysen sowohl in methodischer Hinsicht als auch in der Durchführung (Aufwand, Darstellung, Datenbereitstellung etc).

6. Darstellung und Kommunikation der Ergebnisse

Bei der Wahl der regulatorischen Option sollten die Möglichkeiten oder Probleme, die jeweilige regulatorische Option sowie die erzielten Ergebnisse darzustellen und zu kommunizieren, berücksichtigt werden.

7. Umgang mit Unsicherheiten

Weiterhin ist die Bedeutung des (in einem Regelwerk ggf. vorgegebenden) Zeitrahmens für die Analyse im Hinblick auf die berechneten Ergebnisse (z. B. hinsichtlich einer „risk dilution“ /BAL 04/) und die Darstellung der Ergebnisse zu werten.

8. Klassifizierung von Szenarien

Das Endlagersystem wird in der Realität nur eine Entwicklung nehmen. Diese ist uns aber unbekannt. Daher werden die Möglichkeiten der Endlagersystementwicklung durch Szenarien dargestellt. Die Optionen Dosis und Risiko stellen unterschiedliche Anforderungen im Hinblick auf die Klassifizierung von Szenarien. Insbesondere erfordert die risikobasierte Langzeitsicherheitsanalyse eine Quantifizierung der Eintrittswahrscheinlichkeiten der wesentlichen Szenarien. Wie oben ausgeführt, erfordert dieser Ansatz die Szenarienbehandlung derart, dass die Summation über alle Eintrittswahrscheinlichkeiten Eins ergibt. Die Anforderung an die Ermittlung der Szenarieneintrittswahrscheinlichkeit ist somit hoch.

Im Gegensatz hierzu erlaubt die Option Dosis eine weniger anspruchsvolle Szenarienklassifizierung. In einigen Ländern werden die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Szenarien nicht berücksichtigt, andere wiederum bilden nur zwei Klassen wie etwa „wahrscheinlich“ und „weniger wahrscheinlich“. Der Anspruch an die Quantifizierung der Eintrittswahrscheinlichkeiten ist gegenüber der Risikooption deutlich geringer.

Tabelle 7-1: Argumente und deren Wichtigung

<div style="text-align: center;">Indikator</div> <div style="text-align: center;">Kriterium</div>	<div style="text-align: center;">Konzentration</div>	<div style="text-align: center;">Dosis</div>	<div style="text-align: center;">Risiko</div>
<p>1. Ableitung von Bewertungsmaßstäben</p> <p>Abwägung</p>	<p>Vergleich mit natürlich auftretenden Radionukliden</p> <p>Langfristig konstante Größe, Maßstab unabhängig von den gesellschaftlichen Entwicklungen. In der Natur nicht auftretende Radionuklide nicht bewertbar</p>	<p>Bruchteil der natürlichen Strahlenexposition, insbesondere geogene Belastung</p> <p>Langfristig konstante Größe, Maßstab unabhängig von den gesellschaftlichen Entwicklungen</p>	<p>Heutige von der Gesellschaft akzeptierte Risiken</p> <p>Maßstab abhängig von der gesellschaftlichen Entwicklung</p>
<p>2. Welche Schutzziele werden abgedeckt?</p> <p>Abwägung</p>	<p>Schutz von Mensch und Umwelt: Maßstab ist die Erhöhung der natürlich auftretenden Konzentrationen um einen unbedenklichen Anteil</p> <p>Ableitung der Gewährleistung des Schutzes aus der Geringfügigkeit nur für natürliche Radionuklide möglich</p>	<p>Schutz von Mensch und Umwelt: Maßstab ist die Erhöhung der natürlichen Strahlenexposition um einen unbedenklichen Wert.</p> <p>Erfasst alle Radionuklide Berechnung ist schwer zu rechtfertigen (s. a. Risiko)</p>	<p>Schutz des Menschen</p> <p>Schutz der Umwelt erfordert eigene Risikobetrachtung</p>
<p>3. Für welche Zeitrahmen gelten die Bewertungsmaßstäbe?</p> <p>Abwägung</p>	<p>Grenzwerte für die Zeiträume, für die wissenschaftlich fundierte Aussagen über die Entwicklung des Deckgebirges, der Biosphäre und der Gesellschaft möglich sind. Jenseits dieser Zeiträume Indikatoren zur Bewertung des Isolationsvermögens</p>		
	<p>Bewertungsmaßstab wird aus den geogenen Verhältnissen abgeleitet, er hat langzeitigen Bestand, er kann innerhalb des Nachweiszeitraumes als konstant angenommen werden</p>	<p>Bewertungsmaßstab wird aus den geogenen Verhältnissen abgeleitet, er hat langzeitigen Bestand, er kann innerhalb des Nachweiszeitraumes als konstant angenommen werden</p>	<p>Die Orientierung des Bewertungsmaßstabes an der Akzeptanz der Gesellschaft macht den Maßstab abhängig von der gesellschaftlichen Entwicklung</p>

