



Bundesamt für Strahlenschutz

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

Diskussionspapier

Sicherheitsphilosophie für die Endlagerung radioaktiver Abfälle - Grundsätze und Ziele -

2. Entwurf Februar 2005

Lesehinweis:

Für einen schnellen aber auch umfassenden Überblick über den Inhalt des Berichtes und die weitere Vorgehensweise lesen Sie bitte die Zusammenfassung, Kapitel 1 und Anhang 4.

Detaillierte Ausführungen zu einzelnen Themen enthalten die Kapitel 2 bis 5. Die Anhänge 1 bis 3 sind für diejenigen Leser und Leserinnen geschrieben, die fachlich besonders tief einsteigen möchten.

Diskussionskapitel

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG	5
1 ANLASS UND MOTIVATION	12
1.1 Einleitung	12
1.2 Was ist die Sicherheitsphilosophie für die Endlagerung?	12
1.3 Warum wird eine Sicherheitsphilosophie für die Endlagerung gebraucht – und warum jetzt?	13
1.4 Wieso entwickelt das BfS eine Sicherheitsphilosophie für die Endlagerung?	16
2 ENTSORGUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE ALS EINE GESELLSCHAFTLICHE HERAUSFORDERUNG	18
2.1 Verantwortung der heutigen Generation für eine Lösung	19
2.2 Verpflichtung gegenüber zukünftigen Generationen	21
2.3 Endlagerung - ein Weg ohne Alternativen	22
2.4 Bestmögliche Lösung	25
3 SICHERHEITSKONZEPT FÜR EIN ENDLAGER	26
3.1 Gestaffelte Sicherheitsebenen für die Betriebsphase	26
3.2 Entwicklungskategorien für das verschlossene Endlager	27
3.3 Festlegung des Schutzniveaus durch die Gesellschaft	32
3.4 Schrittweises Vorgehen	34
4 BEWERTUNGSMÄßSTÄBE FÜR DEN SCHUTZ VON MENSCH UND UMWELT	36
4.1 Risikostandards	37
4.2 Festlegung risikobasierter Schutzziele	40
4.3 Strahlenrisiko	44
4.4 Chemotoxische Risiken	45
4.5 Verfahren zur Risikoermittlung	46
4.6 Schutzziele für zu erwartende und außergewöhnliche Entwicklungen	48
4.7 Spezielle Entwicklungen	49
4.8 Zusammenfassung	49

4.9	Die Empfehlung von RSK und SSK	49
4.10	Schutz der Umwelt	50
5	ZUVERLÄSSIGKEIT UND NACHWEIS DER SICHERHEIT	51
5.1	Zuverlässigkeit der Sicherheitssysteme	51
5.2	Nachweis der Sicherheit	53
LITERATUR		60
ANHANG 1 Zuordnung von Entwicklungen des Endlagers zu den drei Entwicklungskategorien mit Hilfe von Szenarien		63
ANHANG 2 Existierende risikobasierte Expositionsstandards		70
ANHANG 3 Ergebnisse ausgewählter Sicherheitsanalysen anderer Länder		77
ANHANG 4 Gestaltung des Diskurses zur Sicherheitsphilosophie des BfS		87
GLOSSAR		89

Diskussionspapier

Zusammenfassung

Durch die Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung und durch die Anwendung von radioaktiven Stoffen in Forschung, Gewerbe, Industrie und Medizin haben sich über viele Jahrzehnte radioaktive Abfälle angesammelt, deren dauerhafte und sichere Entsorgung dringend gelöst werden muss.

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hat als Strahlenschutzbehörde des Bundes den Auftrag, Strahlenbelastungen abzuschätzen und zu bewerten sowie das Bundesministerium für Umwelt-, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) bei der Erarbeitung von Strahlenschutzmaßnahmen und -Regelwerke zu beraten und zu unterstützen.

Außerdem ist das BfS für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland verantwortlich. Wie auch andere Betreiber kerntechnischer Anlagen ist das BfS als Betreiber eines Endlagers verpflichtet, Mensch und Umwelt sicher und dauerhaft vor den schädlichen Auswirkungen dieser radioaktiven Abfälle zu schützen.

In der Umsetzung dieser gesetzlichen Aufträge hat das BfS eine Sicherheitsphilosophie für die sichere Endlagerung erarbeitet und stellt diese zur Diskussion.

Sicherheitsphilosophie als Rahmen

Die Sicherheitsphilosophie für die Endlagerung soll den übergeordneten Rahmen darstellen, der die grundlegenden sicherheitstechnischen Zielvorstellungen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle beinhaltet. Dieser Rahmen wird durch die gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerke ausgefüllt und weiter konkretisiert. Dies gilt insbesondere für die vorgeschlagenen, aber noch festzulegenden Kriterien zur Standortauswahl und die abschließend zu formulierenden Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle einschließlich der sie weiter untersetzenden Leitlinien für die Betriebs- und Nachbetriebsphase eines Endlagers. Dabei ist der Vergleich alternativer Endlagerstandorte und Endlagerkonzepte und die zugehörige Entscheidung von der anschließenden Genehmigung eines Endlagers zu unterscheiden. Ein Vergleich von Alternativen muss sich an den formulierten Zielvorstellungen orientieren, während in einem nachfolgenden Genehmigungsverfahren die dann gültigen gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerke zu erfüllen sind.

Für die Betriebsphase eines Endlagers sind die Anforderungen durch sinngemäße Anwendung der bestehenden Regelwerke festgelegt. Für den Zeitraum nach Verschluss eines Endlagers besteht jedoch noch ein erheblicher Regelungsbedarf.

Die vom BfS vorgelegte Sicherheitsphilosophie für die sichere Endlagerung soll als Ausgangspunkt zur Gestaltung von Regelungen gesetzlicher und untergesetzlicher Art für die Endlagerung, die vom Gesetzgeber und dem BMU zu schaffen sind, beitragen.

Festlegung des Schutzniveaus durch die Gesellschaft

Das Schutzniveau für ein Endlager soll aufbauend auf wissenschaftlichen Erkenntnissen und unter Berücksichtigung gesellschaftlicher Wertvorstellungen in einem Diskurs festgelegt werden. Für einen solchen Diskurs ist es erforderlich, dass die gesellschaftliche Diskussion über Risiken, die von einem Endlager ausgehen dürfen, klar unterscheidbar ist von der wissenschaftlichen Diskussion über die Abschätzung von Risiken.

Prinzipien der sicheren Endlagerung

Folgende Prinzipien sind zentraler Bestandteil der Sicherheitsphilosophie:

- Die Endlagerung der radioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Schichten ist im Hinblick auf die Sicherheit und die Realisierbarkeit ohne Alternative. Eine sichere Verwahrung ist für einen Zeitraum von mindestens einer Million Jahren zu zeigen. Für diesen Zeitraum stehen geologische Verfahren, die verlässliche Aussagen über die Geospähre zulassen, zur Verfügung.
- Die Endlagerung ist so zu planen und umzusetzen, dass zukünftige Generationen keinen Risiken ausgesetzt werden, die wir heute selbst nicht bereit wären zu akzeptieren. Weiterhin dürfen heutige Schutzstandards nicht soweit ausgenutzt werden, dass zukünftigen Generationen jeder Handlungsspielraum genommen wäre, da zusätzliche Schadstofffreisetzung dann unmittelbar zu einer Überschreitung heute akzeptierter Schutzstandards führen würde.
- Das Verfahren, mit dem die Entsorgungslösung erarbeitet und entsprechende Endlagerstandorte ausgewiesen werden, muss strengen Anforderungen genügen. Es muss insbesondere ergebnisoffen und verlässlich sein. Entscheidungsgrundlagen und -regeln müssen offen gelegt, Entscheidungen müssen transparent getroffen werden sowie eine Überprüfung und gegebenenfalls Korrekturen zulassen.

- Entsprechend der Grundsätze des Strahlenschutzes ist das Gesundheitsrisiko jedes Individuums zunächst absolut zu begrenzen und darunter soweit möglich zu reduzieren. Der Vergleich von Alternativen (Standorte, Lagerkonzepte etc.) trägt entscheidend zur Umsetzung des Minimierungsgebots des Strahlenschutzes bei.
- Endlager in tiefen geologischen Schichten sind passive Systeme und bedürfen zur Aufrechterhaltung der Sicherheit keiner weiteren Betreuung durch den Menschen. Daher unterscheidet sich die Sicherheitsphilosophie zur sicheren Endlagerung von der für andere technischen Anlagen (z. B. Kernkraftwerken), deren Emissionen durch Nachrüstungen, Abschalten etc. reduziert werden können.

Unterschiedliche Schutzniveaus angleichen

Die heute akzeptierten Vorstellungen der Gesellschaft über das anzustrebende Schutzniveau für Mensch und Umwelt unterscheiden sich deutlich, je nachdem um welche Stoffe und Schutzgüter es sich handelt. Während der Strahlenschutz sich nach wie vor stark an der Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition orientiert, werden im Bereich der chemotoxischen Substanzen deutlich strengere Maßstäbe angelegt. Hier gilt der Grundsatz, möglichst keine krebserregenden Substanzen in die Umwelt und in die Nahrungskette gelangen zu lassen. Dort, wo es keine Möglichkeit gibt, die Schadstoffe vollständig zu eliminieren, wird eine Minimierung des Risikos auf ein Niveau angestrebt, das als unerheblich angesehen werden kann. Einen solchen gesetzlich festgelegten Risikostandard gibt es hierzu in Deutschland allerdings nicht. International und national orientiert man sich bei der Minimierung von Schadstoffkonzentration in Gebrauchsgütern und Lebensmitteln an einem Risikowert von 10^{-6} . Dies bedeutet: Von einer Million lebenslang exponierter Menschen darf im Mittel nicht mehr als einer in seinem Leben eine schwere Krankheit durch den Schadstoff erleiden.

Risiko als geeigneter Vergleichsmaßstab

Durch die Einführung eines Risikomaßstabs, mit dem die Risiken vergleichbar gemacht werden, wird auch die gesellschaftliche Diskussion über das anzustrebende bzw. notwendige Schutzniveau erleichtert. Diese Diskussion kann dann befreit werden von der wissenschaftlichen Diskussion über die Berechnung des Risikos. Die Festlegung von Grenzwerten für die effektive Individualdosis im Strahlenschutz sowie von Schadstoffkonzentrationen in Lebensmitteln und Verbrauchsgütern in der Toxikologie sind weder für die Allgemeinheit nachvollziehbar noch als Vergleichsmaßstab geeignet.

Suche nach dem bestmöglichen Endlager

Um der Verantwortung gegenüber zukünftigen Generationen gerecht zu werden, ist es erforderlich, zügig nach einer bestmöglichen Lösung für die Endlagerung radioaktiver Abfälle zu suchen. Dies bedeutet, dass die Auswahl mit Beteiligung der Bevölkerung unter dem Vorrang von Sicherheitsaspekten aus gesellschaftlich akzeptablen, technisch machbaren und bezahlbaren Alternativen getroffen wird. Dabei darf der Auswahlprozess für ein Endlager nicht dazu führen, dass die Realisierung der Lösung auf unbestimmte Zeit verschoben wird, denn dadurch werden ebenfalls Risiken und Kosten verursacht.

Unterschiedliche Entwicklungen müssen berücksichtigt werden

Jedes Endlager wird über Zeiträume von vielen tausend bis einer Million Jahre Veränderungen unterworfen sein. Diese Veränderungen werden in der Sicherheitsphilosophie als Entwicklungen bezeichnet. Für eine möglichst realistische Bewertung von Alternativen ist es erforderlich, die Entwicklungen, denen das Endlager nach seinem Verschluss ausgesetzt sein kann, in drei Kategorien einzuordnen.

Entwicklungen, mit deren Eintreten innerhalb von einer Million Jahre zu rechnen ist, werden mit einer Wahrscheinlichkeit von eins berücksichtigt und als *zu erwartende Entwicklungen* bezeichnet. Diese müssen ausschlaggebend für die Suche und Prüfung alternativer Endlagerstandorte und Anlagenplanungen sein.

Außerdem sind weniger wahrscheinliche Entwicklungen zu betrachten, deren Eintritt aber praktisch vernünftig begründet werden kann. Die Summe der *außergewöhnlichen Entwicklungen* darf nicht so hoch sein, dass die Entwicklung des Endlagers nach seinem Verschluss durch diese Art von Entwicklungen dominiert wird.

Entwicklungen, deren konventionelle Auswirkungen alle denkbaren radiologischen Auswirkungen weit übersteigen (z. B. Meteoriteneinschlag) oder menschliches Eindringen in ein Endlager (z. B. bei der Rohstoffsuche) werden als *spezielle Entwicklungen* bewertet.

Diese hierarchische Staffelung der Entwicklungen soll dazu führen, dass möglichst sichere Endlagerstandorte ausgewählt und Anlagenkonzepte entwickelt werden.

Risikovergleiche erfordern probabilistische Methoden

Es gilt, die Wahrscheinlichkeit von Entwicklungen und die Unsicherheiten in der Beschreibung der Entwicklungen in der Sicherheitsbewertung zu berücksichtigen. Dies wird in einer Risikobewertung umgesetzt und sichergestellt. Hierzu dienen die so genannten probabilistischen Methoden (Wahrscheinlichkeiten, Unsicherheiten und Verteilungen von Parametern werden berücksichtigt).

Gegenüber der bisherigen Praxis in Genehmigungsverfahren stellt dies eine veränderte Vorgehensweise dar. Bislang ist es üblich, mit abdeckenden (konservativen) Berechnungsmethoden zu zeigen, dass ein bestimmter Grenzwert (z. B. § 47 StrlSchV) mit hoher Zuverlässigkeit unterschritten wird. Es können stark vereinfachende und die Höhe der Auswirkungen stark überschätzende Berechnungsmethoden eingesetzt werden. Die Vereinfachungen und die zur Überschätzung führenden Annahmen können für unterschiedliche Endlager-Standorte und -Konzepte aber sehr verschieden sein, so dass die Rechenergebnisse als Entscheidungsbasis nicht geeignet sind.

Sicherheit hat Vorrang bei der Endlagerentscheidung

Die Sicherheit muss vorrangig die Entscheidung über ein Endlager bestimmen. Allerdings werden die Akzeptanz der Bevölkerung in einer Region, die infrastrukturellen Auswirkungen und die Kosten die Entscheidung mitbestimmen. Aus diesen Gründen muss für den Entscheidungsprozess definiert werden, wann die Sicherheitsaspekte ausreichend berücksichtigt wurden, und somit gesellschaftliche Aspekte gleichrangig bei der Entscheidung betrachtet werden.

Risikoschranke und Risikoziel festlegen

Es wird daher vorgeschlagen, einen Minimierungsbereich im Rahmen der Auswahl und Bewertung von Endlagerstandorten zu berücksichtigen (Risiko tolerierbar, vgl. Abb. 1). Nach oben wird der Minimierungsbereich durch eine Risikoschranke (siehe Glossar) begrenzt. Langfristige Risiken aus einem Endlager für den einzelnen Menschen oberhalb einer solchen Risikoschranke sind nicht tolerierbar (Risiko inakzeptabel). Als Risikoschranke sollte der Wert von 10^{-4} für das Auftreten schwerer Erkrankungen (Lebensrisiko) für Auswirkungen aus einem Endlager gesetzt werden.



Abbildung 1: Festlegung des Minimierungsbereichs und der Risikoschranke

Nach unten wird der Risikobereich durch das Risikoziel (siehe Glossar) begrenzt. Risiken unterhalb des Risikoziels sind so gering (Risiko unerheblich), dass sie für die weiteren Entscheidungen über das bestmögliche Endlager nicht mehr vorrangig sind. Das Risikoziel sollte einen Wert von 10^{-6} nicht überschreiten.

Praktisches Vorgehen bei Suche und Bewertung

Die Vorschläge bedeuten für das praktische Vorgehen bei der Suche von Endlagerstandorten und der Bewertung von Endlagerkonzepten:

- Wird für alle verglichenen Endlagerstandorte bzw. Endlagerkonzepte das Risikoziel unterschritten, sind diese aus Sicht des Strahlenschutzes aufgrund ihres unerheblichen Risikos gleichwertig. Andere gesellschaftlich relevante Kriterien für eine Entscheidung können herangezogen werden.
- Wird für keines der bewerteten Endlagersysteme das Risikoziel erreicht, die Risikoschranke aber unterschritten, kommt der Minimierung oberste Priorität zu.

Der Vorschlag für die Risikoschranke und das Risikoziel soll den gleichermaßen berechtigten Verpflichtungen, zukünftige Menschen für einen Zeitraum von einer Million Jahre nicht durch ein Endlager zu gefährden und die Endlagerung zu realisieren, gerecht werden. Ergänzend hierzu wird gefordert, dass innerhalb von 10.000 Jahren nach Verschluss des Endlagers keine Freisetzung von Schadstoffen in die belebte Umwelt (z. B. Grundwasserleiter) erfolgt. Internationale Studien belegen, dass das Risikoziel durch eine gute Auswahl eines Endlagerstandortes und Endlagerplanung unterschritten werden kann (siehe Anhang 3).

Der hier vorgeschlagene Weg führt somit zu einem Endlager, das den Ansprüchen heutiger und zukünftiger Generationen gerecht werden kann.

Diskussionspapier

1 Anlass und Motivation

1.1 Einleitung

Durch die Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung und die Anwendung von Radioisotopen in Forschung, Gewerbe, Industrie und Medizin haben sich radioaktive Abfälle angesammelt, deren Entsorgung zügig gelöst werden muss. Die hierzu notwendigen Schritte müssen jetzt erfolgen und dürfen nicht auf nachfolgende Generationen verlagert werden. Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) ist für die Endlagerung radioaktiver Abfälle gesetzlich zuständig und damit verpflichtet, Mensch und Umwelt sicher und dauerhaft vor den schädlichen Auswirkungen dieser Abfälle zu schützen. Dieses Schutzziel soll durch die Endlagerung der radioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Formationen erreicht werden. Die Realisierung eines Endlagers stellt nicht nur eine wissenschaftlich-technische, sondern auch eine gesellschaftliche Herausforderung dar.

1.2 Was ist die Sicherheitsphilosophie für die Endlagerung?

Mit der Sicherheitsphilosophie für die Endlagerung formuliert das BfS die Zielvorstellungen für Standortsuche bzw. -auswahl und Planungsarbeiten für Auslegung, Errichtung, Betrieb und Verschluss eines Endlagers. Sie beschreibt, wie der Schutz von Mensch und Umwelt gestaltet werden soll. Dabei wird im Sinne eines Immissionsschutzkonzeptes der Blick vom Schutzgut (Mensch und Umwelt) auf das Endlager gerichtet.

Die Sicherheitsphilosophie für die Endlagerung bildet den notwendigen einheitlichen Bewertungsmaßstab für die Sicherheit der Endlagerung. Dabei ist der Vergleich alternativer Endlagerstandorte und Endlagerkonzepte von der anschließenden Genehmigung eines Endlagers zu unterscheiden. Die Prüfung von Alternativen muss den formulierten Zielvorstellungen genügen. Sie geht dem Genehmigungsverfahren voraus. Die konkreten Genehmigungsvoraussetzungen für ein Endlager sind an dem zu diesem Zeitpunkt gültigen gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerk (z. B. Sicherheitskriterien und zugehörige Leitlinien) im Genehmigungsverfahren abzutüpfeln. In der Sicherheitsphilosophie sind daher nur einige wenig detaillierte Angaben für die in einem Genehmigungsverfahren einzuhaltenen Grenzwerte und für die Vorgehensweise zum Nachweis ihrer Einhaltung sinnvoll.

Die Sicherheitsphilosophie für die Endlagerung ist damit der übergeordnete Rahmen, der die grundlegenden sicherheitstechnischen Zielvorstellungen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle beinhaltet. Dieser Rahmen wird durch die gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerke ausgefüllt und weiter konkretisiert. Dies gilt insbesondere für die vorgeschlagenen, aber noch festzulegenden Kriterien zur Standortauswahl und die abschließend zu formulierenden Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle einschließlich der sie weiter untersetzenden Leitlinien für die Betriebsphase und die Phase nach Verschluss des Endlagers (Abb. 2).



Abbildung 2: Aufbau der Regelwerke für die Endlagerung

Die Sicherheitsphilosophie enthält somit Vorstellungen für die durchzuführenden Arbeiten zur Endlagerung: Bei der Standortauswahl dienen sie der Prüfung von Alternativen, bei der Endlagerplanung und -realisierung sowie beim Betrieb und Verschluss sind sie auf die Minimierung der Risiken gerichtet. Sie tragen dazu bei, die mit der Endlagerung verbundenen Entscheidungen zu Standort, Konzept und konkreter Umsetzung transparent und nachvollziehbar zu machen. Dabei ist zu unterscheiden zwischen Fragen, deren Beantwortung von gesellschaftlichen Entscheidungen abhängt und Fragen, die vorrangig durch Wissenschaft, Ingenieurwesen oder Technik beantwortet werden müssen.

1.3 Warum wird eine Sicherheitsphilosophie für die Endlagerung gebraucht

– und warum jetzt?

Die Sicherheitsphilosophie für die Endlagerung greift die Diskussionen über Endlagersicherheit in den letzten 20 Jahren auf und entwickelt sie weiter. Dabei hat sich das Fehlen allgemein akzeptierter Sicherheitsziele für eine sichere Endlagerung in den sehr

kontrovers geführte Diskussionen bemerkbar gemacht. Hier standen vor allem Fragen zum Nachweis der Langzeitsicherheit der Endlagerprojekte Schacht Konrad und Gorleben wie auch für das Endlager Morsleben im Mittelpunkt. Ein transparenter Vergleich mehrerer Standorte anhand vorher festgelegter Kriterien und ihre nachvollziehbar dokumentierte Bewertung war bisher nicht zentraler Gegenstand der Debatte.

In Folge der Neuausrichtung des Entsorgungskonzeptes ist über den Weg zu einem Endlager für alle Arten radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen jetzt neu zu entscheiden. Dabei soll die Standortauswahl für ein zukünftiges Endlager im Einklang mit den Empfehlungen des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) [1] erfolgen und diese Vorgehensweise gesetzlich festgeschrieben werden.

Für die transparente und nachvollziehbare Gestaltung von Entscheidungen in Endlagerfragen, gleich ob es sich um Standortentscheidungen auf noch vergleichsweise ungesicherter Datenbasis oder um spätere Genehmigungsentscheidungen auf der Grundlage konkreter Prüfkriterien handelt, ist ein allgemein akzeptiertes Grundverständnis über die Endlagersicherheit einschließlich der zugehörigen Bewertungsmaßstäbe erforderlich. Ein solcher Bewertungsmaßstab existiert in Deutschland derzeit nicht in ausreichendem Maße.

Insbesondere gibt es im Hinblick auf die Sicherheit eines verschlossenen Endlagers in Deutschland kein ausreichendes Regelwerk. Atomgesetz (AtG) und Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) sind nicht unmittelbar anwendbar. Die Formulierung allgemeiner Sicherheitsziele und Anforderungen an Bewertungsmaßstäbe ist die Voraussetzung um Auswahlkriterien für einen Endlagerstandort hinsichtlich des Strahlenschutzes zu ergänzen. Weiterhin wird damit eine nachvollziehbare Grundlage für die Formulierung von Sicherheitskriterien als Teil des zu schaffenden Regelwerks gelegt. Ein solcher übergeordneter Rahmen, der die wesentlichen Prinzipien und Schutzziele bei der Sicherheit der Endlagerung und die ihnen zugrunde liegenden Gedanken beschreibt und dabei den gegenwärtigen Stand von Wissenschaft und Technik aufnimmt, fehlt auf der nationalen Ebene.

Damit aber fehlen sowohl Grundlagen für die von der Bundesregierung angestrebte gesetzliche Regelung eines Standort-Auswahlverfahrens als auch für die notwendige Anpassung [2] der aus dem Jahr 1983 stammenden „Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk“ an den Stand von Wissenschaft und Technik.

International anerkannte grundlegende Anforderungen an die Vorgehensweise zur Endlagerung enthält das „Gemeinsamen Übereinkommen vom 5. September 1997 über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle“ (Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung) [3] und die **Safety Fundamentals** der International Atomic Energy Agency (IAEA) von 1995 [4], die sich derzeit ebenfalls in Überarbeitung befinden. Geprägt von der Notwendigkeit, sehr unterschiedliche nationale Konzepte zu erfassen (z.B. auch die oberflächennahe Endlagerung) sind die Safety Fundamentals in ihren Formulierungen sehr allgemein gehalten und im Vergleich zu den Empfehlungen der **International Commission on Radiological Protection** [5] stärker aus der Sichtweise der heutigen Generationen formuliert. Daher können sie die Funktion des notwendigen Rahmens für die Erarbeitung von Auswahl- und Sicherheitskriterien nur eingeschränkt erfüllen. Aus internationaler Sicht ist ein Vorgehen in nachvollziehbaren und sicherheitsgerichteten Schritten eine Voraussetzung für das Vertrauen in eine gesellschaftlich langfristig zu tragende Endlagerentscheidung [6].

Wenn – wie jetzt in Deutschland in einem neuen Ansatz – Alternativen bei der Auswahl von Standorten und Endlagerkonzepten unter Sicherheits-, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten verglichen werden sollen, stellen sich Fragen, für deren Beantwortung andere – zusätzliche – Vorgehensweisen als in den bisher durchgeführten Planfeststellungsverfahren an konkreten Standorten notwendig sind. Für dieses Vorgehen bei der Auswahl, Errichtung, den Betrieb und Verschluss eines Endlagers, das sich in Auswahlverfahren und Genehmigungsverfahren gliedert, sind gesellschaftlich akzeptierte Grundsätze für eine sichere Endlagerung noch notwendiger als schon beim bisherigen Ansatz.

Ziel sollte es sein, in einer Gesellschaft über die Prinzipien und Leitgedanken für die Sicherheit bei der Endlagerung möglichst weitgehender Konsens zu erzielen, dieses hilft eine zügige und an der Sicherheit orientierte Standortentscheidung zu treffen.

Das Bundesamt für Strahlenschutz legt mit diesem Papier in Analogie zu anderen Technikbereichen erstmals eine Sicherheitsphilosophie für die Endlagerung vor. Dabei wird berücksichtigt, dass ein wesentlicher Unterschied zu anderen Technikbereichen besteht. Wegen der „Einmaligkeit“ und Dauer der Endlagerung fehlt der Erfahrungsrückfluss, der bei anderen Technologien wie z.B. Verkehr oder Energieerzeugung eine wesentliche und treibende Rolle bei der Gewährleistung und bei Verbesserung der Sicherheit spielt.

1.4 Wieso entwickelt das BfS eine Sicherheitsphilosophie für die Endlagerung?

Nach dem Atomgesetz ist der Bund verantwortlich, Anlagen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle einzurichten. Das Bundesamt für Strahlenschutz gehört zum Geschäftsbereich des BMU und ist die fachliche Strahlenschutzbehörde des Bundes. In dieser primären Funktion unterstützt und berät es das BMU in allen Belangen des Strahlenschutzes, wobei insbesondere die Abschätzung und Bewertung von Strahlenrisiken hervorzuheben ist.

Da die Sicherheit eines Endlagers in seiner Betriebs- und Nachbetriebsphase insbesondere durch Belange des Strahlenschutzes bestimmt wird, resultiert unmittelbar aus der fachlichen Zuständigkeit des BfS für den Strahlenschutz seine Verantwortung für die Diskussion über grundlegende Fragen zur Sicherheit der Endlagerung und damit die Entwicklung der Sicherheitsphilosophie für die Endlagerung.

Neben seiner Aufgabe als Strahlenschutzbehörde des Bundes ist das BfS nach geltender Rechtslage die zuständige Behörde für die Errichtung und den Betrieb von Anlagen des Bundes zur Sicherstellung und Endlagerung radioaktiver Abfälle. Daher ist in erster Linie das BfS – genau wie andere Betreiber kerntechnischer Anlagen – als Betreiber eines Bundesendlagers für dessen Sicherheit verantwortlich und damit insbesondere verpflichtet, dem im Atomgesetz (AtG) enthaltenen Gebot der atomrechtlichen Schadensvorsorge nachzukommen. Auch in Umsetzung dieses in Artikel 21 des Übereinkommens über nukleare Entsorgung [3] festgehaltenen Prinzips entsteht die Verpflichtung, zentrale Entscheidungs- und Handlungsprinzipien für eine sichere Endlagerung zu entwickeln. Die Beiträge zur Entwicklung der Sicherheitsphilosophie, die aus den beiden Rollen des BfS – als Strahlenschutzbehörde des Bundes wie auch derzeit noch als Antragsteller und Betreiber eines Endlagers – resultieren, beinhalten die Verantwortung, den Stand von Wissenschaft und Technik für die Sicherheit der Endlagerung anzuwenden.

Gleichwohl sieht das BfS den Rollenkonflikt, der mit der gegenwärtigen Rollenverteilung bei der Endlagerung verbunden ist. Das BfS selbst hat auf diese Problematik hingewiesen, und sich für eine Neuordnung der Kompetenzen beim Bund ausgesprochen. Dabei strebt es eine stärkere Rollentrennung an.

Das BfS hat die seinem heutigen Erfahrungs- und Kenntnisstand entsprechenden grundlegenden Zielvorstellungen zum Strahlenschutz und zur Sicherheit in der Sicherheitsphilosophie für die Endlagerung formuliert. Die Anwendung der regulatorischen Konsequenzen, die aus der Sicherheitsphilosophie zu ziehen sind, soll im Rahmen des

Standortauswahlverfahrens und des sich anschließenden Genehmigungsverfahrens bei der beabsichtigten Neuordnung der Endlagerung dann durch den neu vorgesehenen Antragsteller und Betreiber erfolgen.

Das BfS lässt sich in seiner Sicherheitsphilosophie für die sichere Endlagerung von der Überzeugung leiten, dass eine gesellschaftliche Verständigung über die Lösung der Endlagerfrage nur dann gefunden werden kann, wenn die erforderlichen Entscheidungen in einem offenen und transparenten Verfahren getroffen werden. Aus diesem Grund will das BfS seine Zielvorstellungen nicht isoliert entwickeln, sondern sucht hierzu die Auseinandersetzung mit allen interessierten Kreisen der Fachwelt und Gesellschaft. Erforderlich ist eine Diskussion über seine Zielvorstellungen zum Schutz von Mensch und Umwelt bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle.

Nach Abschluss dieses Prozesses (siehe Anhang 4) und der daraus resultierenden Fassung der Sicherheitsphilosophie – d. h. unter Einbeziehung der Ergebnisse der o. a. Diskussion - sollen sie für den zukünftigen Antragsteller und die Genehmigungsbehörde eines Endlagers die Handlungsanweisung sein, um Wege für eine sichere Endlagerung der radioaktiven Abfälle aufzuzeigen. Neben dem selbstverpflichtenden Charakter der Sicherheitsphilosophie sollen sie aber als Schlussfolgerungen zum aktuellen Stand der Wissenschaft Ausgangspunkt für weitergehende Regelungen gesetzlicher und untergesetzlicher Art sein, die vom Gesetzgeber und dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zu schaffen sind.

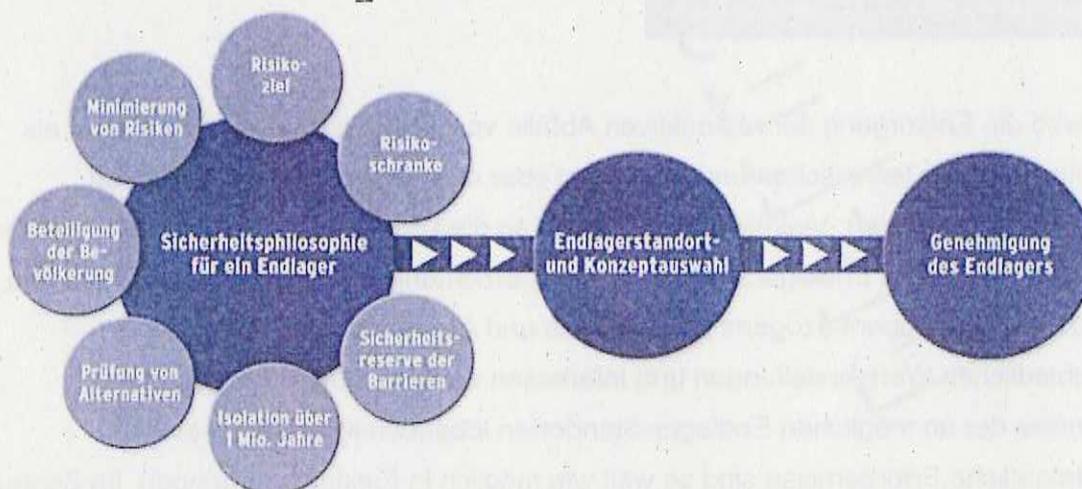


Abbildung 3: Sicherheitsphilosophie als Grundlage für Standortauswahl und Genehmigung eines Endlagers

2 Entsorgung radioaktiver Abfälle als eine gesellschaftliche Herausforderung

Die heutigen Generationen haben mit der Entscheidung, Elektrizität in Kernkraftwerken zu erzeugen, den Großteil des vorhandenen radioaktiven Abfalls verursacht. Zwar nimmt das Gefährdungspotenzial dieser Abfälle mit der Zeit ab, aber selbst nach einer Zeit von mehr als einer Million Jahre stellen vor allem die abgebrannten Brennelemente und Wärmerezeugenden Abfälle ein hohes Gefährdungspotenzial für die dann lebenden Menschen dar. Die sichere Entsorgung der radioaktiven Abfälle ist also eine dringende Aufgabe in der Verantwortung der verursachenden Generationen. Bezogen auf die Endlagerung wird diese Einstellung von einem großen Teil der deutschen Bevölkerung geteilt (Abb. 4).

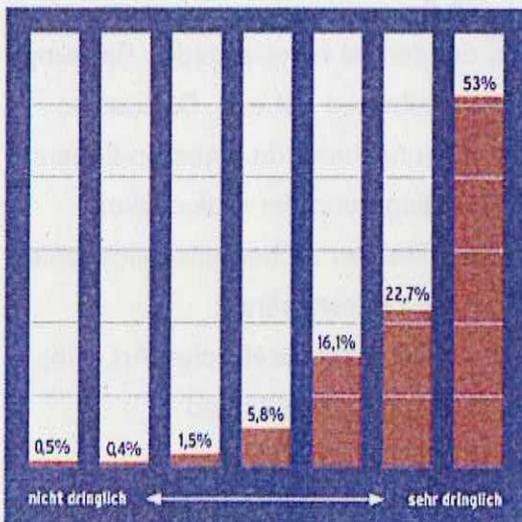


Abbildung 4 : Für wie dringlich halten Sie das Problem der Endlagerung?
ITAS, 2002: Ergebnisse der repräsentativen Bevölkerungsumfrage (Bericht im Auftrag des BfS zur fachlichen Unterstützung des AkEnd durch das Institut für Technologiefolgeabschätzung und Systemanalyse)

Dabei wird die Entsorgung der radioaktiven Abfälle von Teilen der Gesellschaft nicht als Ergebnis einer rein technischen und vom Staat oder den Verursachern getroffenen Entscheidung akzeptiert. Vielmehr knüpfen sich an die Umsetzung von Entsorgungsplänen, wie die Auswahl eines Endlagerstandortes sowie Errichtung und Betrieb eines Endlagers, individuelle und gruppenbezogene Erwartungen und Anforderungen, die sich aus unterschiedlichen Wertvorstellungen und Interessen speisen. Lokale und regionale Bedürfnisse der an möglichen Endlager-Standorten lebenden Menschen sowie gesamtstaatliche Erfordernisse sind so weit wie möglich in Einklang zu bringen. Im Zentrum steht auch die ethisch begründete Forderung nach gerechter Verteilung der mit der Nutzung der Kernenergie und der Entsorgung der dabei entstehenden Abfälle verbundenen Vor- und Nachteile.

2.1 Verantwortung der heutigen Generation für eine Lösung



Abbildung 5: Landessammelstellen und Zwischenlager in der Bundesrepublik

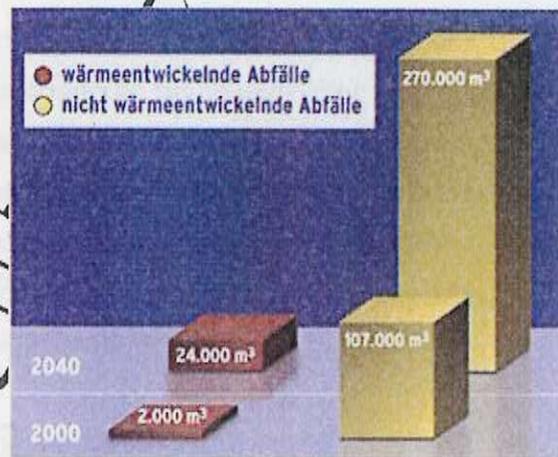


Abbildung 6: Radioaktive Abfälle in Deutschland im Jahr 2000 und 2040 (Beendigung der Kernenergienutzung etwa 2021)

Unterschiedliche Wertvorstellungen und Interessen dürfen nicht dazu führen, dass realisierbare Lösungen zur Entsorgung radioaktiver Abfälle auf Dauer verhindert bzw. bewusst verzögert werden und somit die Lösung auf zukünftige Generationen oder in andere Länder verschoben wird. Vielmehr muss heute eine Generationen übergreifende gerechte Lösung in Deutschland gesucht werden. Damit ist die Realisierung in eigener Verantwortung möglich. Eine in diesem Sinne gerechte Lösung lässt sich nur in einem gesellschaftlichen Diskurs entwickeln.

Es muss eine Lösung angestrebt werden, die sich bei Vorrang des Schutzes von Mensch und Umwelt in einem transparenten Entscheidungsprozess mit sorgfältiger Abwägung unterschiedlicher Werthaltungen und Interessen als die Lösung mit den größten Vorteilen erweist. Dabei müssen folgende Prinzipien beachtet werden:

1. Die Gesundheit des Individuums ist zu schützen. Das bedeutet, dass die Risiken für Einzelne in ihrer Höhe absolut zu begrenzen und darunter soweit wie möglich zu minimieren sind.
2. Die Lösung darf nicht zu unbilligen Belastungen zukünftiger Generationen und der Umwelt führen. Es muss somit heute eine Lösung angestrebt werden, die zukünftige Generationen unter keinen Umständen Risiken aussetzt, die wir selber heute nicht akzeptieren.
3. Die betroffene Bevölkerung muss an der Erarbeitung der Entsorgungslösung beteiligt werden. Individuelle und gruppenbezogene Interessen müssen in die Abwägung einfließen. Die Sicherheitsbedürfnisse der Allgemeinheit müssen dabei allerdings vorrangig berücksichtigt werden. Die mit der Entsorgung radioaktiver Abfälle verbundenen bzw. etwa daraus resultierenden infrastrukturellen Nachteile sollen in angemessener Weise so ausgeglichen werden, dass dies zum langfristigen Wohl der Bevölkerung in der betroffenen Region beiträgt.
4. Das Verfahren, mit dem eine Lösung für die Endlagerung gefunden werden soll, muss strengen Anforderungen genügen, und insbesondere ergebnisoffen und verlässlich sein. Es müssen die Entscheidungsgrundlagen und -regeln offengelegt und die Entscheidungen transparent gefällt werden. Eine Überprüfung und gegebenenfalls die Korrektur von Einzelentscheidungen muss ermöglicht werden.

Als obere Strahlenschutzbehörde des Bundes kann das BfS zur Einhaltung der ersten beiden der oben angeführten vier Prinzipien maßgeblich beitragen. Für das dritte und vierte Prinzip gilt dies nur eingeschränkt. Die Beteiligung der Bevölkerung an der Erarbeitung einer Entsorgungslösung muss in einem von der Gesellschaft und ihren Verfassungsorganen festzulegenden Verfahren erfolgen. Die Öffentlichkeitsbeteiligung im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung für ein Endlager und die Erörterung von Einwänden im Rahmen eines Planfeststellungsverfahrens genügen den im dritten und vierten Prinzip gestellten Anforderungen alleine nicht, sondern es müssen

- die gesellschaftlichen Auswirkungen eines Endlagers in der betroffenen Region an Hand von sozioökonomischen Potenzialanalysen untersucht und
- regionale Entwicklungskonzepte mit der Bevölkerung erarbeitet werden.

2.2 Verpflichtung gegenüber zukünftigen Generationen

Bei Entscheidungen zur Entsorgung radioaktiver Abfälle müssen deren langfristige Folgen beachtet und mögliche Handlungen sowie die Bedürfnisse zukünftiger Generationen einbezogen werden. In der Forderung nach einer verantwortungsvollen Entsorgung aller Arten radioaktiver Abfälle bedeutet dies folgendes:

- Die anfallenden Mengen radioaktiver Abfälle sind zu begrenzen.
- Es muss eine "bestmögliche" realisierbare Lösung angestrebt werden (siehe Kapitel 2.4).
- Zukünftige Generationen müssen sich in den Möglichkeiten zur Befriedigung ihrer Bedürfnisse voll entfalten können und dürfen in der Wahl ihres Lebensstils so wenig wie möglich eingeschränkt werden. Einschränkungen für zukünftige Generationen würden sich ergeben, wenn die langfristigen Auswirkungen eines Entsorgungsweges als nicht unerhebliche Risiken empfunden werden, die Aufrechterhaltung eines sicheren Zustandes des gewählten Entsorgungsweges einen hohen Aufwand für spätere Generationen erfordert oder die angestrebte Entsorgungslösung mit erheblichen Einschränkungen für andere Nutzungen verbunden ist.
- Auch die kommenden Generationen benötigen Handlungsspielräume. Ausgehend von dem allgemein akzeptierten Grundsatz, dass zukünftige Generationen keinen höheren Risiken ausgesetzt sein sollen als für uns heute zumutbar sind, bedeutet dies, dass durch heute verursachte Risiken nicht schon die zumutbaren Risiken für die zukünftigen Generationen ausgeschöpft werden dürfen.
- Das Schutzbedürfnis zukünftiger Menschen selbst ist unbekannt. Daraus resultiert die Verpflichtung, langfristige Risiken soweit zu minimieren, dass das verbleibende Risiko als unerheblich bzw. tolerierbar angesehen werden kann.
- Die Verbreitung von stark radioaktiv strahlenden Materialien und von Spaltstoffen, die zum Bau von Atomwaffen verwendet werden können, ist zu verhindern (Proliferationsrisiko).
- Die Umwelt darf in ihren Entfaltungsmöglichkeiten nur unerheblich beeinträchtigt und in ihrer Anpassungsfähigkeit nicht überfordert werden.

- Die radioaktiven Abfälle müssen schon aus Strahlenschutzgründen langfristig konzentriert und isoliert werden. Es muss ein möglichst sicherer Ort zur Aufbewahrung gewählt werden. Der Ort muss langfristig bekannt bleiben, damit nachfolgenden Generationen die Möglichkeit offen steht, prinzipiell eine andere Lösung zu realisieren. Die Abfälle könnten, wenn auch mit hohem technischen Aufwand, wieder geborgen werden. Somit sind Konzentration und Isolation Voraussetzung für eine prinzipiell reversible (umkehrbare) Lösung. Eine Lösung, bei der die Entsorgung radioaktiver Abfälle auf Verdünnung beruht, wie z. B. die Verklappung in den Meeren oder die Verteilung in der Luft, scheiden somit aus.

Für die Einschätzung, ob ein entsorgungsstrategisches und -technisches Handeln langfristig verantwortbar ist, wird von einer gewissen Kontinuität allgemeiner menschlicher Erwartungen an das Leben und der damit verbundenen Wertvorstellungen, Bedürfnisse und Interessen ausgegangen.

2.3 Endlagerung - ein Weg ohne Alternativen

Für die heute existierenden und bis zur Realisierung des Ausstiegs aus der Kernenergie anfallenden radioaktiven Abfälle hat die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen gegenüber anderen Entsorgungsstrategien im Hinblick auf das erreichbare Sicherheitsniveau und die zeitnahe Realisierbarkeit selbst bei Berücksichtigung der Kosten die meisten Vorteile. Nachteile sind allerdings, dass die Sicherheit eines Endlagers für einen sehr langen Zeitraum gezeigt und bewertet werden muss und dass sich die im Endlager ablaufenden Prozesse nach Verschluss des Endlagers nicht mehr beobachten lassen. Diese Nachteile sind jedoch nach Ansicht des BfS beherrschbar und deutlich geringer als bei anderen Entsorgungsoptionen, wenn folgende Ziele erreicht werden:

- die Schadstoffe werden für einen Zeitraum von mindestens einer Million Jahre eingeschlossen und
- die Langzeitsicherheit des Endlagers stützt sich hauptsächlich auf die Zuverlässigkeit der geologischen und geotechnischen Barrieren; technische Barrieren tragen allenfalls ergänzend und nur für begrenzte Zeiträume zur Sicherheit bei.

Es muss demnach ein Endlager mit dem Ziel ausgewählt werden, die radioaktiven Schadstoffe möglichst lange in dem durch geologische und geotechnische Barrieren

begrenzten Bereich des Endlagers zu isolieren (einschlusswirksamer Gebirgsbereich, siehe Glossar) und damit von Menschen und belebter Umwelt fernzuhalten. Der Einschluss der Schadstoffe im einschlusswirksamen Gebirgsbereich muss für den Zeitraum bewertet werden, in dem von den eingelagerten Stoffen eine Gefahr ausgehen kann. Nach dem gegenwärtigen Stand von Wissenschaft und Technik sind jedoch für einen Vergleich von Alternativen ausreichend zuverlässige Prognosen nur für einen Zeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahre möglich.

Für Zeiträume jenseits von einer Million Jahre können, abgeleitet aus Kenntnissen über geologische Entwicklungen in Deutschland, keine zuverlässigen Prognosen über die Entwicklung eines Endlagers gemacht werden. Die Datengrundlage ist hier nicht ausreichend vertrauenswürdig, um sicherheitsgerichtete Entscheidungen zu fällen. Die radioaktiven Abfälle enthalten aber Isotope, die Halbwertszeiten von deutlich länger als eine Million Jahre aufweisen (z. B. das radiotoxische Np-237 mit einer Halbwertszeit von 2,1 Millionen Jahren). Daher muss der Endlagerstandort so gewählt werden, dass keine Hinweise für eine abrupte Veränderung des Isolationsvermögens für die Zeitspanne nach einer Million Jahre ableitbar sind.

Die Vorteile einer solchen geologischen Endlagerung radioaktiver Abfälle überwiegen die am Anfang des Kapitels genannten Nachteile aus folgenden Gründen:

- Endlager in tiefen geologischen Formationen sind passive Systeme, bei denen nach dem Verschluss zur Erhaltung der Sicherheit keine Betreuung durch den Menschen erforderlich ist. Die Sicherheit ist damit weder von Problemkenntnis und -bewusstsein noch den technischen und ökonomischen Möglichkeiten künftiger Generationen abhängig.
- In einer günstigen geologischen Gesamtsituation kann eine sehr gute Barrierenwirkung erzielt werden. So wird der radioaktive Abfall für den geforderten Zeitraum von der Biosphäre isoliert.
- Das Risiko, dass stark radioaktiv strahlende Materialien und zum Bau von Atomwaffen geeignete spaltbare Stoffe aus einem verschlossenen Endlager unbemerkt entwendet werden, ist äußerst gering, da eine Entwendung nur mit großem technischen Aufwand möglich ist, der nicht unbemerkt erfolgen kann.

- Die Wahrscheinlichkeit für ein unbeabsichtigtes Eindringen des Menschen in das verschlossene Endlager oder die Auswirkungen eines Meteoriteneinschlages sowie anderer von der Erdoberfläche ausgehender Ereignisse auf das Endlager sind bereits wegen dessen Lage im tiefen Untergrund gering. Durch entsprechende Standortwahl und seine gezielte Auslegung können sie weiter reduziert werden (z. B. durch die Vermeidung potenziell wirtschaftlich interessanter Lagerstätten).
- Die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ist mit den bestehenden Technologien aus Bergbau und Ingenieurtechnik in einem akzeptablen Zeitrahmen realisierbar. Damit kann die Entsorgung radioaktiver Abfälle von den heutigen Generationen mit kalkulierbaren Kosten auch tatsächlich verwirklicht werden.