<div style="text-align: center;">Indikator</div> <div style="text-align: center;">Kriterium</div>	<div style="text-align: center;">Konzentration</div>	<div style="text-align: center;">Dosis</div>	<div style="text-align: center;">Risiko</div>
<p>4. Bedarf an Daten und Informationen</p> <p>Abwägung</p>	<p>Fundiertes und belastbares Systemverständnis, sowie Informationen und Daten sind zur Durchführung einer Sicherheitsanalyse gefordert.</p>		
	<p>Primäres Ergebnis der Analysen sind die Konzentrationen. Der Bewertungsmaßstab setzt die Kenntnis der natürlicherweise vorliegenden und zu erwartenden Konzentrationen voraus.</p>	<p>Aggregation erfordert:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Primäres Ergebnis der Analyse: Konzentration - Dosiskonversionsfaktoren für alle zu betrachtenden Radionuklide - Ggf. Dosiskonversionsfaktoren für Biota erforderlich <p>Klassifizierung der Szenarien nach wahrscheinlich / weniger wahrscheinlich</p>	<p>Aggregation erfordert:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Primäres Ergebnis der Analyse: Konzentration - Dosiskonversionsfaktoren für alle zu betrachtenden Radionuklide - Konversionsfaktor Dosis-Risiko für Mensch und Biota <p>Fundierte Quantifizierung der Eintrittswahrscheinlichkeiten der zu untersuchenden Szenarien</p>
<p>5. Konsequenz für das methodische Vorgehen</p> <p>Abwägung</p>	<p>Deterministische / probabilistische Langzeitsicherheitsanalysen</p>		<p>Risikobasierte Langzeitsicherheitsanalysen</p>
	<ul style="list-style-type: none"> - Konservativ - deterministische Behandlung möglich - Nach Szenariengruppierung deterministisch probabilistische Behandlung möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Konservativ - deterministische Behandlung möglich - Nach Szenariengruppierung deterministisch probabilistische Behandlung möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Konservative Vorgehensweise nur schwer möglich - Probabilistische Behandlung für alle wesentlichen Szenarien, - Definition des betroffenen Individuums auf dem Zeitstrahl, - Ermittlung der „mean of the peak“ und/oder „peak of the mean“