Die zur Endlagerung in tiefen geologischen Formationen denkbaren Alternativen können vergleichbare Vorteile nicht auf sich vereinen. Sie weisen auf Grund unzureichender Isolation von der Umwelt oder wesentlich höherer Risiken deutliche Sicherheitsnachteile auf (z. B. die Endlagerung in der Antarktis oder im Meer bzw. der Transport von Abfällen in den Weltraum). Bei anderen Optionen (z. B. Endlagerung im Meeresboden) kommt hinzu, dass sie in absehbarer Zeit aus technischen und finanziellen Gründen nicht umsetzbar sind.

Auch die Abtrennung langlebiger Radionuklide aus dem Abfall und ihre Umwandlung in kurzlebige bzw. stabile (nicht radioaktive) Isotope (Transmutation) ist auf absehbare Zeit nicht realisierbar. Diese Methode ist nach wie vor Gegenstand der Forschung. Außerdem ist sie mit dem Betrieb kerntechnischer Anlagen und chemischer Abtrennanlagen verbunden, deren Umfang den der - in Deutschland aufgegebenen - Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente weit übertrifft. Und schließlich müssten auch bei dieser Entsorgungsstrategie Abfälle endgelagert werden, da nicht alle langlebigen Isotope in kurzlebige bzw. stabile umgewandelt werden können. Diese Option weiterzuverfolgen, ist unter diesen Gesichtspunkten nicht sinnvoll.

Eine Langzeitzwischenlagerung (z. B. über mehrere hundert Jahre) erfordert die aktive Betreuung des Zwischenlagers und ist mit Sicherheitsnachteilen, Strahlenexpositionen und Verpflichtungen zukünftiger Generationen verbunden.

Die Entsorgung der radioaktiven Abfälle ist weder mit Abtrennung und Transmutation noch mit der Langzeitzwischenlagerung abschließend geregelt. Beide Optionen verschieben vielmehr das Entsorgungsproblem auf spätere Generationen.

2.4 Bestmögliche Lösung

Von den heutigen Möglichkeiten für die Entsorgung radioaktiver Abfälle ist die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen somit die beste realisierbare Entsorgungsalternative. Realisierbar heißt, dass nicht unbedingt die absolut sicherste Lösung gefunden werden muss, sondern unter dem Vorrang von Sicherheitsaspekten aus gesellschaftlich akzeptablen, technisch machbaren und bezahlbaren Alternativen unter Beteiligung der Bevölkerung die beste Lösung ausgewählt wird. Dabei darf der Auswahlprozess für ein Endlager nicht dazu führen, dass die Realisierung der Lösung auf unbestimmte Zeit verschoben wird, denn dadurch werden ebenfalls Risiken verursacht. In den Auswahlprozess dürfen nur Alternativen einbezogen werden, die aus unserer heutigen Sicht der Idealvorstellung nach vollständiger Isolation der Abfälle von der Umwelt nahe kommen können. In diesem Sinne ist das dann ausgewählte Endlager als bestmögliches Endlager zu bezeichnen. Die Auswahl beinhaltet die Entscheidung zwischen verschiedenen Endlagerstandorten und darauf abgestimmten Einlagerungs- und Anlagenkonzepten.

3 Sicherheitskonzept für ein Endlager

Für das Sicherheitskonzept eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen ist zu unterscheiden zwischen

- der Betriebsphase, in der radioaktive Abfälle angeliefert und eingelagert werden sowie mit fortschreitender Einlagerung der Zustand hergestellt wird, der für das verschlossene Endlager kennzeichnend ist und
- der Phase nach Verschluss des Endlagers, in der das Endlager stillgelegt und langfristig sicher verschlossen sich selbst überlassen ist.

Die heute in Deutschland entsprechend internationaler Standards für den Betrieb kerntechnischer Anlagen angewandten Strahlenschutzgrundsätze und -regelungen reflektieren das politisch akzeptierte radiologische Schutzniveau der heutigen Generationen. Sie sind Basis für die Bewertung der Sicherheit des Endlagers in der Betriebsphase und dienen als Ausgangspunkte für die Ausarbeitung eines Schutzkonzepts für das verschlossene Endlager.

3.1 Gestaffelte Sicherheitsebenen für die Betriebsphase

Während der Betriebsphase des Endlagers muss die Sicherheit für Mensch und Umwelt – wie bei anderen kerntechnischen Anlagen auch – durch technische und administrative Maßnahmen gewährleistet werden. Bei den mit der Endlagerung verbundenen Handhabungen radioaktiver Abfälle sowie allen sonstigen Tätigkeiten muss die Beachtung und Einhaltung aller zum jeweiligen Zeitpunkt einschlägigen Vorschriften zugrunde gelegt werden.

Für die Sicherheit des Endlagers in der Betriebsphase ist ein in vier Ebenen gestaffeltes Sicherheitskonzept anzuwenden, wie es analog auch für Kernkraftwerke gilt (siehe Tabelle 1). Die Zuordnung der vier Ebenen zu Anlagenzuständen und die für diese Anlagenzustände zu ergreifenden oder vorgesehenen Schutzmaßnahmen beinhaltet das sogenannte **Konzept der gestaffelten Abwehrmaßnahmen** (engl.: defence in depth; siehe Glossar oder auch [7]).

Auslegungsprinzipien kerntechnischer Anlagen wie Redundanz (mehrfach vorhandene gleichartige Schutzsysteme), Diversität (unterschiedliche Schutzsysteme zur Beherrschung

gleicher oder ähnlicher Störungen) und die Forderung nach fehlerverzeihenden Techniken werden der technischen Umsetzung zugrunde gelegt. Diese vier Ebenen und die zugehörigen Maßnahmen müssen entsprechend der Anforderungen und spezifischen Eigenheiten des Endlagers konkretisiert werden.

Sicherheitsebene	Anlagenzustände		Maßnahmen
1	Bestimmungsgemäßer Betrieb	Normalbetrieb	Qualität der Betriebssysteme und der betrieblichen Abläufe sowie sicherheitsgerichtetes Handeln Verhinderung von Betriebsstörungen
2		Anomaler Betrieb	Inhärent sicheres Anlagenverhalten Verhinderung von Auslegungsstörungen
3	Auslegungsstörungen		Inhärent sicheres Anlagenverhalten, passive und aktive Sicherheitseinrichtungen Beherrschung von Auslegungsstörungen
4	Auslegungsüberschreitende Störungen/Ereignisse		Maßnahmen des anlageninternen und anlagenexternen Notfallschutzes Begrenzung der Umgebungsauswirkungen

Tabelle 1: Sicherheitsebenen für die Betriebsphase eines Endlagers

Für die in einer Endlagerregion lebende Bevölkerung wird vor allem die Sicherheit des Endlagers in der Betriebsphase von besonderer Bedeutung sein. Zum einen wird der Transport radioaktiver Abfälle zum Endlager ihre Handhabung und Lagerung im Endlager und die Vermeidung einer Verbreitung spaltbarer Stoffe und stark radioaktiv strahlender Materialien Gegenstand der sicherheitstechnischen Bestimmungen der Betriebserlaubnis sein. Im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung sind zum anderen die Veränderung der Infrastruktur, des Naturhaushaltes und des Landschaftsbildes zu betrachten. Alle diese Aspekte sowie in besonderem Maße gesellschaftliche Auswirkungen sollen mit der betroffenen Bevölkerung erörtert und nach Möglichkeit gemeinsam mit ihr gestaltet werden. Dazu hat der Gesetzgeber einen geeigneten Rahmen vorzugeben.

3.2 Entwicklungskategorien für das verschlossene Endlager

Im Vordergrund einer Sicherheitsphilosophie für die Endlagerung steht das verschlossene Endlager, also die Phase nach dem Einschluss sämtlicher radioaktiver Abfälle. Für das verschlossene Endlager müssen - anders als bei Sicherheitsphilosophien in anderen Technikbereichen (z.B. Luftfahrt, Kernkraftwerk) - Sicherheitsanforderungen besonderer Art gelten, weil der Mensch nicht mehr als Betreiber dieses Endlagers eingreifen kann und soll. Es fehlt der Erfahrungsrückfluss, der bei der Sicherheitsphilosophie anderer Technologien einen hohen Stellenwert hat. Deshalb muss ein Endlager so geplant, errichtet, betrieben und verschlossen werden, dass die Abfälle langfristig sicher verwahrt sind, ohne dass für die

dauerhafte Sicherheit von Mensch und Umwelt Maßnahmen zur Instandhaltung oder Überwachung erforderlich sind. Das bedeutet auch, dass eine Rückholung der radioaktiven Abfälle, für die von vornherein technische Möglichkeiten im Endlager eingeplant werden müssten, nicht vorgesehen ist.

Für die Planung des Endlagers soll der Einschluss der Schadstoffe im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (siehe Glossar) für den Zeitraum bewertet werden, für den nach Stand von Wissenschaft ausreichend zuverlässige Prognosen erstellt werden können. Dies ist für einen Zeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahre möglich. Diesen Betrachtungszeitraum schlägt das Bundesamt für Strahlenschutz als Bewertungsrahmen für die Beurteilung der Langzeitsicherheit und für Entscheidungen über Alternativen vor.

Durch die geologische Gesamtsituation und die zu treffenden Verschlussmaßnahmen soll der vollständige Einschluss der radioaktiven Abfälle dauerhaft erreicht werden. Für die Bewertung der Langzeitsicherheit müssen alle sicherheitsrelevanten Ereignisse und Prozesse im vorgegebenen Zeitraum betrachtet werden.

Die Suche eines Endlagerstandortes sowie die Planung und Auslegung des Endlagers erfolgen in mehreren Schritten. Dabei nimmt das Wissen über Standorteigenschaften und Verhalten (Performance) des Endlagers von Schritt zu Schritt zu. Das Risiko, das von einem Endlager ausgeht, kann deshalb in den ersten Schritten im Rahmen der Alternativenprüfung zunächst nur qualitativ bewertet werden. Erst bei Vorliegen einer ausreichend umfangreichen Datenbasis kann das Risiko dann auch quantitativ eingeschätzt werden. Dazu werden verschiedene mögliche Entwicklungen des Endlagersystems unter Berücksichtigung ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit betrachtet.

Die Auswahl eines Endlagerstandortes sowie Planung und Auslegung eines langzeitsicheren Endlagers muss vorhersehbar wahrscheinliche und andere mögliche künftige Entwicklungen eines Endlagers berücksichtigen. Die Bewertung einer Alternative muss in dieser Phase für einen repräsentativen Satz möglicher Entwicklungen möglichst realitätsnah erfolgen, da ansonsten die getroffenen Annahmen die Bewertung stärker beeinflussen als die Eigenschaften der Alternativen selber.

Da die Wahrscheinlichkeiten, mit denen mögliche Entwicklungen eintreten, und die Beschreibungen dieser Entwicklungen nicht ohne verbleibende Unsicherheiten ermittelt werden können, ist auch das tatsächlich von einem Endlager ausgehende Risiko nicht exakt zu berechnen. Es ist aber möglich, dieses Risiko näherungsweise zu bestimmen. Im

Rahmen der Bewertung von Alternativen soll deshalb das Ziel verfolgt werden, mit den Berechnungen dem tatsächlichen Risiko so nahe wie möglich zu kommen. Im späteren Genehmigungsverfahren kann es allerdings angebracht sein, im Rahmen der Nachweisführung zur Sicherheit eines Endlagers einen Risikowert zu ermitteln, der mit hoher Zuverlässigkeit höher ist als das tatsächliche Risiko. Dadurch wird die Einhaltung der dann geltenden gesetzlichen Vorgaben sichergestellt.

Die Bewertung von Alternativen soll vorrangig auf einer möglichst realitätsnahen Einschätzung von vorhersagbar wahrscheinlichen Entwicklungen basieren. Solche Entwicklungen werden nachfolgend als **zu erwartende Entwicklungen** bezeichnet. Die Auswirkungen dieser Entwicklungen sind dann in Hinblick auf ein Risiko für den Menschen abzuschätzen und zu bewerten, wobei die Wirkungen von Schadstoffen in Boden, Wasser und Luft auf die Menschen ebenfalls so realistisch wie möglich berechnet werden sollen.

Für Entwicklungen mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit ist die quantitative Angabe der Eintrittswahrscheinlichkeit sowie die Beschreibung der Entwicklung zu Beginn der Alternativenprüfung meist so ungenau, dass quantitative Abschätzungen der Strahlenexposition und des Risikos mit erheblichen Unsicherheiten verknüpft sind. Ergänzend zu den zu erwartenden Entwicklungen sollen dennoch diese erkennbar weniger wahrscheinlichen Entwicklungen - soweit sie praktisch vernünftig begründbar sind - in der Alternativenprüfung betrachtet und bewertet werden. Diese Entwicklungen werden nachfolgend als **außergewöhnliche Entwicklungen** bezeichnet.

Die geologischen Barrieren am Standort müssen soviel zusätzliche Sicherheit geben, dass selbst bei außergewöhnlichen Entwicklungen, für die der vollständige Einschluss im einschlusswirksamen Gebirgsbereich nicht über den gesamten Nachweiszeitraum und für alle Schadstoffe sichergestellt werden kann, die Risiken aus einer möglichen Freisetzung von Schadstoffen aus den Abfällen gering sind. Außerdem müssen Standortauswahl, Entscheidung für ein Endlagerkonzept und Anlagenauslegung so erfolgen, dass die Summe der Wahrscheinlichkeiten verschiedener bzw. unabhängiger außergewöhnlicher Entwicklungen im Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre klein ist.

Entwicklungen z.B. in Folge eines Meteoriteneinschlages, dessen konventionelle Auswirkungen alle denkbaren radiologischen Auswirkungen übersteigen, oder menschliches Eindringen in das Endlager z. B. zur Rohstoffsuche bilden eine dritte Kategorie und werden als **spezielle Entwicklungen** bezeichnet. Diese sollen soweit sinnvoll in der Prüfung alternativer Standorte und Anlagenkonzepte ebenfalls bewertet werden, und es sollen soweit möglich Maßnahmen zur Minimierung damit noch verbundener Risiken getroffen werden. So

kann beispielsweise die Wahrscheinlichkeit eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Barrierensystem des Endlagers durch eine geeignete Standortauswahl und Endlagerauslegung minimiert werden.

Auswirkungen und Eintrittswahrscheinlichkeiten der speziellen Entwicklungen sollen so weit möglich reduziert werden. Eine sinnvolle Risikobegrenzung ist für diese aber nicht möglich.

Insgesamt ergibt sich durch die oben dargestellte Kategorisierung im Hinblick auf die Langzeitsicherheit als Auslegungsprinzip die in Tabelle 2 dargestellte hierarchisch gestaffelte Vorgehensweise zur Auswahl und Bewertung von Alternativen.

Diese Entwicklungskategorien für das verschlossene Endlager haben somit bewusst eine andere Funktion als die weiter oben dargestellten Sicherheitsstufen für das Endlager während der Betriebsphase.

Entwicklungs-kategorie	Beispiele	Maßnahmen
1. Zu erwartende Entwicklungen	Klima-änderungen	Sorgfältige Auswahl des Standortes
	Erosion	Sicherheitsabstand zu den Belastungsgrenzen der geologischen Barrieren
	Wärme-entwicklung	Verschluss des Endlagers gemäß Stand von Wissenschaft und Technik
	Gasbildung Konvergenz	
2. Außerge-wöhnliche Entwicklungen	Reaktivierung von Kluffzonen	Bewertung der Sicherheitsreserven des Standortes
	Materialfehler in Schachtabdichtung	Anordnung zusätzlicher Barrieren
3. Spezielle Entwicklungen	Unbeabsichtigtes menschliches Eindringen	Übermittlung der Information Standortauswahl Anlagenauslegung
	Meteoriten-einschlag	Standortauswahl

Tabelle 2: Entwicklungskategorien für das verschlossene Endlager

Die **erste Entwicklungskategorie** (zu erwartende Entwicklungen) muss ausschlaggebend für die Prüfung alternativer Endlagerstandorte, der jeweiligen Anlagenplanungen und die daraus resultierenden Entscheidungen sein. Erreicht werden muss, dass durch die

sorgfältige und qualifizierte Standortauswahl, durch die gewählte Anlagenauslegung und durch das Konzept für den Verschluss des Endlagers nach Stand von Wissenschaft und Technik der zuverlässige, gut beschreibbare und wartungsfreie, dauerhafte Einschluss der radioaktiven Abfälle sicher erwartet werden kann. Die zuverlässige Funktion des Endlagers muss dabei im Vordergrund der Beurteilung stehen. Dies beinhaltet auch, dass Sicherheitsabstände zu den Grenzen der zulässigen Belastung der geologischen Barrieren durch vom Endlager ausgehende Einwirkungen, die z.B. durch den zur Errichtung erforderlichen Bergbau sowie den Wärmeeintrag und die Gasbildung aus den radioaktiven Abfällen auftreten, eingehalten werden sollen. Damit wird erreicht, dass für die zu erwartenden Entwicklungen von den radioaktiven Abfällen allenfalls ein unerhebliches Risiko (siehe Glossar) für Mensch und Umwelt ausgehen wird.

In der **zweiten Entwicklungskategorie** (außergewöhnliche Entwicklungen) werden die Sicherheitsreserven der geologischen Barrieren und der möglicherweise ergänzenden geotechnischen und technischen Barrieren herangezogen. Es muss erreicht werden, dass auch für außergewöhnliche Entwicklungen nur eine begrenzte Freisetzung von Schadstoffen aus dem Endlager zu erwarten ist und dass hierdurch tolerierbare Risiken für den Menschen nicht überschritten werden. Wegen der besonderen Gefährlichkeit der hoch radioaktiven Abfälle in den ersten 10.000 Jahren muss die Auslegung des Endlagers auch für außergewöhnliche Entwicklungen zuverlässig verhindern, dass in diesem Zeitraum radioaktive Stoffe in die belebte Umwelt gelangen. Zusätzlich muss die Summe der Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten aller voneinander unabhängigen außergewöhnlichen Entwicklungen klein sein. Einzelfallbetrachtungen müssen durchgeführt werden, wenn die Konsequenzen einer einzelnen außergewöhnlichen Entwicklung einen starken Einfluss auf das vom Endlager ausgehende Gesamtrisiko haben können. Die Risikobewertungen dieser zweiten Kategorie sollen die aus der ersten Kategorie getroffene Entscheidung stützen. Möglicherweise zusätzlich vorgesehene geotechnische und technische Barrieren sollen zur Minimierung von Risiken beitragen.

In die **dritte Entwicklungskategorie** (spezielle Entwicklungen) werden Entwicklungen eingeordnet, die mit einem nicht bewertbaren Risikobeitrag für Mensch und Umwelt grundsätzlich hingenommen werden müssen. Dennoch soll durch ihre Bewertung geprüft werden, ob die Standortauswahl und Endlagerauslegung im Hinblick auf die Auswirkungen der speziellen Entwicklungen optimiert werden können.

Eine mögliche Zuordnung von Entwicklungen des Endlagers zu den drei o.g. Entwicklungskategorien mit Hilfe von Szenarien enthält Anhang 1.

3.3 Festlegung des Schutzniveaus durch die Gesellschaft

Das zu erreichende Schutzniveau soll aufbauend auf wissenschaftlicher Erkenntnis und unter Berücksichtigung gesellschaftlicher Wertvorstellungen in einem offenen gesellschaftlichen Diskurs festgelegt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Akzeptanz von Risiken in fast allen Fällen stark von der Wahrnehmung dieses Risikos abhängt. Für einen Diskurs über das zu erreichende Schutzniveau ist daher notwendigerweise davon auszugehen, dass die gesellschaftliche Diskussion über Risiken, die von einem Endlager ausgehen dürfen, klar unterscheidbar ist von der wissenschaftlichen Diskussion über die Berechnung von Risiken. Insofern werden sich die gesellschaftliche Diskussion, die wesentlich bestimmt wird durch Werte und Normen einer Gesellschaft, und die Fachdiskussion immer gegenseitig beeinflussen. Um in diesem Spannungsfeld die erforderliche gesellschaftliche Legitimation für das Schutzkonzept eines Endlagers zu erreichen, sind daher eine klar strukturierte Risikokommunikation sowie Information und eine ausreichende Beteiligung hilfreich und erforderlich.

Von besonderer Bedeutung in der hier dargelegten Sicherheitsphilosophie für die Endlagerung sind aus der Sicht des Strahlenschutzes die Begriffe **Risikoziel** und **Risikoschranke**. Sie dienen der Umsetzung der beiden Strahlenschutzgrundsätze zur Begrenzung und Minimierung der Strahlenbelastung. Für die Risikoschranke soll ein quantitativer Wert für das Individualrisiko gewählt werden, der weder von den zu erwartenden noch von den außergewöhnlichen Entwicklungen eines Endlagers überschritten werden darf (**tolerierbares Risiko**). Für den Strahlenschutz stellt dieses tolerierbare Risiko somit ein oberes Akzeptanzkriterium dar, um den Gesundheitsschutz der Menschen zu gewährleisten. Auf der anderen Seite bildet das Risikoziel eine untere quantitative Beschreibung des Individualrisikos, unterhalb dessen weitere Überlegungen des Gesundheitsschutzes und des Strahlenschutzes nicht mehr vorrangig erforderlich sind (**unerhebliches Risiko**). Endlagersysteme, das heißt Endlagerstandorte mit ihrem zugehörigen Auslegungskonzept, für die die Bestimmung der maximalen Individualrisiken Ergebnisse zwischen dem Risikoziel und der Risikoschranke erbringen, sind aus Sicht des Strahlenschutzes akzeptabel, unterliegen aber dem Gebot der Minimierung (vgl. Abbildung 1).

Für die praktische Anwendung bei der Bewertung mehrerer in das Auswahlverfahren einbezogener alternativer Endlagersysteme bedeutet dies im Einzelnen sowohl für die zu erwartenden als auch für die außergewöhnlichen Entwicklungen:

- Wird für alle verglichenen Endlagersysteme das Risikoziel unterschritten, sind diese aus Sicht des Strahlenschutzes auf Grund ihres unerheblichen Risikos gleichwertig. Es können andere, gesellschaftlich relevante Kriterien für die Entscheidung herangezogen werden.
- Wird für keines der bewerteten Endlagersysteme das Risikoziel erreicht, die Risikoschranke aber unterschritten, ist eine Minimierung durchzuführen. Durch die Auswahl von Standort und Konzept wird dem Gebot der Minimierung Rechnung getragen. Bei der Minimierung sollte neben der Höhe des maximalen Individualrisikos auch die räumliche und zeitliche Verteilung der Individualrisiken der exponierten Bevölkerung in die vergleichende Bewertung von Endlager-Alternativen einbezogen werden, sofern hierfür ausreichend zuverlässige Berechnungsmethoden vorliegen. Während dies für die realistische Abschätzung des maximalen Individualrisikos der Fall ist, befinden sich die Methoden zur realistischen Berechnung räumlicher und zeitlicher Risikoverteilungen noch in einem Entwicklungsstadium, welches die Anwendung bislang nicht zulässt.
- Wird für keinen der bewerteten Standorte die Risikoschranke für die Individualrisiken eingehalten, ist aus Sicht der Anforderungen des Strahlenschutzes die Endlagersuche zunächst fehlgeschlagen. Unter dem Strahlenschutzgebot der Risikobegrenzung kann keiner der betrachteten Standorte empfohlen werden. Für die Entsorgung der bereits vorhandenen radioaktiven Abfälle muss allerdings auch dann eine Lösung gefunden werden. Vor dem Hintergrund der Risiken jeder anderen Lösung wird ein solchermaßen bewerteter Standort zwar die Anforderungen des Strahlenschutzes, wie sie in der Sicherheitsphilosophie formuliert sind, nicht erfüllen, wird aber möglicherweise nach wie vor die „bestmögliche“ Lösung darstellen. Die Gesellschaft muss also abwägen, ob sie vor den tatsächlichen Risiken einer anderen Entsorgungsart die Endlagerung dann verwerfen will. Letztlich erfordert dies eine erneute politische Entscheidung über ein unter diesen Umständen dann von der Gesellschaft und der betroffenen Region zu tolerierendes Risiko, sowie darüber, ob die Produktion weiterer radioaktiver Abfälle noch gerechtfertigt werden kann. Solange die Risiken jeder anderen Entsorgungsstrategie aber höher sind als die einer Endlagerung, kann nur weiterhin die Endlagerung als beste Lösung vorgeschlagen werden. Aus Sicht des Strahlenschutzes ist unter diesen Umständen die weitere Produktion langlebiger hochradioaktiver Abfälle nicht gerechtfertigt.

Für die Festlegung von Risikoziel und Risikoschranke, das heißt welche Risiken als unerheblich oder als tolerierbar bewertet werden, werden mit dieser Sicherheitsphilosophie quantitative Vorschläge unterbreitet. Letztlich sollte deren Festlegung aber das Ergebnis eines gesellschaftlichen Diskurses sein.

3.4 Schrittweises Vorgehen

Durch ein schrittweises Vorgehen bei der Endlagerplanung und der Entscheidung über Alternativen muss deutlich werden, welche Anstrengungen zur Minimierung von Risiken und damit zur Suche nach dem bestmöglichen Endlager unternommen werden. Dabei wird auch ersichtlich, wie der anwachsende Kenntnisstand zu den betrachteten Alternativen die Qualität der Risikoeinschätzung erhöht.

Beispielhaft wird dies am vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte empfohlenen Auswahlverfahren [1] dargestellt. Mit dem Fortschreiten im Auswahlverfahren werden der Datenumfang und die Datenqualität über die im Auswahlverfahren verbleibenden Standorte zunehmen und gleichzeitig werden das Nichtwissen und die Abschätzungsunsicherheit abnehmen. Parallel dazu verbessern sich zunehmend die Voraussetzungen für probabilistische Abschätzverfahren und die Abhängigkeit von deterministischen Annahmen wird geringer (Abb. 7).

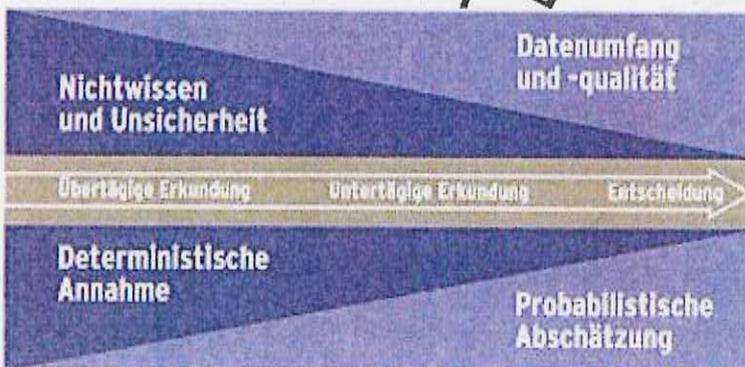


Abbildung 7: Zusammenhang von Datenqualität und Berechnungsverfahren

An Hand des vom AkEnd empfohlenen Auswahlverfahrens für Endlagerstandorte wird die Einsetzbarkeit probabilistischer Risikoeinschätzungen dargestellt. In den ersten Schritten des Auswahlverfahrens werden an Hand von Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien besonders günstige geologische Gesamtsituationen ausgewählt. Insbesondere ist zu prüfen, wie gut die langfristigen Entwicklungsmöglichkeiten der jeweiligen geologischen Situation eingeschätzt werden können. Diese Einschätzung muss qualitativ an Hand der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Entwicklungen und deren

Auswirkungen auf die Isolation der Schadstoffe erfolgen. Es muss eine Entscheidungsbasis erstellt werden, die es ermöglicht, Standorte zu identifizieren, die unter Sicherheitsaspekten gleichwertig gute Voraussetzungen für die Endlagerung bieten.

Nach den übertägigen, geowissenschaftlichen Standort-Erkundungen sollen orientierende Langzeitsicherheitsanalysen durchgeführt werden. Zu diesem Zeitpunkt können erstmals quantitative Risikoeinschätzungen vorgenommen werden. Diese werden noch mit vielen Unwägbarkeiten und Vereinfachungen verbunden sein. Dennoch muss beurteilt werden, ob die verschiedenen Standorte vor dem Hintergrund des Minimierungsgebotes gleichwertig sind und mit großer Wahrscheinlichkeit später abzurufende Genehmigungsvoraussetzungen erfüllen können. Für diese Prüfung sind eine Risikoschranke und ein Minimierungsbereich zu definieren. Gleichzeitig werden deterministische Berechnungen zur Absicherung der probabilistischen Risikoeinschätzung erforderlich sein.

Nach der untertägigen, geowissenschaftlichen Standort-Erkundungen ist eine umfassende Langzeitsicherheitsanalyse durchzuführen. Die am Ende des Auswahlverfahrens zu treffende Standortentscheidung muss dann auf der Basis einer quantitativen Risikoeinschätzung erfolgen.

Im anschließenden Genehmigungsverfahren muss geprüft werden, ob für den ausgewählten Standort die Randbedingungen der Langzeitsicherheitsanalyse eingehalten werden und keine Erkenntnisse vorliegen, die Zweifel an der Langzeitsicherheitsanalyse wecken. Am Ende des Genehmigungsverfahrens ist darzustellen, dass mit hoher Zuverlässigkeit die rechtlichen Anforderungen an ein Endlager erfüllt werden.

4 Bewertungsmaßstäbe für den Schutz von Mensch und Umwelt

Das Schutzkonzept für ein Endlager baut auf den aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen über Gefahren und Risiken durch ionisierende Strahlung für die Gesundheit des Menschen und für die Umwelt auf. Es ist so angelegt, dass es das stetig weiter wachsende Wissen zu Strahlenwirkungen flexibel aufnehmen kann. Dazu gehören insbesondere veränderte quantitative Einschätzungen zur Wirkung ionisierender Strahlung und dessen, was als schädliche oder nachteilige Wirkungen auf Mensch und Umwelt verstanden wird.

Es existiert ein weitgehender internationaler Konsens, Risiken für die menschliche Gesundheit durch ionisierende Strahlung durch eine Begrenzung der Dosis zu limitieren und unterhalb dieser Grenzwerte auf der Grundlage des Minimierungsgebots unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls die Dosen so gering wie möglich zu halten. Diese Vorgehensweise gilt, wenn die Expositionen während der sie verursachenden menschlichen Tätigkeit oder in einem überschaubaren Zeitraum nach deren Beendigung (beispielsweise dem Betrieb eines Kernkraftwerks) auftreten. Im Falle der Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle ist diese Vorgehensweise allerdings wenig hilfreich, da Expositionen und Gesundheitsschäden erst in ferner Zukunft auftreten werden, falls es zu Freisetzungen aus einem Endlager kommt. Daher empfiehlt die Internationale Strahlenschutzkommission zur Begrenzung potentieller Gesundheitsschäden der dann lebenden Menschen einen risikobasierten Ansatz [5, 8]. Dieser Ansatz berücksichtigt sowohl die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer errechneten Dosis als auch die Wahrscheinlichkeit dadurch bedingter Strahlenschäden. Auch die Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) und die Strahlenschutzkommission (SSK) befürworten grundsätzlich die Einführung von Risikokriterien für den Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern. Allerdings erschien es ihnen aufgrund der als schwierig gesehenen Vermittelbarkeit des Risikoansatzes und der Quantifizierung von Eintrittswahrscheinlichkeiten einfacher, weiterhin mit Dosiswerten als Schutzziele zu arbeiten. Die schwedische Strahlenschutzbehörde Statens strålskyddsinstitut (SSI) [9] verabschiedete 1998 eine Regulation zum Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umwelt im Zusammenhang mit der Endlagerung von abgebrannten Brennelementen und radioaktiven Abfällen, die eine absolute Begrenzung der Gesundheitsrisiken für eine repräsentative Person der am höchsten exponierten Bevölkerungsgruppe vorgibt. Dosiswerte sollen dann auf der Grundlage von Risikokoeffizienten aus den

Risikogrenzwerten berechnet werden. Eine vergleichbare Vorgehensweise, d.h. der Festlegung von Risikostandards und der nachfolgenden Ableitung von Dosiswerten aus diesen Risikowerten, empfahl das National Research Council der USA (NRC) [10] 1995 den für die Standardsetzung des geplanten Endlagers in Yucca Mountain zuständigen Behörden der USA (Environmental Protection Agency, US Nuclear Regulatory Commission und US Department of Energy).

Das Konzept der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland sieht eine sichere und dauernde Lagerung in tiefen geologischen Formationen vor. Dieses Endlager wird nach dem Verschluss sich selbst überlassen und bedarf keiner Kontrolle mehr, vielmehr ist es einer direkten Kontrolle ebenso wie direkten Eingriffsmöglichkeiten nicht zugänglich. Damit eine direkte Analogie zur Freigabe gegeben. Bei der Freigabe werden Stoffe und Abfälle nach bestimmten Kriterien aus der atomrechtlichen Überwachung entlassen. Weitergehende Kontrollen und Eingriffsmöglichkeiten nach der Freigabeentscheidung sind nicht vorgesehen. Eine Analogie zum Betrieb einer kerntechnischen Anlage ergibt sich nur während der Betriebsphase eines Endlagers, nicht aber für die Phase nach dem Verschluss (siehe hierzu Kapitel 3). Der Betrieb einer kerntechnischen Anlage setzt immer die Kontrolle und aktive Eingriffsmöglichkeit durch Betreiber und zuständige Behörde voraus. Diese ist nach Verschluss beim Endlager nicht mehr gegeben.

Das BfS empfiehlt, in Übereinstimmung mit der Empfehlung der Internationalen Strahlenschutzkommission in der Sicherheitsphilosophie für die Endlagerung einen risikobasierten Ansatz für die Formulierung von Schutzziele zugrunde zu legen. Die Gründe hierfür werden im folgenden Kapitel dargelegt.

4.1 Risikostandards

Die Sicherheitsphilosophie für die Endlagerung geht davon aus, dass während des Betriebs und nach dem Verschluss eines Endlagers für den gesamten Betrachtungszeitraum ein möglichst hoher Schutz von Mensch und Umwelt vor schädlichen Emissionen aus einem Endlager gegeben sein muss. Dies wird erreicht, wenn vom Endlager kein relevantes Risiko für Mensch und Umwelt ausgeht. Die Bewertung der Sicherheit eines Endlagers setzt daher voraus, dass mögliche Risiken qualitativ und quantitativ beschrieben werden (Risikoabschätzung) und deren Relevanz vor dem Hintergrund der Werte und Normen unserer demokratisch verfassten Gesellschaft bewertet werden (Risikobewertung).

Als primäre, verfahrensleitende Standards zur Suche und Bewertung der Sicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle sind Normen festzulegen, die auf Risikobewertungen basieren. Risikowerten können unter Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeit korrespondierende Dosiswerte zugeordnet werden, so dass diese mit geltenden Normen verglichen werden können. Auch bauen die Dosisgrenzwerte des Strahlenschutzes auf einem risikobasierten Ansatz auf [11,13]. Die Empfehlung des Bundesamtes für Strahlenschutz, Normen für eine Risikobewertung festzulegen, gründet sich auf folgende Argumente:

- Durch die Formulierung von Risikostandards wird deutlich, dass deren Festlegung eine gesellschaftliche Entscheidung bzw. eine Entscheidung des Gesetzgebers ist (Transparenz). Bei der Festlegung von Dosis- und Konzentrationsgrenzwerten wird leider häufig die vielschichtige Diskussion zur Festlegung von Risikostandards mit der wissenschaftlichen Diskussion über die Wirkung von Schadstoffen und die Berechnung der Wirkungen ausgehend von Konzentrationen der Schadstoffe in Boden, Wasser und Luft vermischt. Oft werden sie als rein auf naturwissenschaftlicher Basis aufgebaute Werte verstanden und bewertet. Die dahinter stehende normative, d.h. bewertende Festlegung von Risikostandards ist nur in seltenen Fällen nachvollziehbar.
- Risikobasierte Standards müssen aufgrund ihres im Wesentlichen normativen Charakters in aller Regel nicht an neuere wissenschaftliche Erkenntnisse angepasst werden. Im Gegensatz dazu müssen, wie in der Vergangenheit bereits mehrfach geschehen, Dosis- und Konzentrationsstandards regelmäßig den weiter fortschreitenden Erkenntnissen unter anderem zur Dosis-Wirkungs-(Risiko-)Beziehung zum Strahlenrisiko (siehe Glossar) angepasst werden. Im Bezug auf das Krebsrisiko und möglicherweise das genetische Risiko sind bereits jetzt notwendige Veränderungen der derzeit wissenschaftlich akzeptierten Dosis-Wirkungs-Beziehung (siehe Glossar) absehbar. Die Bewertung der Daten seit den Empfehlungen der ICRP von 1991, die zum einem erstmals eine Abschätzung des Strahlenrisikos aufbauend auf Daten zum Erkrankungsrisiko und nicht nur wie in der Vergangenheit auf Mortalitätsrisiken ermöglichen, ergibt für die Organ- bzw. Gewebegruppen Brust, Knochenmark und „übrige“ Organe veränderte Risikoschätzer (siehe Glossar). Insbesondere das Brustkrebsrisiko wird heute höher abgeschätzt. Eine Neubewertung der tierexperimentellen Daten zum genetischen Strahlenrisiko durch die ICRP führt hingegen zu einer niedrigeren Abschätzung dieses Risikos.

- Risikostandards werden nicht durch die zum Teil kontroverse Diskussion über den Verlauf der Dosis-Wirkungs-Beziehung im Bereich kleiner Dosen berührt. Weder durch Beobachtungen noch durch Experimente können für diesen Dosisbereich direkte Informationen gewonnen werden. Auf Grund des heutigen Kenntnisstandes und im Sinne des Vorsorgegrundsatzes ist von einer Extrapolation der linearen Dosis-Wirkungs-Beziehung für das strahleninduzierte Leukämie und Krebsrisiko auszugehen.
- Risikostandards beziehen sich auf das Risiko schwer zu erkranken. Hierunter fallen auch schwere Erkrankungen, die von einzelnen Organen ausgehen. Eine Festlegung separater Risikostandards für einzelne Organe ist somit nicht erforderlich. Nach heutigem Wissen werden unter schweren Erkrankungen, die von ionisierender Strahlung verursacht werden können, Leukämien, Krebs und vererbare Krankheiten verstanden. Risikostandards für schwere Erkrankungen decken andere schwere Erkrankungen wie z.B. die des Herz-Kreislaufsystems unmittelbar mit ab, sollte diese zukünftig als strahlenverursacht bewertet werden.
- Risiken für Mensch und Umwelt aus einem Endlager für radioaktive Abfälle können nicht nur durch radioaktive Stoffe hervorgerufen werden. Auch das chemisch-toxische Potenzial der Abfälle kann zu einem Risiko beitragen. Risikobasierte Standards sind sowohl für das radiotoxische als auch für das chemotoxische Potenzial der Abfälle anwendbar. Sie machen es deshalb möglich, Risiken miteinander zu vergleichen, eine Rangfolge der maßgeblich zu betrachtenden Risikopfade nach ihrer Bedeutung zu bilden (Priorisierung) und damit die Bewertung der Sicherheit konsistenter, transparenter und verständlicher zu gestalten. Weiterhin wird ein Bewertungsrahmen errichtet, der es erlaubt, vergleichend Risiken aus anderen technischen Anlagen oder Deponien für chemische Abfälle mit denen eines Endlagers für radioaktive Abfälle zu betrachten.
- Basierend auf dem Wissen zu radiologischen bzw. chemotoxischen Risiken, zu den Expositionspfaden, zu den Freisetzungswegen aus einem Endlager und zur Eintrittswahrscheinlichkeit von Szenarien können neben primären, risikobasierten Standards Dosis- und Konzentrationsgrenzwerte als abgeleitete Standards sowohl für Radionuklide als auch für andere in den radioaktiven Abfällen befindliche Schadstoffe etabliert werden.

Bei niedrigen Dosen oder Konzentrationen unterscheiden sich im Umwelt- und Arbeitsschutz die Konzepte zur Setzung von Standards grundsätzlich darin, ob die für die Regulierung verantwortliche Institution es mit Stoffen oder Noxen (siehe Glossar) zu tun hat, deren

Wirkungspfad von einer Dosischwelle abhängt oder nicht. Für Stoffe oder Noxen mit Wirkschwelle beruhen die Sicherheitskonzepte darauf, diese Wirkschwellen sicher zu unterschreiten. Standards für Noxen ohne Wirkschwelle – wie für ionisierende Strahlen – beruhen dagegen in der Regel auf Festlegungen entsprechend des Standes der jeweils besten verfügbaren Technik und/oder auf Minimierungsgrundsätzen wie ALARA (as low as reasonable achievable, (so niedrig wie angemessen erreichbar)). Für den Bereich niedriger Strahlendosen wird der zweite Konzeptweg gewählt. Im Bezug auf Risikostandards wird im Folgenden nur auf dieses Konzept weiter eingegangen.

4.2 Festlegung risikobasierter Schutzziele

Wünschenswert wäre das Vorliegen risikobasierter Grenz- oder Zielwerte innerhalb des nationalen gesetzlichen Regelwerkes zum gesundheitsbezogenen Umweltschutz. Derartige Werte könnten einen Bereich für das gesellschaftlich akzeptierte Maß von Gesundheitsgefährdungen durch anthropogen (menschlich verursacht) in die Umwelt freigesetzte Schadstoffe unter Zulassung von Abwägungsentscheidungen vorgeben. An solchen Festlegungen könnte sich die Erarbeitung von Schutzziele für die sichere Endlagerung orientieren. Mit Ausnahme des Bodenschutzes, in dem risikobasierte Schutzziele in untergesetzlichen Regelwerken und deren Begründungen explizit genannt werden, existieren risikobasierte Schutzziele in Deutschland im Gegensatz zu anderen Staaten nicht, weder für Radionuklide noch für andere toxische Substanzklassen. Die in den verschiedenen Staaten und in supranationalen Organisationen festgelegten bzw. empfohlenen risikobasierten Schutzziele sind in Anhang 2 zusammengestellt.

Es zeigt sich, dass risikobasierte Schutzziele für Schadstoffe mit krebsauslösendem Potenzial in Umweltmedien international in einem Bereich zwischen 10^{-4} und 10^{-6} , bezogen auf die Lebenszeit eines Menschen, festgelegt wurden. Dies bedeutet, dass die Anreicherung der betrachteten Schadstoffe in der Umwelt so begrenzt werden soll, dass von 10.000 bis 1.000.000 lebenslang mit der zulässigen Maximalkonzentration exponierten Personen im Mittel lediglich 1 Person schwer erkrankt. Zu beachten ist dabei, dass die zum Nachweis der Einhaltung der Schutzziele für nicht-nukleare Schadstoffe benutzten Risikoschätzer (siehe Glossar) meist obere, das Risiko überschätzende Werte darstellen, während die im Strahlenschutz verwendeten Daten zum Strahlenrisiko in der Regel realistische Schätzer darstellen.

Im Vergleich zu den oben genannten Zahlen für Schadstoffe in Umweltmedien schlug die ICRP in ihrer Publikation 81 [5] mit 10^{-5} pro Jahr ein niedrigeres Schutzziel vor. Dieser Wert entspricht einem Lebenszeitrisko von $7 \cdot 10^{-4}$ für eine tödlich verlaufenden Krebserkrankung

(Mortalität). Den Individualrisiken in vergleichbarer Größenordnung entsprechen die Dosisgrenzwerte, die heute als Standard zum Schutz der Bevölkerung festgelegt worden sind. Auf der Basis der Schätzung des Strahlenrisikos durch die Internationale Strahlenschutzkommission [11] errechnet sich für den Grenzwert des § 46 der deutschen Strahlenschutzverordnung von 1 mSv pro Jahr bei lebenslanger Exposition ein Individualrisiko von etwa $4 \cdot 10^{-3}$ für eine tödlich verlaufende Krebserkrankung. Die mittlere jährliche Dosis in Deutschland von 2,1 mSv pro Jahr durch natürliche Umweltradioaktivität entspricht einem Lebenszeitrisko von etwa $7 \cdot 10^{-3}$.

Deutlich wird aus diesen Daten, dass den genannten Dosiswerten nach heutigem Kenntnisstand durchweg Individualrisiken für tödlich verlaufende Krebserkrankungen zuzuordnen sind, die um mindestens eine Größenordnung oberhalb des Risikobereichs liegen, der allgemein für schwere Krebserkrankungen durch andere Schadstoffe, hier aber für das Inzidenzrisiko als akzeptabel angesehen wird. Dies gilt auch für die mittlere jährliche Strahlenbelastung in der Bundesrepublik Deutschland durch natürliche Umweltradioaktivität. Der häufig verwendete Bezug zu dieser Größe stellt zudem für die Ableitung eines Risikoziels bei der Endlagerung keinen geeigneten Maßstab dar, da durch ein Endlager verursachte Risiken für zukünftige Generationen so gering wie möglich gehalten werden sollten.

Es wird vorgeschlagen, den international vielfach für Schadstoffe in Umweltmedien empfohlenen Bereich von 10^{-6} – 10^{-4} als Lebenszeitrisko einer schwerwiegenden Erkrankung (Inzidenzrisiko (siehe Glossar)) zur Festlegung von Schutzziele der Endlagerung radioaktiver Abfälle zugrunde zu legen. Dabei ist der Wert von 10^{-6} als **Risikoziel** (siehe Glossar) zu verstehen, der Wert von 10^{-4} als **Risikoschranke** (siehe Glossar).

Zur Verdeutlichung der Bedeutung dieser Werte, sei angemerkt:

- Sie beziehen sich auf individuelle Lebenszeitriskiken. Falls es zu Emissionen aus einem verschlossenen Endlager kommt, muss davon ausgegangen werden, dass diese Emissionen zeitlich andauern und zu Expositionen führen, die in aller Regel ein Leben lang anhalten. Daher sind diesen Vorschlägen Lebenszeitriskiken zu Grunde gelegt. Dieses Vorgehen entspricht dem Vorgehen bei anderen nicht abbaubaren Schadstoffen.
- Sie beziehen sich auf das Erkrankungsrisiko (Inzidenzrisiko). Wegen der Unmöglichkeit, zukünftige gesellschaftliche Entwicklungen vorherzusagen, sollte in der Festlegung von

Schutzstandards kein Kredit vom medizinischen Fortschritt bzw. von etablierten medizinischen Versorgungssystemen genommen werden. In die Festlegung von Schutzstandards auf der Basis von Mortalitätsrisiken gehen immanent immer Annahmen zu eben diesen medizinischen Versorgungsdaten mit ein.

- Sie entsprechen der Verpflichtung, zukünftige Generationen keinen höheren Risiken auszusetzen als die, die für uns heute als akzeptabel angesehen werden.
- Der Festlegung gesellschaftlich akzeptabler Risikostandards durch die zuständigen Verfassungsorgane sollte ein gesellschaftlicher Diskurs vorausgehen. Die hier vorgeschlagenen Risikowerte stimmen mit dem international allgemein als akzeptabel betrachteten Risikobereich für Gesundheitsschäden durch Schadstoffe in Umweltmedien überein. Die Bundesrepublik Deutschland war bei diesen Empfehlungen durch ihre Vertretungen in den internationalen Organisationen (World Health Organization (WHO), Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Europäische Union (EU)) beteiligt. Auf diesen Risikostandards basierende Grenzwerte (beispielsweise zum Schutz des Trinkwassers) wurden mittlerweile vom deutschen Gesetzgeber in die nationalen Regelwerke übernommen.
- Im Strahlenschutz entsprechen sie den Grundsätzen, auf denen die Freigabe basiert. Auch in diesem Fall soll sichergestellt werden, dass durch eine Rezyklierung (Rückführung in den Verwertungskreislauf) der Stoffe oder ihre Deponierung allenfalls ein unerhebliches Individualrisiko verursacht wird.
- Häufig wird für risikobasierte Schutzziele nur ein einzelner Wert als Risikomaßstab zugrunde gelegt. Das BfS schlägt dagegen vor, einen Risikobereich mit **Risikoziel** und **Risikoschranke** festzulegen. Die Angabe eines Risikobereichs verdeutlicht, dass die Festlegung eines Risikoziels von 10^{-6} als Lebenszeitrisiko einer schwerwiegenden Erkrankung nicht den Charakter eines Grenzwertes haben soll, sondern als Zielvorgabe für eine **bestmögliche Lösung** (siehe Glossar) innerhalb eines akzeptablen Risikobereichs zu verstehen ist. Vergleichbare Vorgehensweisen bei der Ausweisung von Risikobereichen werden von der Environmental Protection Agency der USA (U.S. EPA) verfolgt. (siehe Anhang 2)
- Die vorgeschlagenen Werte sind als Schutzziele für das Gesamtrisiko (siehe Glossar) durch alle gelagerten Schadstoffe (Radionuklide, chemotoxische Stoffe) zu verstehen.