<div style="text-align: center;">Indikator</div> <div style="text-align: center;">Kriterium</div>	<div style="text-align: center;">Konzentration</div>	<div style="text-align: center;">Dosis</div>	<div style="text-align: center;">Risiko</div>
<div style="text-align: center;">6. Umgang mit Unsicherheiten</div>	Datenunsicherheiten: probabilistische Unsicherheitsanalyse Modellunsicherheiten: Modellvariation, konservative Ansätze Szenariensicherheiten: Szenarientwicklung		
<div style="text-align: center;">Abwägung</div>	Zunehmende Unsicherheiten →		
<div style="text-align: center;">7. Prognostizierbarkeit</div>	<ul style="list-style-type: none"> - ewG 10⁶ a - Deckgebirge 10⁴ a - Biosphäre ? 	Individualschutz ~ 1 000 a > 1 000 a Indikator für Isolation	Individualschutz ~ 1 000 a > 1 000 a Indikator für Isolation
<div style="text-align: center;">Abwägung</div>		Dosis/Risiko sind nur mittelbare Indikatoren für die Isolation. Verfolgung von Indikatoren, welche die Isolation besser belegen. > 1 000 a: Es werden Maßstäbe zur Bewertung der Isolation entwickelt werden.	Dosis/Risiko sind nur mittelbare Indikatoren für die Isolation. Verfolgung von Indikatoren, welche die Isolation besser belegen. > 1 000 a: Es werden Maßstäbe zur Bewertung der Isolation entwickelt werden.
<div style="text-align: center;">8. Klassifizierung von Szenarien</div>	Gruppierung der Szenarien nach wahrscheinlich und weniger wahrscheinlich		Quantifizierung von Eintrittswahrscheinlichkeiten der Szenarien
<div style="text-align: center;">Abwägung</div>	Weniger anspruchsvoll im Hinblick auf Quantifizierung der Eintrittswahrscheinlichkeit, Zuordnung zu den Gruppen erfolgt mittels Plausibilitätsbetrachtung und Rückschlüsse auf die Standorthistorie		Quantifizierung der Eintrittswahrscheinlichkeiten ist anspruchsvoll, Wahrscheinlichkeit der Betroffenheit des Individuums erfordert Aufwand

7.4 Schlußfolgerung für das weitere Vorgehen

Der Nachweis der Sicherheit für alle Phasen der Endlagerentwicklung ist in Übereinstimmung mit den entsprechenden rechtlichen Anforderungen, insbesondere dem Atomgesetz, dem „Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung“, der Strahlenschutzverordnung, dem Wasserhaushaltsgesetz und dem Bergrecht, zu führen. Die nachfolgenden Ausführungen betreffen die Phase nach dem Verschluss des Endlagers /BAL 07/.

Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen soll die Isolation dieser Abfälle über lange Zeiten gewährleisten und damit den langzeitigen Schutz von Mensch und Umwelt vor den potenziell schädlichen Auswirkungen der eingelagerten Abfälle garantieren. Zukünftigen Generationen sollen keine unzumutbaren Lasten und Verpflichtungen auferlegt werden. Die aus der Endlagerung resultierenden potenziellen Auswirkungen für Mensch und Umwelt dürfen auch in Zukunft das Maß heute akzeptierter Auswirkungen nicht übersteigen. Die potenziellen Auswirkungen für Mensch und Umwelt aus der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland dürfen außerhalb der Grenzen Deutschlands nicht größer sein als innerhalb zulässig.

Das radiologische Schutzziel für die Phase nach dem Verschluss des Endlagers ist die Begrenzung des Risikos für ein Individuum, einen schweren gesundheitlichen Schaden aus der Strahlenexposition (effektive Dosis) zu erleiden.

Die Sicherheit des Endlagers nach dessen Verschluss beruht primär auf der Gewährleistung der Isolation der Abfälle. Die Isolation wird als gesichert angesehen, wenn die natürliche Umwelt durch etwa freigesetzte Radionuklide keine wesentliche Störung erfährt. Ist die Isolation über lange Zeiträume gesichert und nachgewiesen, impliziert dies die Einhaltung der Ziele zum Schutz von Mensch und Umwelt, auch wenn sich die Entwicklungen von Biosphäre, Mensch und Gesellschaft über diese Zeiträume nicht prognostizieren lassen und demzufolge auch eine Nachweisführung mittels der Ableitung von Bewertungsgrößen für radiologische Konsequenzen (Dosis, Risiko) an Grenzen stößt.