- Falls in Langzeitsicherheitsanalysen eine Einhaltung des vorgeschlagenen Risikoziels gezeigt wird, kann davon ausgegangen werden, dass der Einhaltung des Minimierungsgebots des § 6 (2) der Strahlenschutzverordnung Genüge getan ist, und danach andere Werte und Interessen der Gesellschaft die Entscheidungen zur Endlagerung bestimmen können. Der Bereich zwischen Risikoschranke und Risikoziel ist – wie weiter oben bereits dargelegt - als Minimierungsbereich zu verstehen.
- Das von einem Endlager ausgehende Risiko ist entscheidend abhängig vom Ort und vom zeitlichen Verlauf der Freisetzung der Schadstoffe in die Biosphäre. Als Bewertungsmaßstab ist daher das Risiko einer Person heranzuziehen, die sich am Ort der und zum Zeitpunkt mit den höchsten Auswirkungen auf den Menschen aufhält.
- In den letzten Jahren hat die Weiterentwicklung des wissenschaftlichen Kenntnisstands es zunehmend erlaubt, in Langzeitsicherheitsanalysen den Einfluss der Veränderbarkeit (Variabilität) der benötigten Modellparameter systematisch zu erfassen. Mit Hilfe solcher probabilistischer Verfahren (siehe Glossar) ergibt sich für jeden gewählten Zeitpunkt und Ort eine Häufigkeitsverteilung des geschätzten Risikos. Eine hinreichend zuverlässige Abschätzung der Risikoschranke ist dann erreicht, wenn das 90. Perzentil (siehe Glossar) ermittelt an allen geschätzten Risikowerten unterhalb der Risikoschranke von 10^{-4} liegt. Dies gilt für eine probabilistische Risiko- und Expositionsabschätzung, die die Basis für die im Rahmen des Auswahlverfahrens durchzuführenden umfassenden Langzeit-Sicherheitsanalysen (siehe Kapitel 3.4) bilden sollen. Alternativ können deterministische Verfahren verwendet werden, solange die Datengrundlage gering ist. Dann sind möglichst abdeckende Parameterwerte heranzuziehen. Im Fall deterministischer Verfahren darf die Risikoschranke nicht überschritten werden. Durch Sensitivitätsanalysen (siehe Glossar) sind kritische Parameter und ihr Einfluss auf die Ergebnisse der Analysen zu erfassen.

Das in den Sicherheitsanalysen zu ermittelnde Risiko setzt sich aus drei Beiträgen, die getrennt behandelt werden können, zusammen:

- (1) der Wahrscheinlichkeit und Höhe für eine Freisetzung radioaktiver Substanzen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich,
- (2) dem anschließendem Transport in die und innerhalb der Biosphäre und

- (3) der Wahrscheinlichkeit eines gesundheitlichen Schadens bei einer Exposition (Strahlenrisiko).

Der vom BfS vorgeschlagenen Risikomaßstab mit einer Risikoschranke von 10^{-4} und einem Risikoziel von 10^{-6} für das Lebenszeitrisko entspricht in der Größenordnung den Risikostandards, wie sie vom NRC der USA (1995)[10] mit 5×10^{-4} für das Lebenszeitrisko empfohlen und vom SSI (1998)[9] mit 10^{-6} für das jährliche Risiko verabschiedet wurden. Die Empfehlung des NRC und der Standard des SSI beziehen sich ebenso wie die Empfehlung des BfS zur Risikoschranke jeweils auf das Risiko für eine repräsentative Person der am höchsten exponierten Bevölkerungsgruppe. Mit seiner weitergehenden Empfehlung für ein Risikoziel setzt das BfS neben der Risikobegrenzung konsequent auch eine Vorgabe für die Risikominimierung.

4.3 Strahlenrisiko

Als Risiko wird allgemein das Produkt aus der Eintrittswahrscheinlichkeit und dem Ausmaß eines Schadens bezeichnet. Die Wirkung ionisierender Strahlung im Bereich niedriger Expositionen ist charakterisiert durch ihre stochastische (siehe Glossar) Natur. Sie führt beim Menschen in Abhängigkeit von der Expositionshöhe zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit, eine bösartige Krankheit wie Leukämie oder Krebs zu erleiden. Im Strahlenschutz wird als Schaden die schwerwiegende Erkrankung definiert. Das Schadensausmaß ist damit bestimmt. Beim tatsächlichen Auftreten einer Strahlenwirkung entspricht das Risiko daher direkt der Eintrittswahrscheinlichkeit der Erkrankung.

Nach dem gegenwärtigen Stand des Wissens über die Wirkung ionisierender Strahlung muss davon ausgegangen werden, dass eine Strahlenexposition einer Person in Höhe von 1 mSv die Wahrscheinlichkeit, dass diese Person eine tödlich verlaufende Krankheit (Leukämie oder Krebs) erleidet, um den Wert $5 \cdot 10^{-5}$ erhöht [11].

Innerhalb der letzten 50 Jahre hat sich diese Risikoabschätzung für tödlich verlaufende Krebserkrankungen bezogen auf eine Strahlenexposition von 1 mSv von $0,4 \cdot 10^{-5}$ [12] über $1,25 \cdot 10^{-5}$ [13] auf die oben genannten $5 \cdot 10^{-5}$ geändert. Bereits heute ist eine weitere notwendige Anpassung absehbar. Im gleichen Zeitraum hat die ICRP ihre Empfehlungen zum Dosisgrenzwert für die allgemeine Bevölkerung von 5 mSv pro Jahr [12,13] auf 1 mSv pro Jahr reduziert [8]. Zwar werden sich nach der derzeitigen Diskussion in der ICRP insgesamt an den Risikoschätzern zum Strahlenrisiko nur geringe Änderungen ergeben, das Krebsrisiko insbesondere für Brustkrebs wird heute jedoch höher abgeschätzt, das genetische Risiko hingegen geringer.

Diese Zusammenstellung zeigt zum einen, dass die Abschätzung des Strahlenrisikos auf der Basis der zur jeweiligen Zeit verfügbaren Daten innerhalb der letzten 50 Jahre zu deutlich höheren Risikoschätzern geführt hat und dass zum anderen die Empfehlungen zu Dosisgrenzwerten diese Änderungen zwar im Trend, nicht aber im Ausmaß nachvollziehen.

Das Bewertungssystem für ein Endlager muss zumindest für die Zeit der Planungs-, Genehmigungs- und Betriebsphase des Endlagers Bestand haben. Vorrangige Schutzziele, die direkt vom Kenntnisstand zur Dosis-Wirkungs-Beziehung für Strahlenschäden abhängen, werden - basierend auf den oben gezeigten Erfahrungen - diese Anforderung wahrscheinlich nicht erfüllen.

Das Strahlenschutzkonzept für ein Endlager sollte daher primär auf risikobasierten Schutzziele beruhen. Aus diesen können mit den Eintrittswahrscheinlichkeiten der betrachteten Entwicklung auf der Basis etablierter Dosis-Wirkungs-Beziehungen Dosiswerte berechnet und weitergehend dann maximal zulässige Konzentrationen von Radionukliden in Boden, Wasser und Luft abgeleitet werden.

4.4 Chemotoxische Risiken

Neben den möglichen radiologischen Auswirkungen eines Endlagers müssen auch weitere Einflüsse auf Mensch und Umwelt berücksichtigt werden. Hier sind insbesondere die Schutzgüter Wasser und Boden von Bedeutung. Beim Schutzgut Wasser ist insbesondere das Grundwasser in seiner ursprünglichen Zusammensetzung und im Hinblick auf seine Nutzung für den menschlichen Gebrauch (Gewinnung von Trinkwasser, Verwendung zum Beregnen bzw. Bewässern) sowie auf seine Funktion in der belebten Umwelt zu schützen.

Radioaktive Abfälle und ihre Verpackung sowie die zum Verfüllen und Verschließen eines Endlagers vorgesehenen Baustoffe setzen sich aus einer Vielzahl organischer und anorganischer nichtradioaktiver Bestandteile zusammen, die zum erheblichen Teil keine besonderen Auswirkungen auf die belebte Umwelt haben. Teilweise gehören dazu aber auch chemotoxische Stoffe wie z.B. die Schwermetalle Blei und Cadmium.

In Ergänzung zum radiologischen Schutzkonzept ist daher für das Endlager auch ein Schutzkonzept vor chemotoxischen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt zu entwickeln, das sich an der (öko-)toxikologischen Bewertung der nichtradioaktiven Bestandteile der

Abfälle, Verpackungen und Versatzmaterialien orientiert. In Analogie zum Schutz vor Strahlenexpositionen muss erreicht werden, dass chemotoxische Stoffe ebenfalls höchstens unerhebliche bzw. tolerierbare Risiken verursachen.

Das derzeit gesellschaftlich akzeptierte Risikoniveau ergibt sich aus dem Schutzziel des Wasserrechts. Danach ist der Nachweis zu führen, dass durch die radioaktiven Abfälle, ihre Verpackung und die vorzunehmenden Verfüll- und Verschleißmaßnahmen keine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften zu befürchten ist.

Durch die Sicherheitsziele für die drei Entwicklungskategorien des verschlossenen Endlagers soll erreicht werden, dass die in den Abfällen enthaltenen Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich mit hoher Zuverlässigkeit isoliert sind. Die Rückhaltung durch geologische, geotechnische und technische Barrieren sowie geochemische Immobilisierungs- und Rückhalteprozesse sollen dafür sorgen, dass die Schadstoffe für die zu erwartenden Entwicklungen des Endlagers in der direkten Umgebung des Einlagerungsbereichs im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bleiben und von den außergewöhnlichen Entwicklungen allenfalls ein tolerierbares Risiko ausgeht. Dies gilt sowohl für die Radionuklide als auch für die nicht radioaktiven Bestandteile der radioaktiven Abfälle, der Verpackungen und der bei den Verfüll- und Verschleißmaßnahmen eingesetzten Materialien.

4.5 Verfahren zur Risikoermittlung

Die konkrete Festlegung von Verfahren zur Risikoermittlung muss im Wesentlichen durch die Weiterentwicklung von Sicherheitskriterien und der dazugehörigen Leitlinien erfolgen. Sie hängen im Gegensatz zu Risikostandards in wesentlich stärkerem Maße vom jeweils aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik ab. Hier wird nur soweit auf die Verfahren zur Risikoermittlung eingegangen, wie es für das Verständnis der vorgeschlagenen Risikostandards erforderlich ist.

Der Nachweis der Langzeitsicherheit eines Endlagers erfordert die Abschätzung von Strahlenexpositionen auch für Umweltbedingungen, landwirtschaftliche Praktiken und Ernährungsgewohnheiten in ferner Zukunft. Da solche Prognosen über die erforderlich langen Zeiträume nicht möglich sind, sollen der Ermittlung von Strahlenexpositionen stilisierte Ökosysteme zugrundegelegt werden, die die aus heutiger Kenntnis wesentlichen potentiellen Expositionspfade berücksichtigen ("reference biospheres"). Konzepte für eine

solche international getragene Vorgehensweise sind in der Entwicklung (beispielhaft: [14], [15]).

Es wird vorgeschlagen, Risiken in der Phase der Standortsuche und insbesondere im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalysen für die Prüfung von Alternativen median-orientiert zu ermitteln. Dabei soll der Abschätzung möglicher Risikobandbreiten der Vorrang vor der alleinigen Ermittlung von Einzelwerten gegeben werden [5]. Eine Abschätzung und Bewertung der Unsicherheiten der Modelle und der Eingangsparameter muss, basierend auf Sensitivitätsbetrachtungen, summarisch als Gesamtunsicherheit für das jeweilige Modell in die weiteren Bewertungen einfließen.

Der Vorschlag, median-orientierte Abschätzungen des Risikos vorzunehmen, unterscheidet sich weitgehend vom derzeit praktizierten Vorgehen zur Gewährleistung des Strahlenschutzes der Bevölkerung bei Planung und Genehmigung nuklearer Anlagen. Die Dosis-Risiko-Abschätzung beruht im Wesentlichen auf der Basis epidemiologischer Daten und wird als weitgehend realistisch bewertet. Demgegenüber basieren die heute angewandten Ausbreitungs- bzw. Expositionsmodelle des Strahlenschutzes (siehe u.a. Allgemeine Verwaltungsvorschrift - AVV zu § 47 StrlSchV) auf Verfahren, die die Strahlenexposition systematisch überschätzen („konservative Modelle“). Eine Berücksichtigung aller theoretisch möglichen Belastungspfade, die Beaufschlagung der benötigten Modellparameter mit Sicherheitsfaktoren und deren anschließende Aggregation führt in der Regel zu einer Überschätzung der Strahlenexposition, deren Höhe nicht quantifiziert werden kann.

Die mit einem solchen Vorgehen einhergehende unbekannte Überschätzung des Risikos hat aber zur Konsequenz, dass es für eine risikobasierte vergleichende Prüfung von Alternativen nicht geeignet ist. Denn solche unbekannte, bei den verglichenen Standorten oder Endlageroptionen möglicherweise unterschiedlichen Risikoüberschätzungen können den angestrebten Alternativenvergleich entscheidend beeinflussen.

Auf eine Konsequenz einer solchen Vorgehensweise muss zur Vermeidung von Fehlinterpretationen hingewiesen werden: Die zur Abschätzung von Risiken mit dem hier vorgeschlagenen median-orientierten Modellansatz abgeschätzten Strahlenexpositionen können nicht direkt mit Dosiswerten, die mit konservativen Modellen berechnet wurden, verglichen werden. Derartige konservative Modelle liegen beispielsweise den berechneten Expositionen durch deutsche kerntechnische Anlagen oder den Freigabewerten zu Grunde, die auf der Basis der international gebräuchlichen Geringfügigkeitsgrenze von 0,01 mSv pro

Jahr abgeleitet wurden. Insbesondere ist darauf hinzuweisen, dass den zunächst unterschiedlich erscheinenden Dosiswerten für die Freigabe ($10 \mu\text{Sv/a}$) und des hier vorgeschlagenen Risikoziels von 10^{-6} (auf heutiger Basis: $< 1 \mu\text{Sv/a}$ für zu erwartende Entwicklungen) ein vergleichbares Risiko entspricht. Die Differenz wird im Wesentlichen durch die unterschiedlichen Berechnungsverfahren (median-orientiert versus konservativ) der Freisetzungs- und Expositionsmodellierung hervorgerufen.

4.6 Schutzziele für zu erwartende und außergewöhnliche Entwicklungen

Die zu erwartenden Entwicklungen sind so definiert, dass ihre Eintrittswahrscheinlichkeit mit 1 gleichgesetzt wird. Somit wird das Risiko einer zu erwartenden Entwicklung ausschließlich durch das durch Strahlung und chemische Noxen verursachte individuelle Gesundheitsrisiko bestimmt. Für die vorläufige Bewertung in der Phase der Prüfung alternativer Endlagerstandorte, Endlager- und Anlagenkonzepte wird empfohlen, die zu erwartende Entwicklung mit den maximalen Auswirkungen, gemessen am Medianwert (siehe Glossar) sowie zum Zeitpunkt und am Ort mit den maximalen Auswirkungen, heranzuziehen. Das damit verbundene Risiko kann schon durch wenige Berechnungswerte zuverlässig ermittelt werden. Hiermit wird dem noch vorläufigen Charakter der Datengrundlage während der Standortauswahl Rechnung getragen. Durch die median-orientierten (siehe Glossar) Abschätzverfahren wird gewährleistet, dass bei Einhaltung des Risikoziels für das in Raum und Zeit am höchsten exponierte Individuum der überwiegende Teil der betroffenen Bevölkerung geringeren Risiken ausgesetzt sein wird.

Auch für die außergewöhnlichen Entwicklungen gilt, dass der überwiegende Teil der Bevölkerung auf dem Niveau des Risikoziels zu schützen ist. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten für außergewöhnliche Entwicklungen dürfen in der Summe und für den gesamten Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre 0,1 nicht übersteigen. Mit der Festlegung einer Risikoschranke für das individuelle Risiko von 10^{-4} wird sichergestellt, dass zukünftigen Generationen selbst im Fall des Auftretens dieser außergewöhnlichen Entwicklungen mit hoher Zuverlässigkeit keine höheren Risiken zugemutet werden, als die gegenwärtigen Generationen durch Strahlenexpositionen aus kerntechnischen Anlagen heute akzeptieren.

In noch stärkerem Maße als bei den zu erwartenden Entwicklungen muss bei den außergewöhnlichen Entwicklungen mit einer nur gering abgesicherten Datengrundlage gerechnet werden. Es soll auch hier, soweit möglich, der Medianwert der berechneten

Individualrisiken für die Bestimmung des Zeitpunktes und des Orts mit den maximalen Auswirkungen herangezogen werden.

4.7 Spezielle Entwicklungen

Für die speziellen Entwicklungen wird kein Risikoziel und keine Risikoschranke formuliert. Sie sollen nur dann die Entscheidung für eine Alternative beeinflussen, wenn die betrachteten Alternativen bei den zu erwartenden und den außergewöhnlichen Entwicklungen gleich gut abschneiden, und sich deutliche Unterschiede bei den Auswirkungen der speziellen Entwicklungen ergeben.

4.8 Zusammenfassung

Ein Risiko wird vom Bundesamt für Strahlenschutz dann als unerheblich bewertet, wenn insgesamt die Wahrscheinlichkeit für eine Person innerhalb der Lebenszeit schwer zu erkranken, das Risikoziel (siehe Glossar) von 10^{-6} nicht überschreitet. Die Einhaltung des Risikoziels wird an dem Medianwert möglichst realistisch abgeschätzter Risikowerte gemessen. Ein Risiko wird als tolerabel bewertet, wenn die Konsequenz für jedes Individuum im Fall einer Freisetzung absolut begrenzt ist und das aus der Freisetzung resultierende Risiko insgesamt einen Wert von 10^{-4} nicht überschreitet. Die Einhaltung dieser Risikoschranke (siehe Glossar) wird an der oberen Bandbreite abgeschätzter Risikowerte gemessen. Diese obere Bandbreite wird im Fall probabilistischer Freisetzungs-, Expositions- und Risikoabschätzungen durch den 90. Perzentilwert begrenzt. Im Fall deterministischer Abschätzungen ist die Risikoschranke absolut einzuhalten.

Der Vorschlag ist darauf ausgerichtet, ein Endlager zu finden, das die radioaktiven Abfälle möglichst vollständig isoliert. Die Entscheidungen über den Endlagerstandort und die Endlagerplanung sollen im Wesentlichen auf der Basis einer Risikobeurteilung für die zu erwartenden Entwicklungen und weniger durch die außergewöhnlichen Entwicklungen bestimmt werden.

4.9 Die Empfehlung von RSK und SSK

Die Strahlenschutzkommission (SSK) und die Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) empfehlen in ihrer gemeinsamen Stellungnahme aus dem Jahre 2002, als radiologische Schutzziele für ein Endlager nur Dosisrichtwerte und keine Grenzwerte vorzugeben. Für wahrscheinliche Szenarien schlagen sie einen Dosisrichtwert von $100 \mu\text{Sv}$ pro Jahr und für weniger wahrscheinliche Szenarien (Eintrittswahrscheinlichkeit kleiner 10^{-1}) einen Dosisrichtwert von 1 mSv pro Jahr vor. Eine zusätzliche Begrenzung der Kollektivdosis wird

von SSK und RSK nicht empfohlen. Ein risikoorientierter Ansatz wird von RSK und SSK grundsätzlich begrüßt, für ein Genehmigungsverfahren aber nicht als Grundlage empfohlen.

Die gemeinsame Stellungnahme der RSK und SSK stellt die Beantwortung von fünf konkret gestellten Fragen dar. Insofern kann und will sie nicht die gesamte Thematik der Standortauswahl, der Sicherheitskriterien und der Leitlinien zur Auslegung eines Endlagers umfassend behandeln. Die gemäß der Empfehlung des AkEnd durchzuführende Suche und Bewertung eines Endlagerstandortes war nicht Gegenstand der an die RSK und SSK gerichteten Fragen. Somit setzt die Stellungnahme von RSK und SSK auch andere Schwerpunkte als die hier vorgelegte Sicherheitsphilosophie.

Die von RSK und SSK vorgeschlagenen Dosisrichtwerte sind auf die Prüfung der Einhaltung von Genehmigungsvoraussetzungen für einen schon ausgewählten Endlagerstandort und eine bestimmte Endlagerplanung ausgerichtet.

4.10 Schutz der Umwelt

Der Weg zu einem Endlager und die damit verbundenen gesellschaftlichen und politischen Entscheidungen stellen neben vielen technischen Anforderungen an Nachweisführung und Realisierung auch besondere Anforderungen an das Konzept zum Schutz der Umwelt. Unter Schutz der Umwelt ist hier neben dem Schutz der belebten Umwelt auch der Schutz der Umweltmedien in ihrer ursprünglichen Zusammensetzung (hier insbesondere des Wassers und des Bodens) zu verstehen.

In mehreren internationalen Gremien, die sich mit dem Gesundheitsschutz im weitesten Sinne – auch über den Schutz vor radioaktiven Stoffen hinaus – befassen, werden derzeit Konzepte zum Schutz der Umwelt entwickelt. Es ist absehbar, dass diese Konzepte in neue Basisempfehlungen der ICRP zu den Strahlenschutz-Prinzipien eingehen werden. Kern solcher Konzepte ist die Anforderung, dass der Schutz aller Organismen in der von Emissionen betroffenen Umwelt darzulegen ist. Bei der Ausgestaltung des Prüfverfahrens zur Umweltverträglichkeit müssen die Auswirkungen eines Endlagers auf das Schutzgut Umwelt explizit betrachtet werden. Das BfS wird diese Entwicklungen verfolgen und bei seinen Überlegungen zum Schutz der Umwelt einbeziehen.

5 Zuverlässigkeit und Nachweis der Sicherheit

5.1 Zuverlässigkeit der Sicherheitssysteme

Betriebsphase

Das Endlager unterliegt während der Errichtungs- und Betriebsphase als kerntechnische Anlage dem kerntechnischen und sonstigen Regelwerk in sinngemäßer Anwendung. Damit sind alle einschlägigen Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Systeme, die Sicherheit des Betriebes, die Fachkunde des Personals und die Qualitätssicherung und Ähnliches vorgegeben. Für den sicheren Transport der radioaktiven Abfälle zum Endlager gibt es ein spezifisches Regelwerk.

Für die endzulagernden Abfallgebinde müssen Anforderungen in Form von Endlagerungsbedingungen auf der Grundlage der Ergebnisse von Sicherheitsanalysen sowie Maßnahmen zum Nachweis der Einhaltung dieser Bedingungen (Produktkontrolle radioaktiver Abfälle) festgelegt werden. Die geforderten Eigenschaften unterstützen neben dem sicheren Transport auch die sichere Handhabung im Endlager.

Während des Einlagerungsbetriebes sollen einzelne Strecken und Kammern bereits zur Herstellung des langfristig sicheren Endlagerzustandes verschlossen werden. Bis zum endgültigen Abschluss des gesamten Endlagers oder entsprechender Teile sollen Überwachung und Zugriffsmöglichkeit auf die Abfallgebinde sicherstellen, dass bei unvorhergesehenen Ereignissen und Störungen geeignete Gegenmaßnahmen ergriffen werden können.