Der Endlagerstandort hat Eigenschaften derart aufzuweisen, dass ein entsprechend entwickeltes Endlagerkonzept die Einhaltung dieser Randbedingungen an diesem Standort gewährleisten kann. Eine besondere Rolle bei der Gewährleistung der Isolati-

on spielt der „einschlusswirksame Gebirgsbereich“, der gemäß den im „Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte“ entwickelten Ideen – im Zusammenwirken mit den ingenieurtechnischen Barrieren – die Isolation der hochradioaktiven Abfälle gewährleisten soll. Die Nachweisführung muss sich an den Grenzen der praktischen Vernunft orientieren. Die Bewertung der Vollständigkeit der Isolation erfolgt bevorzugt anhand von Indikatoren, die durch Modellierung solcher Komponenten des Endlagersystems ermittelt werden, deren Entwicklung sich über den Bewertungszeitraum prognostizieren lässt. Dies trifft insbesondere auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich zu. Deshalb werden hauptsächlich Indikatoren aus diesem Bereich bzw. seiner Randzone zur Bewertung herangezogen. Die Bewertungsmaßstäbe orientieren sich soweit als möglich an in der Natur vorgefundenen Zuständen.

Einhaltung der Schutzziele

Wahrscheinliche Szenarien

Die Einhaltung der Schutzziele wird durch das Isolationsvermögen des Endlagersystems gewährleistet. Zur Bewertung des Isolationsvermögens des Endlagersystems werden die Konsequenzen der wahrscheinlichen Szenarien analysiert. Die Bewertung orientiert sich soweit als möglich an dem Gedanken, dass die Isolation gewährleistet ist, wenn das bestehende natürliche System so wenig wie möglich gestört ist. Damit wird neben dem Schutz des Menschen auch dem Schutz der Umwelt Genüge getan.

Die Einhaltung der Schutzziele ist gewährleistet, wenn die Isolation für den Nachweiszeitraum nachgewiesen ist. Der Nachweis der Isolation ist für die Teilsysteme des Endlagersystems Endlagerbergwerk, einschlusswirksamer Gebirgsbereich, Deck- und Nebengebirge und oberflächennahe Biosphäre mittels folgender Indikatoren zu führen:

- Rückhaltung von Schadstoffen im Endlager
- Veränderung der Konzentration der Elemente Uran und Thorium in der Randzone des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs
- Beitrag zur Leistungsdichte aufgrund radioaktiver Strahlung im Porenwasser des Randbereichs des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch aus dem Endlagerbergwerk freigesetzte Radionuklide
- Radiotoxizität der aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzten Radionuklide

- Veränderung der Aktivitätskonzentration von Radionukliden im oberflächennahen Grundwasser
- Effektive Dosis für eine Referenzperson

Die Anforderungen an die Isolation gelten als erfüllt, wenn alle Kriterien für die Indikatoren eingehalten werden.

8 **Literatur**

/AECB 85/ Atomic Energy Control Board - Commission de controle de l'energie atomique (AECB-CCEA):

Deep Geological Disposal of Nuclear Fuel Waste: Background Information and Regulatory Requirements Regarding the Concept Assessment Phase. R-71, January 1985.

http://www.nuclearsafety.gc.ca/pubs_catalogue/uploads/R-71e.pdf

/AECB 86/ Atomic Energy Control Board - Commission de controle de l'energie atomique (AECB-CCEA):

Regulatory Objectives, Requirements and Guidelines for the Disposal of Radioactive Wastes - Long Term Aspects. R-104, June 1986

/AECL 94a/Atomic Energy of Canada Limited (AECL):

Environmental Impact Statement on the Concept for Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste. AECL-10711, COG-93-1, 1994

/AECL 94b/Atomic Energy of Canada Limited (AECL):

The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: Postclosure Assessment of a Reference System. AECL-10717, COG-93-7, 1994

/AKE 02/ Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd)

Auswahlverfahren für Endlagerstandorte

Empfehlungen des AkEnd

Dezember 2002

/AND 01a/ Andra: DOSSIER 2001 ARGILE. Sur l'avancement des études & recherches relatives a la faisabilité d'un stockage de déchets a haute activité et a vie longue en formation géologique profonde. Rapport de synthèse. Décembre 2001

- /AND 01b/ Andra: DOSSIER 2001 ARGILE. Sur l'avancement des études & recherches relatives a la faisabilité d'un stockage de déchets a haute activité et a vie longue en formation géologique profonde. Rapport de synthèse - Partie B. Compléments scientifiques et techniques. Décembre 2001
- /AND 05/ Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA): Dossier 2005 Argile: Evaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. http://www.andra.fr/publication/produit/D05A_266.pdf (Hauptband, weitere Bände unter http://www.andra.fr/interne.php3?id_rubrique=160)
- /BAL 01/ Baltès, B.:*
Sicherheitsindikatoren zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlager für radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen - Abschlussbericht
GRS-A-2949, Köln, September 2001
- /BAL 03/ Baltès, B. et al.:*
Sicherheitkriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk – Aktualisierte Diskussionsgrundlage
GRS-A-3110, Köln, Juli 2003,
- /BAL 04/ Baltès, B., K.-J. Röhlig:
Development of Safety Criteria in Germany: Aim, Process and Experiences – In: Management of Uncertainty in Safety Cases and the Role of Risk, Workshop Proceedings, Stockholm, Sweden, 2-4 February 2004, OECD 2004, ISBN 92-64-00878-0

* Die gekennzeichneten Literaturstellen sind im Auftrag des BMU erstellte GRS-A-Berichte bzw. Statusberichte. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere dürfen solche Berichte nur mit seiner Zustimmung zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt werden bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

- /BAL 07/ Baltes, B. et al.:*
Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen - Entwurf der GRS
GRS-A-3358, Köln, Januar 2007
- BFS 05/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS):
Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle, Wirtsgesteine im Vergleich, Synthesebericht des Bundesamtes für Strahlenschutz, Salzgitter, 04.11.2005,
http://www.bfs.de/endlager/publikationen/Einzelfragen_Endlagerung.html
- /BOR 05/ Bork, M.:*
Endlager radioaktiver Abfälle – Sicherheitskriterien im Ausland
GRS-A-3260, Entwurf 2005
- /BRO 04/ Broed, R., et al.:
Sensitivity analysis of model output – a step towards robust safety indicators?
Abstracts of ECORAD 2004, the Scientific Basis for Environment Protection against Radioactivity,
Aix-en-Provence, France, September 6-10, 2004.
- /CNSC 04/ Canadian Nuclear Safety Commission – Commission canadienne de sûreté nucléaire (CNSC-CCSN):
Regulatory Policy – Managing Radioactive Waste. P-290, July 2004.
http://www.nuclearsafety.gc.ca/pubs_catalogue/uploads/P290_e.pdf
-

* Die gekennzeichneten Literaturstellen sind im Auftrag des BMU erstellte GRS-A-Berichte bzw. Statusberichte. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere dürfen solche Berichte nur mit seiner Zustimmung zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt werden bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

- /CNSC 06/ Canadian Nuclear Safety Commission – Commission canadienne de sûreté nucléaire (CNSC-CCSN):
Regulatory Guide – Assessing the Long Term Safety of Radioactive Waste Management. G-320, December 2006
http://www.nuclearsafety.gc.ca/pubs_catalogue/uploads/G-320_FinalPaper_e.pdf
- /DOE 00/ U.S. Department of Energy: Civilian Radioactive Waste Management System Management & Operating Contractor (CRWMS)
Total System Performance Assessment for the Site Recommendation
TDR-WIS-PA-000001 REV 00 ICN 01, December 2000
<http://www.isnnet.gov/docview.aspx?mode=1&lsn=NRC000011033&ic=1&im=0&sc=26&sm=0>
- /DOE 03/ U.S. Department of Energy: Office of Civilian Radioactive Waste Management Office of Repository Development
Total System Performance Assessment-License Application
Methods and Approach
Prepared by: Bechtel SAIC Company, LLC 1180 Town Center Drive Las Vegas, Nevada 89144
December 2003
- /EPA 01/ US Environmental Protection Agency:
40 CFR PART 197
Public Health and Environmental Radiation Protection Standards for Yucca Mountain, Nevada
Final Rule, June 13, 2001
- /EPA 05/ US Environmental Protection Agency:
40 CFR PART 191
Environmental Radiation Protection Standards for Management and Disposal of Spent Nuclear Fuel, High-Level and Transuranic Radioactive Wastes
http://ecfr.gpoaccess.gov/cgi/t/text/text-idx?c=ecfr&sid=73d1fcf2f7ba8781abee7f1b5334a3eb&tpl=/ecfrbrowse/Title40/40cfr191_main_02.tpl