Es sollen periodische Sicherheitsüberprüfungen durchgeführt werden. Hierdurch soll bewirkt werden, dass in der langen Betriebsphase eines Endlagers in der Größenordnung von 50 Jahren, in der auch die Verschlusskomponenten (Dämme, Schachtverschlüsse) errichtet werden, die Technik und die Sicherheitsnachweise für noch zu errichtende Maßnahmen dem fortschreitenden Stand von Wissenschaft und Technik angepasst werden.

Bereits bevor das Endlager in Betrieb genommen wird, muss wegen seiner hohen Bedeutung für die Sicherheit ein umsetzbares und geprüftes Verschlusskonzept vorliegen. Dieses soll dann entsprechend des sich weiterentwickelnden Standes von Wissenschaft und Technik fortentwickelt und im Rahmen der Sicherheitsüberprüfungen dargelegt werden. Es

muss dafür gesorgt sein, dass jederzeit die finanziellen und technischen Gegebenheiten eine eventuell notwendige unverzügliche Umsetzung des Verschlusskonzeptes ermöglichen.

Phase nach Verschluss des Endlagers

Die Sicherheit des Endlagers in der Phase nach seinem Verschluss soll durch ein gestaffeltes Barrierensystem gewährleistet werden, das seine Funktion passiv und wartungsfrei erfüllt. Entsprechend international üblicher Praxis soll durch ein robustes System mehrerer voneinander unabhängiger Barrieren (Diversität) selbst für den Fall, dass einzelne Barrieren nicht ihre volle Funktion erfüllen, die Sicherheit des Gesamtsystems erhalten bleiben. Die Barrieren sollen sich gegenseitig ergänzen. Unterschiedliche physikalische und chemische Komponenten sowie Prozesse sollen zur Sicherheit des Endlagers beitragen, so dass Unsicherheiten in der Leistungsfähigkeit einer oder mehrerer Komponenten durch die Leistungsfähigkeit anderer weitgehend kompensiert werden können (technische Robustheit) [16]. Die langfristigen Sicherheitsfunktionen müssen dabei hauptsächlich durch die geologischen und geotechnischen Barrieren erfüllt werden. Technische Barrieren können allenfalls ergänzend und nur für begrenzte Zeiträume zur Sicherheit beitragen. Ein solches Endlagerkonzept trägt maßgeblich zu einer Erhöhung des Vertrauens in die Sicherheit eines Endlagers bei [17].

Durch eine auf die Sicherheit des Endlagers abgestellte kriteriengesteuerte Standortauswahl soll erreicht werden, dass eine gut charakterisierbare günstige geologische Gesamtsituation mit einem definierten einschlusswirksamen Gebirgsbereich (siehe Glossar) vorliegt. Deren Entwicklung muss über einen Zeitraum von etwa einer Million Jahre möglichst zuverlässig prognostiziert werden können. Diese Anforderungen setzen belastbare wissenschaftliche Kenntnisse zur räumlichen Ausdehnung, zu den Rückhaltemechanismen und zu etwaigen Schädigungsprozessen der geologischen Barrieren voraus. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss sowohl eine abdichtende Wirkung gegen den Zufluss von Grundwasser als auch gegen den Austritt der Schadstoffe aufweisen. Außerdem müssen Einflüsse, die durch Temperaturänderungen und Gasbildung durch die Abfallgebinde entstehen, beherrscht werden [1]. Entsprechende Anforderungen gelten für die Verschlusskomponenten, mit denen die bergmännischen Eingriffe in die Funktion der geologischen Barrieren weitgehend geheilt werden.

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich soll Sicherheitsreserven haben.

Rückhaltemechanismen für Schadstoffe aus den Abfällen sollen auch dann wirken, wenn Teilbereiche des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs geschwächt sein sollten. Es können ergänzend technische Barrieren vorgesehen werden, die für einen begrenzten Zeitraum

wirken. Sie bieten zusätzliche Sicherheiten, z. B. bei einem unbeabsichtigten Eindringen in das Endlager sowie in dem Zeitraum, in dem die Wärmeentwicklung der hochradioaktiven Abfälle einen sicherheitsrelevanten Einfluss auf die geologischen Barrieren haben kann. Entsprechend internationaler Praxis dürfen bei den technischen Barrieren nur solche Materialien bzw. Konstruktionen zum Einsatz kommen, deren Eigenschaften gut bekannt bzw. deren Funktionen erprobt sind [16].

Die Übermittlung der Informationen (für zumindest einige Jahrhunderte) über das Endlager und sein Potenzial der Gefährdung zukünftiger Generationen soll so erfolgen, dass die handelnden Menschen zwangsläufig auf die Informationen zu dem Endlager stoßen müssen. Zumindest für einen überschaubaren Zeitraum kann so ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen (siehe Glossar) in das Endlager vermieden werden. Weiterhin kann die Wahrscheinlichkeit für ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich des Endlagers durch die Auslegung des Endlagers und durch die Wahl eines Standortes verringert werden, der nicht über wirtschaftlich bedeutende Ressourcen verfügt.

5.2 Nachweis der Sicherheit

Betriebsphase

Für die Betriebsphase werden anlagenspezifische Sicherheitsanalysen durchgeführt. Hierfür gelten sinngemäß die gleichen Anforderungen wie für sonstige kerntechnische Anlagen. Wichtige Sicherheitsanalysen betreffen beispielsweise den Strahlenschutz des Personals und der Umgebung, den Brandschutz, die Kritikalität (siehe Glossar) und Untersuchungen zu Einwirkung von Dritten.

Phase nach Verschluss des Endlagers

Der Nachweis der Langzeitsicherheit des Endlagers kann nur mit Hilfe von Modellen erfolgen, die die zu erwartenden und außergewöhnlichen Entwicklungen des Endlagers möglichst gut beschreiben. Die sicherheitsrelevanten Barrierefunktionen sollen möglichst vollständig erfasst, möglichst realitätsnah abgebildet und in ihren Wechselwirkungen möglichst genau beschrieben werden. Allerdings begrenzt prinzipiell neben ökonomischen Randbedingungen der mit einer Standorterkundung und Endlagerplanung erreichbare Kenntnisstand den Grad der Realitätsnähe. Dennoch ist eine möglichst realitätsnahe Ermittlung des Systemverhaltens insbesondere für einen Vergleich von Alternativen unabdingbare Voraussetzung, damit die Bewertung durch unterschiedlich konservative

Ansätze nicht verfälscht werden kann. Dagegen können im Genehmigungsverfahren für einen konkreten Standort auch konservative Berechnungsmodelle angewendet werden, um die Einhaltung der Genehmigungsvoraussetzungen zu belegen.

Für den Nachweis der Langzeitsicherheit werden die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik zu betrachtenden Entwicklungen des Endlagersystems (siehe Glossar) mit Hilfe repräsentativer Szenarien zusammengefasst und beschrieben. Diese Entwicklungen können sowohl von außen (z. B. Klimaveränderungen, Erdkrustenbewegungen) als auch durch das Endlager selber (z. B. Auswirkungen des vorgenommenen Bergbaus sowie Wärme- und Gasentwicklung der Abfälle) verursacht werden. Die Szenarien müssen alle in den Grenzen praktischer Vernunft denkbaren Entwicklungen erfassen (Szenarienanalyse (siehe Glossar)). Sie werden anschließend entsprechend ihrer Charakteristik den Entwicklungskategorien zugeordnet. Wie dies geschehen kann, ist beispielhaft in Anhang 1 dargestellt. Ihre Auswirkungen werden mit Hilfe standortspezifischer Sicherheitsanalysen (Konsequenzenanalyse) ermittelt, die sich wesentlich auf gut verstandene und wirksame Prozesse abstützen. Die Ergebnisse werden mit dem Risikoziel bzw. den Genehmigungsvoraussetzungen verglichen und hinsichtlich der Einhaltung der Ziele bewertet.

Soweit möglich, müssen diejenigen mechanischen, thermischen, hydraulischen und chemischen Belastungen der einzelnen Barrieren angegeben werden, bei denen ihre Funktion noch nicht beeinträchtigt wird. Die im Barrierensystem erwarteten Belastungen müssen dazu einen Sicherheitsabstand aufweisen.

Die Sicherheitsanalysen müssen Modelle und Daten verwenden, die für ein angemessenes Vertrauensniveau sorgen (z. B. durch die Angabe eines Konfidenzintervalls für statistisch verteilte Parameter – der Bereich, in dem sich das arithmetische Mittel der Grundgesamtheit mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit bewegt). Es dürfen keine Annahmen gemacht oder Daten verwendet werden, die zu einer derartigen Überschätzung der Konsequenzen führen, dass ein sinnvoller Vergleich von Alternativen und damit sicherheitsgerichtete Entscheidungen unmöglich werden.

Vergleiche von Alternativen sind in mehreren Projektphasen während der Planung und Errichtung eines Endlagers erforderlich. Mit dem Projektfortschritt nimmt im Allgemeinen die Zahl der Alternativen ab, der Kenntnisstand zu den einzelnen Alternativen wird umfangreicher und besser und der zulässige Aufwand für die Bereitstellung von Entscheidungsgrundlagen pro Alternative wird höher.

Besonders zu Beginn der Alternativenprüfung können lediglich ausgewählte repräsentative Entwicklungen und keine vollständigen Sätze von Entwicklungen zu Grunde gelegt werden. Diese Entwicklungen können zunächst nur qualitativ den verschiedenen Entwicklungskategorien zugeordnet werden. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten und die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Parameter zur Beschreibung der ausgewählten Entwicklungen können zunächst nur grob abgeschätzt werden. Deshalb haben Sensitivitätsanalysen (siehe Glossar) besonders in der Anfangsphase eine hohe Bedeutung.

Ergebnisse probabilistischer Modellrechnungen, die auf solchen Abschätzungen beruhen, sind als Risiko-Indikatoren, jedoch noch nicht als Risiko im strengen Sinne, zu bezeichnen. Erst mit zunehmendem Kenntnisstand, verbesserter Auswahl der repräsentativen Entwicklungen und Abschätzung ihrer Eintrittswahrscheinlichkeiten sowie mit zunehmender Realitätsnähe der Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Modellparameter nähert sich der Risiko-Indikator zunehmend dem tatsächlichen Risiko an.

Für den Vergleich von Alternativen ist der Risiko-Indikator eine zweckmäßige Größe, wenn

- die repräsentativen Entwicklungen für die verschiedenen Alternativen gleich oder vergleichbar gewählt werden,
- insbesondere außergewöhnliche Entwicklungen, die für die verschiedenen Alternativen sehr unterschiedlich sein können, objektiv vergleichbar in der Bewertung berücksichtigt werden und
- die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Parameter für die verschiedenen Alternativen gleich bzw. – soweit unterschiedliche Parameter auftreten – in vergleichbarer Weise gewählt werden.

Die Vorgehensweise bei der Ermittlung von Risiko-Indikatoren muss Gegenstand weiterer detaillierter Überlegungen sein und ist im Rahmen der Aufstellung einer Leitlinie zu erarbeiten, die fortschreitend dem sich weiter entwickelnden Stand von Wissenschaft und Technik angepasst werden kann.

Die Robustheit des Endlagers muss aufgezeigt werden. Die Unsicherheiten über das von einem Endlager ausgehende Risiko nehmen mit der Länge des Betrachtungszeitraums zu. Deshalb sollen zur Unterstützung der Sicherheitsanalysen, die quantitative Aussagen zum Risiko liefern, sowohl im Auswahl- als auch im Genehmigungsverfahren weitere Sicherheitsindikatoren betrachtet werden. Die Einbeziehung zusätzlicher

Sicherheitsindikatoren [18], die mit weniger Unsicherheiten verbunden sind, belegt die Leistungsrobustheit [19].

Im Genehmigungsverfahren muss dargelegt werden, dass offene Sachverhalte, welche die Sicherheit grundsätzlich in Frage stellen könnten, nicht mehr bestehen. Unsicherheiten bei der Bewertung müssen aufgezeigt werden. Die Unempfindlichkeit des Endlagers gegenüber Veränderungen der Systemeigenschaften und die Robustheit gegen Fehler müssen deshalb nachgewiesen werden.

In der Phase nach dem Verschluss des Endlagers lassen sich mehrere Zeiträume unterscheiden, die Auswirkungen auf die Führung des Sicherheitsnachweises haben (die genannten Zeitspannen sind als ungefähre Zeiten zu verstehen):

- **Zeitraum, in dem eine messtechnische Überwachung des Endlagersystems möglich ist (≈ 50 Jahre)**

Dies ist der Zeitraum, in dem das Endlager das höchste Aktivitätsinventar aufweist und die bergbaubedingten Auswirkungen auf die geologischen Barrieren am größten sind.

Obwohl sich die Sicherheit des Endlagers in der Phase nach seinem Verschluss nicht auf seine Überwachung abstützen darf, wird aus Gründen der Beweissicherung und der Qualitätssicherung eine messtechnische Überwachung vorgesehen. Von der Erdoberfläche aus wird ein Überwachungsprogramm durchgeführt, um das in den Sicherheitsanalysen zugrundegelegte Verhalten des Endlagers – soweit möglich – durch indirekte Untersuchungsmethoden zu bestätigen. Direkte Messungen unter Tage dürfen nur dann vorgenommen werden, wenn sie keine Beeinträchtigung des Barrierensystems bewirken und nicht zu unzuverlässigen Aussagen führen können.

Maßnahmen der Spaltmaterialüberwachung sind erforderlich und an die Dokumentation der Kenntnisse über das Endlager gebunden. Diese Kenntnisse müssen auch zum Ausschluss künftiger anderer Nutzungen des tiefen Untergrundes sicher in geeigneten amtlichen Dokumentationen verankert werden.

- **Zeitraum, in dem Informationen über das Endlager noch mit hoher Wahrscheinlichkeit erhalten werden können (≈ 500 Jahre)**

In dieser Zeit ist ein erheblicher Teil des Aktivitätsinventars des Endlagers zerfallen. Dabei handelt es sich insbesondere um Isotope mit einer Halbwertszeit von etwa 30 Jahren, die in relativ großen Mengen vorliegen und eine hohe Toxizität aufweisen (z.B. Strontium 90, Cäsium 137).

Für diesen Zeitraum soll das unbeabsichtigte menschliche Eindringen verhindert werden. Es ist dafür von zentraler Bedeutung, dass die Daten zum Endlager und der mit dem Endlager verbundenen Risiken überliefert werden.

Die Lagerorte der Abfälle im Endlager sollen bekannt bleiben und die hochradioaktiven Abfälle, die den größten Teil der Radioaktivität enthalten, sollen mit großer Wahrscheinlichkeit noch in einem sicher handhabbaren Zustand sein. Damit ist es in diesem Zeitraum – wenngleich auch mit hohem Aufwand – grundsätzlich möglich, die Abfälle aus dem Endlager wieder zu bergen, obwohl für die Rückholung der Abfälle keine gezielten Maßnahmen vorgesehen werden.

- **Zeitraum, in dem das Barriersystem des Endlagers nur geringen Veränderungen ausgesetzt ist (≈ 10.000 Jahre)**

Das Aktivitätsinventar des Endlagers ist immer noch so hoch, dass es eine Gefährdung für Mensch und Umwelt darstellt. Die Auswirkungen der Wärme- und Gasentwicklung der radioaktiven Abfälle auf die geologischen Barrieren lassen nach.

Die Eigenschaften aller Barrieren, auch außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, müssen für diesen Zeitraum sicher beschrieben werden können. Auf dieser Basis muss eine detaillierte Sicherheitsbewertung, die insbesondere die Wirkung der radioaktiven Abfälle auf die Barrieren berücksichtigt, für alle zu betrachtenden möglichen Szenarien durchgeführt werden. Es dürfen keine außergewöhnlichen Entwicklungen oder Ereignisse eintreten, die innerhalb von 10.000 Jahren zu einer Freisetzung von Schadstoffen in die Biosphäre führen.

- **Zeitraum, für den die Rückhaltung der Schadstoffe im einschlusswirksamen Gebirgsbereich gut beschrieben und beurteilt werden kann ($\approx 1.000.000$ Jahre)**

Bis zum Ende dieses Zeitraums nimmt das Aktivitätsinventar des Endlagers deutlich ab. Es ist aber immer noch so hoch, dass ein Einschluss der Schadstoffe erforderlich ist. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass die oberflächennahen geologischen Bedingungen und die heutigen Lebensbedingungen für Menschen, Fauna und Flora erhalten bleiben.

Ein Nachweis der Funktionstüchtigkeit technischer Barrieren kann über diesen langen Zeitraum nicht zuverlässig erbracht werden. Daher muss der Schwerpunkt der Sicherheitsbewertung auf die Beurteilung der sicherheitsrelevanten Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und der geologischen Barrieren insgesamt gelegt werden. Der wissenschaftlichen Erkenntnis sind jedoch Grenzen gesetzt; die Unsicherheiten in der Bewertung nehmen mit der Dauer des betrachteten Zeitraums zu. Die Eigenschaften der geologischen Barrieren müssen aber wegen der im Allgemeinen langsam ablaufenden geologischen Prozesse über einen Nachweiszeitraum von etwa einer Million Jahren gut aus der über sehr viel längere Zeiträume beschreibbaren geologischen Entwicklung in der Vergangenheit hergeleitet werden können.

Die Abschätzung von Risiken für Mensch und Umwelt, die sich aus einer Freisetzung von Schadstoffen ergeben, müssen auf der Basis eines idealisierten Berechnungsmodells für die Anreicherung und Wirkung von Schadstoffen in der Biosphäre ermittelt werden, da die zukünftigen Lebensgewohnheiten der Menschen und die Verhältnisse in der Umwelt nicht vorhergesagt werden können. Das Berechnungsmodell muss unter der Annahme, dass sich die grundlegenden Eigenschaften, Verhaltensweisen und Bedürfnisse des Menschen nicht geändert haben, aus der Konzentration von Schadstoffen in Boden, Wasser und Luft ein zu erwartendes Risiko für den Menschen abschätzen können.

- Zeitraum, in dem nur noch qualitative Aussagen zur Rückhaltung gemacht werden können (> 1.000.000 Jahre)

Das Aktivitätsinventar des Endlagers wird von Radionukliden mit sehr langen Halbwertszeiten bestimmt. Es ändert sich nur noch langsam. Wenngleich das Gefährdungspotenzial für Mensch und Umwelt durch die Abfälle stark abgenommen hat, ist eine Isolation der Abfälle von der Biosphäre immer noch erforderlich.

Ein quantitativer Nachweis der Sicherheit ist wegen der mit zunehmenden Zeiten immer größer werdenden Unsicherheiten in der Bewertung nicht mehr möglich. Für einen Vergleich von Alternativen lassen sich in diesem Zeitraum keine Bewertungsmaßstäbe ableiten. Dennoch muss qualitativ gezeigt werden, dass keine Anzeichen für eine abrupte sicherheitsrelevante Veränderung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs vorliegen.

Diskussionspapier

Literatur

- [1] Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, Empfehlung des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Berlin, 2002
- [2] Gemeinsame Stellungnahme der RSK und der SSK betreffend BMU-Fragen zur Fortschreibung der Endlager-Sicherheitskriterien (05./06.12.2002), Reaktor-Sicherheitskommission und Strahlenschutzkommission, Bonn, 2002
- [3] Gesetz zu dem Gemeinsamen Übereinkommen vom 5. September 1997 über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle (Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung) vom 13.08.1998; BGBl. Jahrgang 1998, Teil II Nr. 31, ausgegeben zu Bonn am 20.08.1998, Seite 1752 - 1780
- [4] The Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series No. 111-F, IAEA, Wien, 1995
- [5] Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste (Publication 81), ICRP, Stockholm, 1998
- [6] Stepwise Approach to Decision Making for Long-term Radioactive Waste Management, OECD/NEA, Paris 2004
- [7] Übereinkommen über nukleare Sicherheit – Bericht der Regierung der Bundesrepublik Deutschland für die Dritte Überprüfungstagung im April 2005, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn, 2004
- [8] Biological Effects after Prenatal Irradiation (Embryo and Fetus), ICRP Publication 90, Pergamon Press, Oxford and New York, ICRP, Stockholm, 2004
- [9] 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, SSI FS 1998:1, Stockholm, 1999

- [10] Technical Bases for Yucca Mountain Standards, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C., 1995
- [11] Recommendations of the ICRP, ICRP Publication 60, Pergamon Press, Oxford and New York, ICRP, Stockholm, 1991
- [12] Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP 9, Pergamon Press, Oxford, ICRP, Stockholm, 1966
- [13] Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP 26, Annals of the ICRP 1(3), Pergamon Press, Oxford, ICRP, Stockholm, 1977
- [14] van Dorp, Egan, Kessler, Nilsson, Pinedo, Smith Torres: Biosphere modelling for the assessment of radioactive waste repositories; the development of a common basis by the BIOMOVS II reference biospheres working group. Journal of Environmental Radioactivity 42, Issues 2-3. Pages 225-236, 1998
- [15] Beitrag zur Erstellung einer Referenzbiosphäre zur Berechnung der in der Nachbetriebsphase eines Endlagers für radioaktive Stoffe hervorgerufenen potentiellen Strahlenexposition unter Berücksichtigung des Einflusses des Klimas (BMU-2003-623 – Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz -), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn, 2003
- [16] Post-closure Safety Case for Geological Repositories – Nature and Purpose. OECD/NEA, Paris, 2004
- [17] Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories – Its Communication and Development, OECD/NEA, Paris, 1999
- [18] Becker, D.-A., Buhmann, D., Alonso, J., Storck, R., Cormenzana, J.-L., Hugi, M., van Germert, F., O'Sullivan, P., Laciok, A., Marivoet, J., Sillen, X., Nordmann, H., Vieno, T., Niemeyer, M.: Testing of Safety and Performance Indicators (SPIN). European Commission, Report EUR-199965, Brüssel, 2003

- [19] Safety Indicators in Different Time Frames for the Safety Assessment of Underground Radioactive Waste Repositories (TECDOC-767), IAEA, Wien, 1998

DISKUSSIONSPÄTTER

Anhang 1

Zuordnung von Entwicklungen des Endlagers zu den drei Entwicklungskategorien mit Hilfe von Szenarien

Vorbemerkung

Es wird in der Sicherheitsphilosophie für die Endlagerung radioaktiver Abfälle eine Zuordnung von Szenarien zu den drei Entwicklungskategorien für das verschlossene Endlager vorgeschlagen (vgl. Kap. 3.2.). In diesem Anhang wird beispielhaft dargestellt, wie eine solche Zuordnung begründet vorgenommen werden kann (Abb. 8). Dabei werden sowohl die Arbeiten einer international besetzten Arbeitsgruppe zu den Sicherheitskriterien im Rahmen eines Umwelt-Forschungsplan-Vorhabens des BMU wie auch die vom *Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte* (AkEnd) vorgeschlagene Vorgehensweise bei der Standortsuche berücksichtigt.