- /EPA 05a/ US Environmental Protection Agency:
40 CFR PART 197
Public Health and Environmental Radiation Protection Standards for Yucca
Mountain, Nevada
[OAR-2005-0083; FRL-]
[RIN 2060-AN15]
ACTION: Proposed Rule
- /ESD 97/ Environmental Agency, Scottish Environment Protection Agency (SEPA)
Department of the Environment for Northern Ireland:
Radioactive Substances Act 1993
Disposal Facilities on Land for Low and Intermediated Level Radioactive
Waste
Guidance on Requirements for Authorisation
Environmental Agency, Bristol, 1997
- /EUR 02/ European Atomic Energy Community (EURATOM):
European Commission
Nuclear science and technology
Testing of Safety and Performance Indicators (SPIN)
EUR 19965 EN 2002
- /FER 05/ Ferch, R. (CNSC):
Persönliche Mitteilung.
- /GOV 99/ Finish Government:
General regulations for the safety of spent fuel disposal (1999), Govern-
ment Decision 478/1999

- /HOO 03/ Hooper, A.; Beauheim, R.; Hedin, A.; Johnson, L.; Lalieux, P.; Machiels, A.; Röhlig, K.-J.; Pescatore, C.:
The French R&D Programme on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste. An International Peer Review of the "Dossier 2001 Argile".
OECD/NEA, Paris 2003, ISBN 92-64-02136-1
Programme français de R-D sur le stockage géologique de déchets radioactifs. Revue internationale par des pairs du Dossier 2001 Argile.
OCDE/AEN, Paris 2003, ISBN 92-64-02137-X
- /HOO 06/ Hooper, A.; Beauheim, R.; Gascoyne, M.; Hedin, A.; Johnson, L.; Kühn, K.; Lalieux, P.; Machiels, A.; Röhlig, K.-J.; Pescatore, C.: Safety of Geologic Disposal of High-Level and Long-Lived Radioactive Waste in France. An International Peer Review of the "Dossier 2005 Argile" concerning Disposal in the Callovo-Oxfordian Formation. OECD/NEA, Paris 2006,
ISBN: 92-64-02299-6
Sûreté du stockage géologique de déchets radioactifs HAVL en France. Examen international par des pairs du "Dossier 2005 Argile" concernant le stockage dans la formation du Callovo-Oxfordien. OCDE/AEN, Paris 2006,
ISBN: 92-64-02300-3
- /HSK 93/ Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Eidg. Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA):
Richtlinie für schweizerische Kernanlagen
Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle
HSK-R-21/d, November 1993
- /IAE 94/ International Atomic Energy Agency (IAEA):
Safety indicators in different time frames for the safety assessment of underground radioactive waste repositories
IAEA-TECDOC-767, 1994
- /IAE 95/ International Atomic Energy Agency (IAEA):
The Principles of Radioactive Waste Management Safety Series No.111-F
IAEA, Vienna, 1995

- /IAE 03/ International Atomic Energy Agency (IAEA):
Safety indicators for the safety assessment of radioactive waste disposal
IAEA-TECDOC-1372
September 2003
- /IAE 05/ International Atomic Energy Agency (IAEA):
Natural Activity Concentrations and Fluxes as Indicators for the Safety Assessment of Radioactive Waste Disposal Details
IAEA TECDOC Series No. 1464
November 2005
- /IAE 06a/ International Atomic Energy Agency (IAEA):
IAEA Safety Glossary, Version 2.0
September 2006
- /IAE 06b/ International Atomic Energy Agency (IAEA):
Fundamental Safety Principles
Safety Fundamentals
Safety Standards Series No. SF-1, Vienna, 2006
- /ICRP 90/ International Commission of Radiological Protection (ICRP):
ICRP PUBLICATION 60.
1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.
ADOPTED BY THE COMMISSION IN NOVEMBER 1990
- /ICRP 00/ International Commission of Radiological Protection (ICRP):
Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste
Publication 81, Ann ICRP, 28 (4), 2000
- /KEV 04/ Der Schweizerische Bundesrat
Kernenergieverordnung (KEV) vom 10. Dezember 2004
In Kraft getreten am 1. Februar 2005

- /KLI 04/ Klinke, A., Renn, O:
Systemic risks: A new challenge for risk management
In: EMBO Reports, Science and Society, Vol. 5, Special Issue 2004
- /MIL 00/ Miller, Bill et al.:
Natural element concentrations and fluxes: their use as indicators of repository safety.
A QuantiSci report, QSL-6180-GEN/2, January 2000
- /NAG 02/ NAGRA (National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste):
Project Opalinus Clay - Safety Report
Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis)
TECHNICAL REPORT 02-05
- /NEA 99/ Nuclear Energy Agency (NEA):
Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories
Its Development and Communication
OECD, 1999
- /NEA 02/ Nuclear Energy Agency (NEA):
An International Peer Review of the Yucca Mountain Project TSPA-SR A
Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency
OECD, 2002
- /NEA 03/ Nuclear Energy Agency (NEA):
SAFIR 2: Belgian R&D Programme on the Deep Disposal of High-level and Long-lived Radioactive Waste, An International Peer Review
OECD 2003, ISBN 92-64-18499-6

- /NEA 04/ Nuclear Energy Agency (NEA):
Die Sicherheit der geologischen Tiefenlagerung von BE, HAA und LMA in der Schweiz
Eine internationale Expertenprüfung der radiologischen Langzeitsicherheitsanalyse der Tiefenlagerung im Opalinuston des Zürcher Weinlandes
NEA No 5569, OECD 2004
- /NRC 01/ US Nuclear Regulatory Commission (NRC):
10 CFR Part 63
Disposal of High-Level Radioactive Wastes in a Proposed Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada; Final Rule
Friday, November 2, 2001
- /OND 01/ ONDRAF/NIRAS:
SAFIR 2, Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2
NIROND 2001–05 E December 2001
- /OPG 04a/ Ontario Power Generation (OPG): Nuclear Waste Management.
Third Case Study – Postclosure Safety Assessment. Report No.: 06819-REP-01200-10109-R00, March 2004
- /OPG 04b/ Ontario Power Generation (OPG): Nuclear Waste Management.
Evolution of a Canadian Deep Geologic Repository: Base Scenario. Report No.: 06819-REP-01200-10092-R00, March 2004
- /OPG 04c/ Ontario Power Generation (OPG): Nuclear Waste Management.
Evolution of a Canadian Deep Geologic Repository: Defective Container Scenario. Report No.: 06819-REP-01200-10127-R00, March 2004
- /POS 99/ POSIVA OY:
Timo Vieno, Henrik Nordman: Safety assessment of spent fuel disposal in Häst-holmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara - TILA-99 -,
VTT Energy, March 1999 POSIVA 99-07, ISBN 951-652-062-6