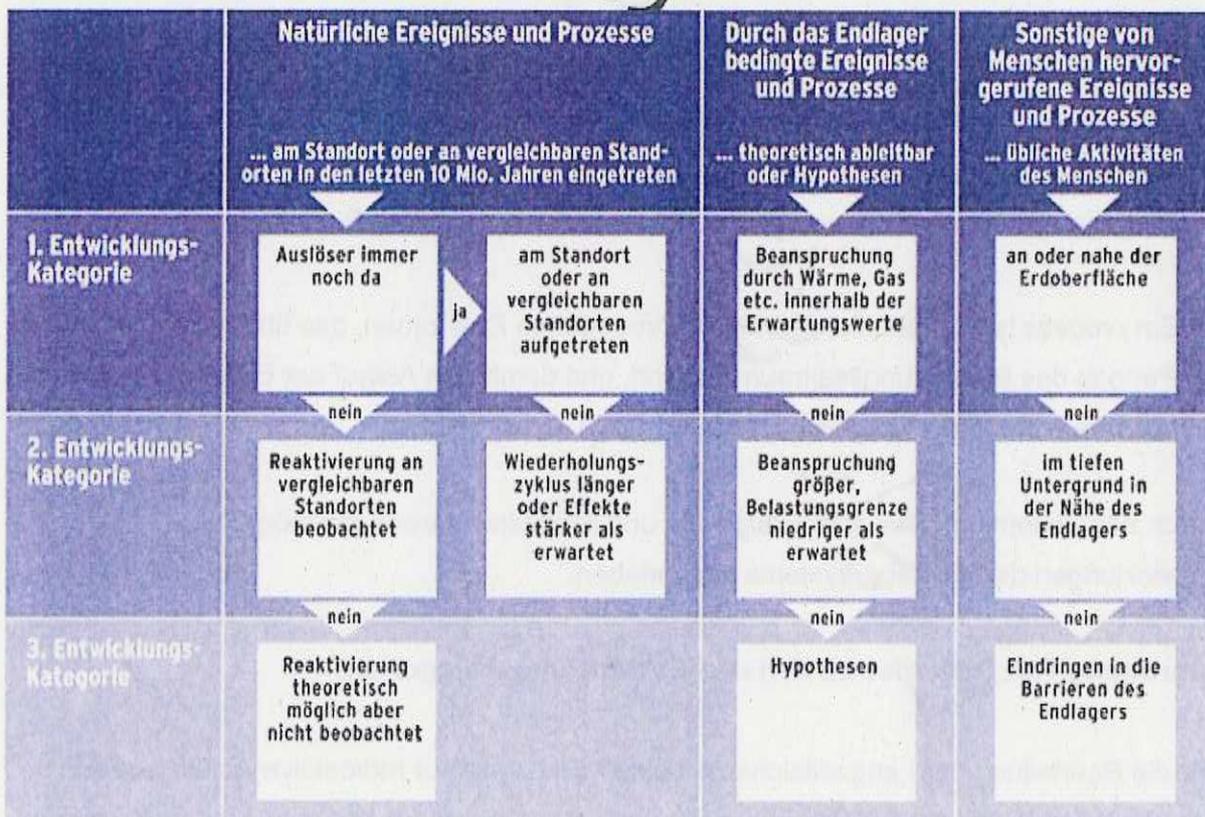


Abbildung 8: Einordnung von Ereignissen und Prozessen in Entwicklungskategorien

Definitionen

- Ein *Szenarium* (siehe Glossar) beschreibt eine mögliche Entwicklung des Endlagersystems mit seinen sicherheitsrelevanten Eigenschaften. Die Entwicklung wird durch das Eintreten von Ereignissen und den Ablauf von Prozessen bestimmt.

Die Merkmale, welche die Entwicklung eines Endlagers beschreiben, werden international als FEP (von engl. *features, events, processes* (siehe Glossar)) bezeichnet.

Dabei wird unterschieden zwischen

- FEP mit natürlichen Ursachen,
- FEP, die durch das Endlager und
- FEP, die durch menschliches Handeln

verursacht werden.

- Ein *feature* ist eine sicherheitsrelevante Eigenschaft, die für die Integrität von Barrieren oder für die Freisetzung bzw. den Transport von Schadstoffen aus dem Endlager von Bedeutung ist (z. B. Wasser führende Kluff).
- Ein *event* ist ein natürliches oder anthropogenes Phänomen, das über eine kurze Periode des Beurteilungszeitraums auftritt, und damit den weiteren Ablauf der Entwicklung des Endlagersystems beeinflusst, also ein Kurz-Zeit-Phänomen (z.B. Erdbeben).
- Ein *process* ist ein natürliches oder anthropogenes Phänomen, das über eine signifikante Periode des Beurteilungszeitraums auftritt, und damit den Ablauf der Entwicklung mit beschreibt, also ein Lang-Zeit-Phänomen (z.B. Erosion).

Durch das Zusammenspiel aller Ereignisse und Prozesse werden die möglichen Entwicklungen des Endlagersystems beschrieben.

Zuordnung von Szenarien zu den drei Entwicklungskategorien

Für die Beurteilung der Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle werden zuerst systematisch alle FEP zusammengestellt. Aus diesen werden zunächst die Szenarien identifiziert, die in den Grenzen praktischer Vernunft alle denkbaren Entwicklungen des Endlagersystems erfassen. Sie werden anschließend in Gruppen zusammengefasst, die sich qualitativ deutlich voneinander unterscheiden.

Diese Gruppen von Szenarien werden dann den drei Entwicklungskategorien für die Phase nach Verschluss des Endlagers zugeordnet. Die Entwicklungskategorien sind dadurch charakterisiert, dass

der ersten Entwicklungskategorie zu *erwartende Entwicklungen* des Endlagersystems,
der zweiten Entwicklungskategorie *außergewöhnliche Entwicklungen* und
der dritten Entwicklungskategorie weitere *spezielle Entwicklungen*
zugeordnet sind.

Für die Zuordnung der Szenarien zu den drei Entwicklungskategorien werden innerhalb jedes betrachteten Szenariums diejenigen FEP herangezogen, die für die qualitative Unterscheidung der Szenarien maßgeblich sind. Maßgeblich für die Zuordnung zu den verschiedenen Entwicklungskategorien ist die Einschätzung, wie wahrscheinlich die FEP eines Szenariums ein- oder auftreten. Damit bestimmt die Eintrittswahrscheinlichkeit für das unwahrscheinlichste FEP die Wahrscheinlichkeit des gesamten Szenariums.

Einordnung eines FEP entsprechend der Erwartungshaltung für das Ein- oder Auftreten

Zur Einordnung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines FEP müssen die FEP so formuliert sein, dass die Frage "Tritt das FEP auf/ein?" sinnvoll zu beantworten ist. Hierfür ist folgendes zu beachten:

- *feature*: Die Eigenschaft muss in einer für das Eintreten des jeweiligen Szenariums notwendigen Qualität vorliegen.
(Beispiel: "Kluft im einschlusswirksamen Gebirgsbereich": Es ist nicht allein das Vorliegen dieser Kluft maßgeblich, sondern diese muss hinreichend abgedichtet oder leitfähig und hinreichend nahe am Einlagerungsbereich des Endlagers gelegen sein, damit bestimmte Szenarien zu erwarten, unwahrscheinlich oder ausgeschlossen sind).
- *event, process*: Das Ereignis bzw. der Prozess muss in einer für das Eintreten des Szenariums notwendigen Qualität und zu einer für das Eintreten des Szenariums notwendigen Zeit auftreten (Beispiel *event* "Erdbeben": Das Erdbeben muss in einer für die Bildung von Wegsamkeiten ausreichenden Stärke innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Million Jahren auftreten, um ein Szenarium zu initiieren oder maßgeblich zu bestimmen).

Einordnung von *features*

Es wird folgende Einordnung vorgeschlagen:

- Aus der Standorterkundung sowie aus Kenntnissen über vergleichbare Standorte abgeleitete *features* werden in die Klasse der zu erwartenden FEP eingeordnet (Beispiel: wasserführende Kluff ist im Rahmen der Standorterkundung vorgefunden worden).
- Kann einem *feature* auf Grund der Genauigkeit der Standorterkundung bzw. der Qualitätsmerkmale der technischen und geotechnischen Anlagen des Endlagers eine deutlich geringere Eintrittswahrscheinlichkeit als 1 zugeordnet werden (z.B. durch Heranziehen von Statistiken über Produktionsfehler von Abfallbehältern oder anderen technischen Komponenten oder durch den Auflösungsgrad geophysikalischer Detektionstechniken), wird das *feature* in die Klasse der außergewöhnlichen FEP eingeordnet. Obgleich z.B. geologischen *features* in der Regel keine streng abgeleiteten Zahlen für die Eintrittswahrscheinlichkeiten zugeordnet werden können, sind damit Eintrittswahrscheinlichkeiten gemeint, die sich qualitativ deutlich von denen der zu erwartenden *features* unterscheiden. Dies muss, wenn keine belastbaren Zahlen vorliegen, durch eine qualitative Begründung und breit abgestützte Expertenschätzungen abgeleitet werden.
- Ein *feature* kann ausgeschlossen werden, wenn es keine Gründe für sein Auftreten gibt, wenn die Erkundungsergebnisse belegen, dass es nicht vorhanden ist; oder wenn die zu treffenden Annahmen weit außerhalb jeglicher Erfahrungswerte liegen.

Einordnung von Ereignissen und Prozessen mit natürlichen Ursachen

FEP zur Beschreibung natürlicher Vorgänge erfassen geologische, klimatologische und astronomische Ereignisse und Prozesse. Anhand der folgenden Vorgehensweise kann die Einordnung der FEP vorgenommen werden:

- Ist ein Ereignis oder ein Prozess in den letzten 10 Millionen Jahren am Standort oder an vergleichbaren Standorten nicht aufgetreten, braucht das FEP nicht weiter betrachtet zu werden (z. B. Hauptphase einer Gebirgsbildung liegt mehr als 10 Millionen Jahre zurück).
- Ereignisse und Prozesse, die in den letzten 1 Million Jahren aufgetreten sind, rezent (siehe Glossar) andauern oder / und über ein großes Wiederholungspotenzial für die

kommenden 1 Million Jahre verfügen, werden in die Klasse der zu erwartenden FEP eingeordnet (z. B. Inlandsvereisung, Dauerfrost (zyklisch), Hebung, Erosion (rezent andauernd)).

- Handelt es sich um Ereignisse und Prozesse, die in den letzten 10 Millionen Jahren zwar aufgetreten sind, die aber weder rezent andauern noch nachgewiesenermaßen zyklisch mit Frequenzen unter 1 Million Jahren auftreten, werden sie in die Klasse der außergewöhnlichen FEP eingeordnet. Dies gilt auch für Ereignisse und Prozesse, die zu Effekten führen, die in ihrer Stärke außerhalb der beobachteten Schwankungsbreite liegen.
- Wenn das Ereignis oder der Prozess in den letzten 10 Millionen Jahren am Standort oder an vergleichbaren Standorten ein- oder aufgetreten ist, der Antriebs- oder Auslösemechanismus am Standort aber nicht mehr existiert, eine Reaktivierung an vergleichbaren Standorten aber beobachtet wurde, wird das FEP ebenfalls in die Klasse der außergewöhnlichen FEP eingeordnet (z. B. Reaktivierung von Klüftzonen).
- Wenn das Ereignis oder der Prozess in den letzten 10 Millionen Jahren am Standort oder an vergleichbaren Standorten ein- oder aufgetreten ist, der Antriebs- oder Auslösemechanismus am Standort jedoch nicht mehr existiert, eine Reaktivierung an vergleichbaren Standorten nicht beobachtet wurde, aber theoretisch möglich ist, wird das FEP in die Klasse der Spezialfälle eingeordnet (z. B. Entstehung neuer Klüftzonen).

Ereignisse und Prozesse, die durch das Endlager ausgelöst werden

Erfahrungen über die langzeitigen Auswirkungen eines Endlagers liegen nur in sehr begrenztem Maße vor. Deshalb müssen sich die Vorstellungen über Ereignisse und Prozesse, die durch das Endlager verursacht werden (Wärmeentwicklung, Gasbildung, Konvergenz der Hohlräume sowie chemische Wechselwirkungen), im Wesentlichen auf Modellvorstellungen und Modellrechnungen abstützen.

Es wird folgende Einordnung vorgeschlagen:

- Werden in den Modellvorstellungen und Berechnungen Daten und Berechnungsansätze verwendet, die innerhalb einer durch Erfahrungswerte (auf die Standortverhältnisse übertragbare Messwerte) abgestützten Schwankungsbreite liegen, werden die daraus

abgeleiteten Ereignisse und Prozesse in die Klasse der zu erwartenden FEP eingeordnet.

- Werden in den Modellvorstellungen und Berechnungen Daten verwendet, die außerhalb der durch Erfahrungswerte abgestützten Schwankungsbreite liegen, werden die daraus abgeleiteten Ereignisse und Prozesse in die Klasse der außergewöhnlichen FEP eingeordnet. Hierunter fallen z. B. Ereignisse und Prozesse, die nur zustande kommen können, wenn beispielsweise ungewöhnlich hohe Gasbildungsraten aus den Abfällen oder eine extrem geringe thermo-mechanische Belastbarkeit von geologischen Barrieren angenommen wird.
- Ereignisse und Prozesse, die nur auf Grund hypothetischer Modellvorstellungen und Berechnungen abgeleitet werden können, und somit durch keine Erfahrungswerte und plausiblen theoretischen Annahmen gestützt sind, können zur Bewertung von Sicherheitsreserven herangezogen werden. Sie werden in die Klasse der Spezialfälle eingeordnet und in Sicherheitsanalysen üblicherweise als "What if"-Fälle bezeichnet.

Ereignisse und Prozesse, die durch menschliches Handeln ausgelöst werden

- Ereignisse oder Prozesse, die durch heute technisch und gesellschaftlich plausible Aktivitäten auf oder nahe an der Erdoberfläche verursacht werden, werden in die Klasse der zu erwartenden FEP eingeordnet (z. B. Bau eines Brunnens).
- Ereignisse oder Prozesse, die durch heute technisch und gesellschaftlich plausible Aktivitäten im tieferen Untergrund in der Nähe des Endlagers verursacht werden, werden in die Klasse der außergewöhnlichen FEP eingeordnet.
- Ereignisse und Prozesse, die durch ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Endlager verursacht werden, werden in die Klasse der Spezialfälle eingeordnet.

Schema zur Zuordnung eines Szenariums zu einer Entwicklungskategorie

Ist mindestens ein das Szenarium definierender FEP auszuschließen, ist das Szenarium nicht weiter zu betrachten.

- Das Szenarium wird der ersten Entwicklungskategorie (*zu erwartende Entwicklungen*) zugeordnet, wenn alle das Szenarium definierenden FEP erwartet werden müssen.
- Das Szenarium wird der zweiten Entwicklungskategorie (*außergewöhnliche Entwicklungen*) zugeordnet, wenn mindestens ein das Szenarium definierendes FEP nicht die zu erwartenden Entwicklungen repräsentiert und alle FEP weder auszuschließen sind noch einen Spezialfall definieren.
- Das Szenarium wird der dritten Entwicklungskategorie (*spezielle Entwicklungen*) zugeordnet, wenn mindestens ein das Szenarium definierendes FEP in die Klasse der Spezialfälle eingeordnet wurde.

Diskussionspapier

Anhang 2

Existierende risikobasierte Expositionsstandards

Während in Deutschland risikobasierte Grenz- und Zielwerte fehlen, werden in anderen Staaten und supranationalen Organisationen risikobasierte Schutzziele festgelegt bzw. empfohlen. Die folgende Zusammenstellung gibt darüber einen Überblick.

(a) Allgemeine Regelungen

USA:

Die weltweite Entwicklung risikobasierter Standards im gesundheitsbezogenen Umwelt- und Verbraucherschutz wurde wesentlich beeinflusst durch rechtliche und administrative Vorgaben in den USA. Im Jahr 1958 wurde mit dem sog. **Delaney Clause (Federal Food, Drug, and Cosmetic Act, FFCA § 409(c)(3)(A))** [1] ein absoluter Hygienestandard im Lebensmittelrecht verankert. Darin wurde gefordert, dass keine Substanzen mit krebserregendem (karzinogenem) Potenzial als Zusätze im weiten Sinne in Lebensmitteln enthalten sein dürfen. Diese weitgehende Festlegung wurde später in Richtlinien der **Food and Drug Administration (FDA)** (u.a. 47FR14464) [2] relativiert und durch einen de minimis Ansatz (siehe Glossar) ersetzt, der ein Inzidenzrisiko (Risiko für Neuerkrankungen) von 10^{-6} bezogen auf die Lebenszeit vorgibt. Dieses Risiko wird von der FDA als virtually safe (praktisch sicher) charakterisiert. Die Risikoabschätzungen stützt die FDA im Grundsatz auf ein Schätzverfahren für Krebsrisiken, das ursprünglich von **Gaylor and Kodell (1980)** [3] veröffentlicht wurde.

Dieser von der FDA übernommene Ansatz zur Abschätzung der Dosis-Wirkungs-Beziehung im niedrigen Dosisbereich besteht vereinfacht ausgedrückt aus zwei Schritten. Zunächst wird durch Analyse der beobachteten Daten die Dosis bestimmt, die das (untere) Ende des Beobachtungsbereichs vom Beginn des Extrapolationsbereichs (siehe Glossar) trennt. Als Standard wird hier eine Dosis gewählt, bei der die Krebsinzidenz um 1-10% erhöht ist. Für diese Dosis wird die untere Grenze des Vertrauensbereichs ermittelt (als Standard der 5. Perzentilwert). Von dieser unteren Grenze des Vertrauensbereichs des Extrapolationspunktes erfolgt im zweiten Schritt eine lineare Extrapolation zum Nullpunkt. Dieses Verfahren gilt als Standard-Verfahren für alle genotoxischen Substanzen.

Der gleiche Ansatz zur Risikoschätzung wird von der Umweltschutzbehörde der USA (EPA) verfolgt. Dieser ist ausführlich in den Guidelines for Carcinogen Risk Assessment

(51FR33992) [4] von 1986 und in der Überarbeitung von 2003 (EPA/630/P-03/001A, Final Draft Document) [5] beschrieben. In ihren Festlegungen zu karzinogenen Substanzen hat die EPA das System der FDA weiterentwickelt. Grundsätzlich werden Häufigkeitsverteilungen der Immissionen auf den Menschen betrachtet. Für die Risikoabschätzung legt die EPA sogenannte MIR-Werte (maximum individual risk) fest. Diese Werte bestimmen das obere abgeschätzte Risiko einer Krebserkrankung als Folge einer lebenslangen Exposition. Die dabei zugrunde gelegten Expositionsabschätzungen werden mit möglichst realistischen Modellen und Modellparametern durchgeführt. Zur Expositionsabschätzung selbst wird hingegen von der EPA ein konservativerer Ansatz verfolgt; hier wird mit dem Konzept der maximal exponierten Person (MEI, maximum exposed individual) das höchste abgeschätzte Risiko einer hypothetisch exponierten Person zugrundegelegt, unabhängig davon ob erwartet werden kann, dass reale Personen diese Aufenthalts- und Lebensbedingungen tatsächlich verwirklichen. Beide Abschätzungen sind obere Risikoabschätzungen im konservativen Sinn.

Die EPA formuliert ihre allgemeinen Grundsätze beispielhaft in der Regulation von Benzol in Außenluft wie folgt:

... in protecting public health with an ample margin of safety, we strive to provide maximum feasibility protection against risks to health from hazardous air pollutants by (1) protecting the greatest number of persons possible to an individual lifetime risk level not higher than approximately 1 in 1 million; and (2) limiting to no higher than approximately 1 in 10 thousand [i.e., 100 in 1 million] the estimated risk that a person living near a facility would have if he or she were exposed to the maximum pollutant concentrations for 70 years. (54FR38044, September 14, 1989) [6] (... um die Gesundheit der Bevölkerung mit einem ausreichenden Sicherheitsabstand zu schützen, sind wir bestrebt, einen durchführbaren, möglichst weitgehenden Gesundheitsschutz vor den Risiken von Luftschadstoffen zu erreichen, in dem (1) die größtmögliche Zahl von Personen auf einem individuellen Level des Lebenszeitriskos von nicht höher als etwa 1 in 1 Million geschützt werden und in dem (2) das Risiko von Personen, die in der Nähe einer Anlage leben, begrenzt wird auf ein Risiko von etwa 1 in Zehntausend (d.h. 100 in 1 Million), wenn sie oder er mit der maximal zulässigen Schadstoffkonzentration über 70 Jahre exponiert wird. ...)

Diese allgemeinen Grundsätze wurden von der EPA wiederholt bestätigt, unter anderem im **'Residual Risk Report to Congress'** (EPA-453/R-99-001, March 1999) [7], in den **'National Primary Drinking Water Regulations; Radionuclides'** (Final Regulation 65FR76708, December 7, 2000; [8] Final Draft 65FR21576, April 21, 2000 [9]) und in einer aktuellen Standardsetzung im August 2004 (69FR48338, August 9, 2004) [10].

Niederlande:

In den Niederlanden wurde im Rahmen von Festlegungen zum Ersten Nationalen Umweltschutzprogramm eine Empfehlung zum **Omgaan met Risico's** (VROM, 1989) [11] veröffentlicht. Für karzinogene Substanzen wird die Grenze für das Individualrisiko (siehe Glossar) mit 10^{-6} und die des Restrisikos auf 10^{-8} festgelegt. Diese Werte beziehen sich auf zusätzliche Gesundheitsrisiken pro Jahr. Damit ergeben sich Lebenszeitriskiken von etwa $7 \cdot 10^{-5}$ bzw. $7 \cdot 10^{-7}$. Zusätzlich wurden Grenzen für das Populationsrisiko festgelegt, die primär für die Auslegung industrieller Anlagen gegen schwerwiegende Unfälle Bedeutung besitzen.

Deutschland und die EU:

In Deutschland und der Europäischen Union sind vergleichbare Konzepte für Risikostandards weniger verbreitet. Derartige Verfahren kommen aber zumindest implizit in Deutschland zur Anwendung, z.B. weil deutsche Vertreter bei der Etablierung von Empfehlungen internationaler Institutionen, die quantitative risikobasierte Schutzkonzepte verfolgen, ebenso beteiligt sind, wie bei der Umsetzung dieser Empfehlungen in europäisches bzw. deutsches Recht. Im Lebensmittelbereich erfolgen Risikoabschätzung und Empfehlungen zur Standardsetzung im wesentlichen durch Gremien der FAO und WHO, wie der Codex Alimentarius Commission. Deren Vorgehensweisen sind vergleichbar mit denen der USA FDA.

Im Bereich des Trinkwassers und der Luft veröffentlicht die WHO sog. Guidelines (WHO Air Quality Guidelines for Europe, 2000 [12]; WHO Guidelines for Drinking Water Quality, 2004 [13]). Diese geben in Bezug auf die konkrete Standardsetzung, die dann durch regionale oder nationale Institutionen erfolgen soll, einen Risikokorridor von 10^{-6} bis 10^{-4} (als Individual-Lebenszeitrisiko) vor, wobei die WHO implizit den eigenen Schwerpunkt auf ein Schutzziel nur das Lebenszeitrisiko von 10^{-5} legt. Die Abschätzungen, auf denen diese Empfehlungen zu Standardsetzungen basieren, stellen meist obere, konservative Risikowerte dar. Die Prüf- und Maßnahmewerte nach dem Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG) [14] wurden so abgeleitet, dass sie einem einzelstoffbezogenen Lebenszeit-Risiko von rechnerisch 10^{-5} für eine Krebserkrankung entsprechen. Für die spezifischen Risikoschätzer wird auf die entsprechenden Stoffmonographien der WHO, USA EPA und anderer verwiesen.

In neueren Entscheidungen deutscher Gerichte wurden ebenfalls risikobasierte Schutzkonzepte bzw. Begründungen herangezogen. So wurde unter anderem im Zusammenhang mit Genehmigungsverfahren von Müllverbrennungsanlagen festgestellt,

dass individuelle Lebenszeitriskien, die durch Emissionen karzinogener Substanzen verursacht werden, von weniger als 10^{-6} für Mitglieder der Bevölkerung oder weniger als $5 \cdot 10^{-7}$ für empfindliche Subpopulationen (Kinder, alte Menschen) als unerheblich einzustufen sind (BVerwG, 7B25/98 [15]; VGH München, 22A99.40009 [16]).

(b) Regelungen im Strahlenschutz

Im Bereich des Strahlenschutzes wurde mit der **Empfehlung 26** der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP, 1977) [17] erstmals explizit ein risikobasierter Ansatz gewählt. Für die Bevölkerung wurde über einen Vergleich mit Unfalltoten im öffentlichen Personenverkehr ein "Akzeptanzbereich" eines Individualrisikos von etwa 10^{-5} pro Jahr (entspricht etwa $7 \cdot 10^{-4}$ als Lebenszeitrisiko) abgeleitet. Auf der Basis des zur damaligen Zeit abgeleiteten Risikokoeffizienten ($1,25 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$) für Strahlenrisiken (hier im wesentlichen die Krebsmortalität) wurde aus dem Risikowert 10^{-5} pro Jahr ein Dosisgrenzwert von 1 mSv pro Jahr für eine lebenslange Ganzkörperexposition abgeleitet. Für maximal exponierte Mitglieder sog. kritischer Gruppen (kerntechnisches Personal, Medizin) wurde der Grenzwert auf 5 mSv pro Jahr festgelegt - dies entsprach nach dem wissenschaftlichen Kenntnisstand des Jahres 1977 einem Lebenszeitrisiko einer tödlich verlaufenden, strahleninduzierten Krebserkrankung von etwa $4 \cdot 10^{-3}$.