- /POS 05/ POSIVA OY:
Timo Vieno, Ari T.K. Ikonen: Plan for Safety Case of Spent Fuel Repository at Olkiluoto
POSIVA 2005-01, February 2005
- /POS 05a/ POSIVA OY:
Olkiluoto Site Description 2004
POSIVA 2005-03, May 2005
- /RFS 91/ Règle Fondamentale de Sûreté (RFS) No III.2.f
Stockage définitive de déchets radioactifs en formation géologique profonde.
Englische Fassung: Basic Safety Rules, Determination of the objectives to be adopted in the design and construction phases of the creation of a deep geological formation radioactive waste repository to ensure safety after the repository has been closed, Rule No.III.2.f, 1991
- /SAG 04/ Sagar, B. et al.:
International Peer Review of Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company's SR-Can interim report. December 2004. SKI 2005:2, SSI 2005:2,
http://www.ssi.se/ssi_rapporter/pdf/ssi_rapp_2005_02.pdf
- /SKB 03/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB):
Planning report for the safety assessment SR-Can. Technical Report TR-03-08, June 2003.
<http://www.skb.se/upload/publications/pdf/TR-03-08%20Webb.pdf>
- /SKB 04/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB):
Interim Main Report of the Safety Assessment SR-Can. Technical Report TR-04-11, August 2004.
<http://www.skb.se/upload/publications/pdf/TR-04-11nywebb.pdf>

- /SKB 99/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB):
 SR 97 - Deep repository for spent nuclear fuel. SR 97 - Post-closure safety. Main report - Vol. I, Vol. II and Summary. SKB TR-99-06.
http://www.skb.se/templates/skbiframe_11439.aspx
- /SKI 02/ Statens kärnkraftinspektion (SKI) – Swedish Nuclear Power Inspectorate:
 The Swedish Nuclear Power Inspectorate's regulations concerning safety in final disposal of nuclear waste (SKIFS 2002:1)
http://www.ski.se/extra/tools/parser/index.cgi?url=/html/parse/index_en.html&selected=12&mainurl=http://www.ski.se:80/extra/document/%3Fmodule_instance%3D1%26action%3Dshow_category%26id%3D20
- /SSI 98/ Statens Strålskyddsinstitut (SSI) – Swedish Radiation Protection Authority:
 The Swedish Radiation Protection Institute's Regulations on the Protection of Human Health and the Environment in connection with the Final Management of Spent Nuclear Fuel and Nuclear Waste, issued on September 28, 1998. SSI FS 1998:1, Unofficial translation.
http://www.ssi.se/ssi_rapporter/pdf/ssi_rapp_2005_17.pdf
- /SSI 05/ Statens Strålskyddsinstitut (SSI) – Swedish Radiation Protection Authority:
 The Swedish Radiation Protection Authority's guidelines on the application of the regulations (SSI FS 1998:1) concerning protection of human health and the environment in connection with the final management of spent nuclear fuel and nuclear waste
 SSI FS 2005:5, September 2005.
- /STU 01/ Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK):
 Long-term safety of disposal of spent nuclear fuel
 STUK Guide YVL 8.4 (2001)
- /STU 04/ Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK) (Ruokula, E.):
 in: Nuclear Energy Agency (NEA)
 Management of Uncertainties in Safety Case and the Role of Risk Workshop Proceedings, Stockholm, Sweden, 2-4 February 2004
 OECD 2004, NEA No. 5302, S. 24

Verteiler

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Referat RS II

MinDirig Dr. Huthmacher 2 x

Referat RS III 3 5 x

Bundesamt für Strahlenschutz

SE 3.4

Dr. Preuss 1 x

AG-F 2

N.N 4 x

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

BGR 1 x

Kernforschungszentrum Karlsruhe

Dr. Pitterich (PtWT + E) 1 x

GRS

Geschäftsführung (hah, stj) je 1 x

Bereichsleiter (rot, zir, erv, lim, tes, prg) je 1 x

Projektbetreuung (abt) 1 x

Projektleitung (bat) 1 x

Autor (kin, bat, bec) je 1 x

TECDO (rop) 1 x

Bibliothek (hog) 1 x

Gesamtauflage 29 x