In der **Empfehlung 60** der ICRP (1991) [18] wurde dieser explizite Risikobezug nicht wieder aufgenommen. Grundlage der Empfehlungen von 1991 war nunmehr ein Risikofaktor für fatale Krebserkrankungen, der um den Faktor 4 höher war als der von 1977 ($5 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$). Der Dosisgrenzwert für die Bevölkerung wurde mit 1 mSv pro Jahr beibehalten. Eine lebenslange Exposition von 1 mSv pro Jahr entspricht einem zusätzlichen Lebenszeitrisiko von etwa $4 \cdot 10^{-3}$. In der Strahlenschutzliteratur findet sich dafür häufig das strahlenbedingte zusätzliche Risiko pro Jahr, das einem Wert von etwa $5 \cdot 10^{-5}$ entspricht.

Die in weiteren Dokumenten der ICRP unter anderem zur Endlagerung (ICRP 81, 1998) [19] genannten Dosiswerte von 0,3 mSv pro Jahr und 0,01 mSv pro Jahr als Freigabewert entsprechen Lebenszeitriskien von etwa $1 \cdot 10^{-3}$ bzw. $4 \cdot 10^{-5}$.

In seiner Empfehlung von 1987 hat das amerikanische **National Council on Radiation Protection and Measurements** (NCRP 91, 1987) [20] das Konzept eines sog. "negligible individual risk levels" (NIRL, unbedenklicher individueller Risikolevel) entwickelt. Es wurde ein NIRL von 10^{-7} pro Jahr bzw. $7 \cdot 10^{-6}$ für die Lebenszeit definiert. Basierend auf dem damaligen Risikokoeffizienten für tödliche strahleninduzierte Krebserkrankungen der ICRP-

26 ($1,25 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$) wurde eine Dosis von 0,01 mSv abgeleitet, die entsprechend der Terminologie als vernachlässigbar klein charakterisiert wurde. In der Fortschreibung des NIRL-Konzepts (NCRP 116, 1993) [21] wurde trotz der zwischenzeitlich von der ICRP in ihrer Publikation 60 vorgenommenen Erhöhung des Risikoeffizienten für tödlich verlaufende Krebserkrankungen um den Faktor 4 der ursprünglich aus den oben angegebenen Risikogrenzen abgeleitete Dosiswert nicht entsprechend abgesenkt, sondern der Wert von 0,01 mSv pro Jahr unverändert beibehalten. Auf der Basis der heute geltenden Risikoeffizienten entspricht dieser Wert daher bei lebenslanger Exposition mit einem Lebenszeitrisiko von $4 \cdot 10^{-5}$ einem Individualrisiko oberhalb des NIRL.

Vergleichbar der Situation im Bereich des Umwelt- und Verbraucherschutzrechts stellt sich die Situation im Strahlenschutzrecht dar. Obgleich risikobasierte, quantifizierende Strahlenschutzkonzepte in Europa und Deutschland nicht verbreitet sind, kommen diese dennoch durch die Umsetzung in europäisches bzw. deutsches Strahlenschutzrecht implizit zum Tragen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass außerhalb des Strahlenschutzes das Schutzziel eines lebenslangen Individualrisikos durch eine Belastung mit karzinogenen Substanzen von etwa 10^{-5} bis 10^{-6} die international und national weitgehend anerkannte risikobasierte Grundlage von Standardsetzungsverfahren im gesundheitsbezogenen Umweltschutz ist. Bei einer Einordnung der derzeit geltenden Strahlenschutzstandards in den Kontext der allgemeinen Standardsetzung im Umwelt- und Verbraucherschutz ist zu beachten, dass die Schätzung der Risikoeffizienten für Strahlung einen mittleren Wert, die für chemische Karzinogene hingegen meist eine obere, konservative darstellt. Weiterhin wird im Strahlenschutz regelmäßig auf tödliche Krebserkrankungen (Mortalität) abgestellt, bei Chemikalien dagegen auf Krebsneuerkrankungen (Inzidenz). Auf die gebräuchlichen Angaben von Strahlenrisiken pro Jahr im Gegensatz zu Chemikalienrisiken pro Lebenszeit wurde bereits hingewiesen. Außerdem ist anzumerken, dass die Angaben im Strahlenschutz sich auf die Summe aller Expositionen durch ionisierende Strahlung bezieht, bei Chemikalien dagegen in der Regel auf Einzelsubstanzen. Dennoch bleibt festzuhalten, dass Strahlenschutzstandards im Vergleich zu Chemikalienstandards im Umwelt- und Verbraucherschutzbereich die untere Grenze von Schutzstandards darstellen.

Literatur

- [1] FFDCa, Federal Food, Drug, and Cosmetic Act 21 U.S.C. §409(c)(3)(A)
- [2] 47FR14464, Policy for Regulating Carcinogenic Chemicals in Food and Color Additives; Advance Notice of Proposed Rulemaking, 47 Federal Register USA 14464, April 2nd, 1982
- [3] Gaylor, D.W. and R.L. Kodell (1980) Linear interpolation algorithm for low-dose risk assessment of toxic substances. *J. Environ. Path. Toxicol.* 4:305-312.
- [4] 51FR33992, Guidelines for Carcinogenic Risk Assessment. 51 Federal Register USA 33992, September 24, 1986.
- [5] EPA/630/P-03/001A, Draft Final Guidelines for Carcinogen Risk Assessment, Environmental Protection Agency USA, February 27, 2003
- [6] 54FR38044, National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants; Benzene Emissions from Maleic Anhydride Plants, Ethylbenzene/Styrene Plants, Benzene Storage Vessels, Benzene Equipment Leaks, and Coke By-Products Recovery Plants. 54 Federal Register USA 38044, September 14, 1989.
- [7] EPA-453/R-99-001, Residual Risk Report to Congress. Office of Air Quality Planning and Standards, Environmental Protection Agency USA, March 1999
- [8] 65FR76708, National Primary Drinking Water Regulations; Radionuclides; Final Rule, 65 Federal Register USA 76707, December 7, 2000
- [9] 65FR21576, National Primary Drinking Water Regulations; Radionuclides; Final Draft, 65 Federal Register USA 21576, April 21, 2000
- [10] 69FR48338, National Emission Standards for Coke Oven Batteries; Proposed Rule, 69 Federal Register USA 48338, August 9, 2004
- [11] VROM, Netherlands Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment. Omgaan met Risico's, Nationaal Milieubeleidsplan 1. Tweede Kamer, Vergaderjaar 1988-1989, 21137, nr. 5, Den Haag, 1989.
- [12] WHO, World Health Organisation Air Quality Guidelines for Europe, 2nd Edition, WHO Regional Publications, European Series No. 91, Copenhagen, 2000.
- [13] WHO, World Health Organisation Guidelines for Drinking Water Quality, 3rd Edition, WHO Geneva, 2004.

- [14] BBodSchG, Bundesbodenschutzgesetz, 17. März 1998, BGBl I 1998, 502
- [15] BVerwG 7B25/98, Planfeststellungsbeschluss für Müllheizkraftwerke, NVwZ 11, 1181, 1998.
- [16] VGH München 22A99.40009 und 22A99.40012, Genehmigung einer thermischen Abfall-Behandlungsanlage, NVwZ-RR 10, 661, 2000.
- [17] ICRP 26, International Commission on Radiological Protection, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 26, 1977.
- [18] ICRP 60, International Commission on Radiological Protection, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, 1991.
- [19] ICRP 81, International Commission on Radiological Protection, Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste, ICRP Publication 81, 1998.
- [20] NCRP 91, National Council on Radiation Protection and Measurements, Recommendations on Limits for Exposure to Ionizing Radiation, Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP Report No. 91, 1987.
- [21] NCRP 116, National Council on Radiation Protection and Measurements, Limitation of Exposure to Ionizing Radiation, Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP Report No. 116, 1993.

Anhang 3

Ergebnisse ausgewählter Sicherheitsanalysen anderer Länder

In diesem Anhang werden exemplarisch die Ergebnisse von Sicherheitsanalysen für Endlager für hochaktive und langlebige radioaktive Abfälle anderer europäischer Länder kurz dargestellt. Dabei handelt es sich um Sicherheitsanalysen der Länder Belgien, Finnland, Schweden und Schweiz. Sie wurden breit auch im internationalen Rahmen diskutiert bzw. einem Peer Review unterzogen und dienen im Allgemeinen dazu, eine Entscheidung über das weitere Vorgehen bei der Standortauswahl und Endlagerplanung zu unterstützen, obwohl sie auf einer vorläufigen Datenbasis erstellt wurden. Mit dieser Zusammenstellung soll verdeutlicht werden, wie das vom BfS vorgeschlagene Risikoziel und die Risikoschranke in Relation zu den Ergebnissen dieser Studien zu sehen sind. Es wird deutlich, dass die vom BfS vorgeschlagenen Werte auch in den Sicherheitsanalysen anderer Länder im Allgemeinen erreicht bzw. unterschritten werden.

Dabei ist zu beachten, dass in den Sicherheitsanalysen anderer Länder auf der Basis vorläufiger Daten im Allgemeinen einer Vorgehensweise, welche die vom Endlager ausgehenden Konsequenzen überschätzt, der Vorrang vor einer Vorgehensweise, welche diese Konsequenzen möglichst realitätsnah ermittelt, gegeben wird. Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass speziell bei den skandinavischen Endlagerprojekten die Behälter eine tragende Barrierefunktion haben. In der Sicherheitsphilosophie des BfS wird dagegen der geologischen Barriere die wesentlichste Barrierefunktion zugewiesen.

Die Vorstellung der Ergebnisse der einzelnen Studien erfolgt dergestalt, dass zunächst das Sicherheits- und Endlagerkonzept im Überblick vorgestellt wird. Anschließend werden die Entwicklungen, die mit hohem Gewicht in die Bewertung der Endlagersicherheit einfließen (diese werden allgemein als erwartete Entwicklungen oder Referenzszenarien bezeichnet), und alternative Entwicklungen, die ebenfalls bewertet wurden, stichpunktartig beschrieben und ihre Ergebnisse dargestellt.

Belgien [1]:

Sicherheits- und Endlagerkonzept

Zur Gewährleistung der beiden Sicherheitsziele „Schutz der menschlichen Bevölkerung durch Isolation des Abfalls“ sowie „Passive Sicherheit“ sind mit dem Sicherheitskonzept verschiedene Funktionen verknüpft. Dazu zählen der vollständige Einschluss des Abfalls für

einen gewissen Zeitraum, Rückhaltung, Umverteilung, Dispersion und Verdünnung von Nukliden nach ihrer Freisetzung sowie für den Fall menschlichen Einwirkens die Begrenzung des Zugriffs auf das Endlager. Zur Erfüllung dieser Funktionen basiert die Sicherheit auf einem Multibarrierenkonzept, mit dem die Robustheit des Endlagersystems gewährleistet werden soll.

Erwartete Entwicklung / Referenzszenarium

Für die normale Entwicklung („*normal evolution scenario*“) wird eine langsame, kontinuierliche Verminderung des Einschlussvermögens des Endlagersystems sowie der Abfallgebinde und des Versatzmaterials unterstellt. Die Beständigkeit der Verpackung wird mit mindestens 300 Jahren für verglasten Abfall und mit mindestens 2.000 Jahren für Brennelemente angesetzt. Es wird die Anwesenheit von Grundwasser berücksichtigt, da es eine wesentliche Rolle bei der Degradierung (Zersetzung) der technischen und geotechnischen Barrieren sowie bei der Migration von Radionukliden durch das Mehrbarrierensystem in die Biosphäre spielt. Innerhalb eines Zeitraums von 24.000 bis 56.000 Jahren werden Klimaveränderungen (Eiszeiten) als wahrscheinlich angesehen. Dabei wird angenommen, dass die geologische Barriere (Boom Clay) mindestens 100.000 Jahre unverändert bleibt. Der Boom Clay stellt die wichtigste Barriere dar, in welcher der Radionuklidtransport fast ausschließlich diffusiv (siehe Glossar) erfolgt. Nach dem Transport durch den Boom Clay gelangen die Nuklide in wassertragende Schichten (Aquifere), wo sie verdünnt und weiter umverteilt werden. Der Austritt in die Biosphäre erfolgt über drei verschiedene Wege: Entwässerung des Grundwassers in Oberflächengewässer, Verschmutzung der Böden durch verunreinigtes Grundwasser und die Gewinnung von Grundwasser durch Brunnen.

Berechnete Dosis

ZAGALC = hoch radioaktiver, verglaster Abfall, wärmeentwickelnd

HAGALC2 = hoch radioaktiver, verglaster Abfall

ZAGALS = abgebrannte Brennelemente

Maximale Dosis aus ZAGALC via Brunnen:	<u>0,01 $\mu\text{Sv/a}$</u>
Maximale Dosis aus ZAGALC via Entwässerung:	<u>$9 \cdot 10^{-5} \mu\text{Sv/a}$</u>
Maximale Dosis aus HAGALC2 via Brunnen:	<u>$3 \cdot 10^{-4} \mu\text{Sv/a}$</u>
Maximale Dosis aus HAGALC2 via Entwässerung:	<u>$3 \cdot 10^{-6} \mu\text{Sv/a}$</u>
Maximale Dosis aus ZAGALS (Spalt- und Aktivierungsprodukte) via Brunnen:	<u>$7 \cdot 10^{-3} \mu\text{Sv/a}$</u>
Maximale Dosis aus ZAGALS (Aktiniden) via Brunnen:	<u>$5 \cdot 10^{-6} \mu\text{Sv/a}$</u>

Alternative Szenarien

Betrachtung von weniger wahrscheinlichen Szenarien einer gestörten Entwicklung des Endlagers („*altered evolution scenario*“). Für die Betrachtung einer gestörten Entwicklung des Endlagers wurde das Endlagersystem auf drei wesentliche Komponenten reduziert, welche die Langzeitsicherheit des Endlagers ausmachen: die beiden Hauptbarrieren – (geo-)technische und geologische Barriere – sowie die hydrogeologische Komponente. Auf dieser Basis wurden acht verschiedene Zustände des Endlagers im Hinblick auf das Vorhandensein und somit die Wirkung dieser drei Komponenten simuliert. Die Zustände unterscheiden sich in der Kombinationen von Anwesenheit und Abwesenheit bzw. Versagen jeder einzelnen Komponente. Jede dieser Kombinationen wiederum ist repräsentativ für ein Szenarium einer gestörten Entwicklung, wie z. B. das Versagen der (geo-)technischen Barrieren, das Einsetzen einer Eiszeit oder das Auftreten von gas-gesteuertem Stofftransport.

Berechnete Dosis

Es werden lediglich qualitative Einschätzungen der Eintrittswahrscheinlichkeiten vorgenommen, daher erfolgt keine Dosisberechnung.

Finnland [2]:

Sicherheits- und Endlagerkonzept

Das Endlager für abgebrannten Kernbrennstoff besteht aus einem System von mehreren passiven Barrieren:

- einem Kupfer-Stahl-Behälter, der über sehr lange Zeit (ungefähr eine Million Jahre) intakt bleibt und die vollständige Rückhaltung der Radionuklide gewährt.
- stabilen Abfallformen (Brennstoffmatrix, Verkleidung und tragendes Material der Abfallgebinde), welche die Freisetzung eingebetteter Radionuklide nach einem möglichen Behälterversagen begrenzen.
- einem Puffer aus hoch kompaktiertem Bentonit, der die Behälter mechanisch schützt, garantiert, dass die mobilisierten Radionuklide nur auf dem diffusiven Wege freigesetzt werden, als Kolloidfilter (Filter von feinen Stoffen) fungiert und die Radionuklide während des Transports retardiert (verzögert) und dispergiert (fein verteilt).
- dem kristallinen Grundgebirge, das die menschliche Umgebung von den abgebrannten Brennstoffen isoliert und diese vor den Vorgängen an der Oberfläche und im

oberflächennahen Bereich schützt, günstige Bedingungen für die technischen Barrieren bewahrt, den Grundwasserfluss begrenzt sowie potentielle Freisetzungen aus dem Endlager retardiert, dispergiert und verdünnt.

Erwartete Entwicklung / Referenzszenarium

Die Entwicklung des Endlagers wird für verschiedene Zeitspannen betrachtet: 0 – 100 Jahre, 100 – 10.000 Jahre, 10.000 – 100.000 Jahre, 100.000 – 1 Million Jahre sowie über 1 Million Jahre hinaus.

Im Basisfall bleiben die heutigen Bedingungen, wie sie im Bereich des potentiellen Endlagers in 500 m Tiefe bestehen, erhalten. Keiner der Abfallbehälter weist einen anfänglichen Defekt auf. Die Behälter korrodieren sehr langsam, was aber bis zu einem Zeitraum von 1 Million Jahre nicht zu einem Versagen der Behälter führt. Daher wird für diesen Basisfall keine Freisetzung von Radionukliden angenommen.

Berechnete Dosis

Basisfall: kein Nuklidtransport → keine Dosisberechnung

Alternative Szenarien

In einer Reihe von alternativen Szenarien werden die Konsequenzen eines einzelnen zu Beginn defekten Abfallbehälters betrachtet. Dabei werden grundsätzlich drei Behälterdefekt-Szenarien unterschieden:

Szenarium SH: kleiner anfänglicher Defekt von 5 mm² Größe („small hole“, „pinpoint“)

Szenarium LH: anfänglicher Defekt von 1 cm² Größe („large hole“, „fingertip“)

Szenarium DC: kein Einschluss mehr nach 10.000 Jahren („disappearing canister“)

Die Berechnungen wurden für die vier Standorte Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto und Romuvaara auf der Basis standortspezifischer und zeitabhängiger Grundwasserströmungsverhältnisse durchgeführt. Für Hästholmen und Olkiluoto wurden zudem zwei parallele Analysen für unterschiedliche Annahmen zur Grundwassersalinität (Salz-Brackwasser „sal“ bzw. Süßwasser „ns“) mit Medianwerten der zugrunde liegenden Daten („50“) berechnet (insgesamt sechs Szenarien). Die Berechnungen decken einen Zeitraum von 1 Million Jahre ab, der Dosisgrenzwert von 100 µSv/a gilt lediglich für den Zeitraum bis 10.000 Jahre.

Weiterhin werden Sensitivitäts- und „What if?“-Analysen durchgeführt.

Berechnete Dosis

Maximale Dosis für alle vier Standorte bzw. sechs Alternativ-Szenarien:

SH-ns50 – Szenarium („small hole, non-saline groundwater“):	<u>1,3 10⁻³ µSv/a</u>
SH-sal50 – Szenarium („small hole, saline groundwater“):	<u>1,7 10⁻³ µSv/a</u>
LH-ns50 – Szenarium („large hole, non-saline groundwater“):	<u>2,3 10⁻³ µSv/a</u>
LH-sal50 – Szenarium („large hole, saline groundwater“):	<u>3,9 10⁻³ µSv/a</u>
DC-ns50 – Szenarium („disappearing canister, non-saline groundwater“):	<u>0,032 µSv/a</u>
DC-sal50 – Szenarium („disappearing canister, saline groundwater“):	<u>0,044 µSv/a</u>

Sensitivitätsanalysen für variable Zeitpunkte des Behälterversagens im DC-Szenarium:

DC0 (Versagen sofort nach Verschließen des Endlagers), DC3 (Versagen nach 1.000 Jahren), DC-Referenzszenarium (Versagen nach 10.000 Jahren), DC5 (Versagen nach 10⁵ Jahren), DC6 (Versagen nach 1.000.000 Jahren):

DC-ns50 – Szenarium („disappearing canister, non-saline groundwater“):	<u>0,027 – 0,056 µSv/a</u>
DC-sal50 – Szenarium („disappearing canister, saline groundwater“):	<u>0,039 – 0,069 µSv/a</u>
DC-vhflows – Szenarium („disappearing canister, very high flow, non-saline groundwater“):	<u>0,48 – 0,56 µSv/a</u>
DC-vhflowsal – Szenarium („disappearing canister, very high flow, saline groundwater“):	<u>2,7 – 110 µSv/a</u>

Sensitivitätsanalysen mit verschiedenen Quellterm-Annahmen:

SH-Szenarien („small hole“):	<u>1,3 10⁻³ - 9,4 10⁻³ µSv/a</u>
DC-Szenarien („disappearing canister“):	<u>0,018 - 7,1 µSv/a</u>

„What if“-Analysen:

vhffsc – Szenarium („very high non-saline flow and saline chemistry“):	<u>16 - 35 µSv/a</u>
noben – Szenarium („very poor bentonite“):	<u>2,5 10⁻³ - 12 µSv/a</u>
gasex – Szenarium („gas expels radionuclides out of the canister“):	<u>0,2- 10 µSv/a</u>
gmw – Szenarium („glacial meltwater“):	<u>4,4 10⁻³ - 0,49 µSv/a</u>
pgf – Szenarium („postglacial faulting“):	<u>0,016 - 30 µSv/a</u>

Schweden [3, 4]:

Sicherheits- und Endlagerkonzept

Das Endlager vom Typ KBS-3 ist primär so ausgelegt, dass die abgebrannten Brennelemente isoliert werden. Als zweites Ziel soll die Rückhaltung jeglicher freigesetzter Radionuklide gewährleistet sein. Diese Sicherheit wird durch folgende Maßnahmen erzielt:

- 5 m lange, korrosionsresistente Kupferkanister mit Einsatz aus Gusseisen für die mechanische Festigkeit
- Die Kanister sind von kompaktiertem (verdichtetem) Bentonit umgeben, der ihnen im Fall geringer Felsverschiebungen mechanischen Schutz bietet und das Grundwasser und korrosive Substanzen von ihnen fernhält. Ferner adsorbiert der Bentonit viele Radionuklide, die freigesetzt werden könnten, wenn der Kanister beschädigt wird oder korrodiert.
- Einlagerung in ca. 500 m Tiefe mit über lange Zeiträume hinweg stabilen mechanischen und chemischen Bedingungen
- Sollte ein Kanister beschädigt werden oder korrodieren, werden die chemischen Eigenschaften der Brennstoffe und der radioaktiven Stoffe – z. B. ihre geringe Wasserlöslichkeit – den Transport der Radionuklide vom Endlager zur Biosphäre stark begrenzen. Dies trifft vor allem für die Elemente mit der höchsten langfristigen Radiotoxizität, wie z.B. Americium und Plutonium, zu.

Das Endlager besteht aus einer Reihe von Barrieren, die sich gegenseitig unterstützen und ergänzen, mit dem wichtigen Vorbehalt, dass die Sicherheit des Endlagers auch dann noch gewährleistet sein muss, wenn eine der Barrieren versagt bzw. die vorgesehene Wirksamkeit nicht erfüllt. Ein weiteres Prinzip besteht darin, dass im Endlager möglichst viele "natürliche" Materialien, wie Bentonit und Kupfer, zum Einsatz kommen. Die Wahl derartiger Materialien macht es möglich, ihre Stabilität und ihr Verhalten in einem Endlagerumfeld über lange Zeiträume durch Vergleich mit ihren natürlichen Vorkommen abzuleiten. Dem gleichen Prinzip getreu soll das Endlager so geplant werden, dass es die In-situ-Bedingungen (natürlich vorgefundene Bedingung) im Gebirgskörper möglichst wenig beeinträchtigt. Dies betrifft ganz besonders die chemischen Auswirkungen des Endlagers.

Erwartete Entwicklung / Referenzszenarium

Das Referenzszenarium in der **SR 97-Studie** geht von einer erwarteten Entwicklung des Endlagers aus, in der die zum heutigen Zeitpunkt gegebenen Bedingungen bestehen bleiben (inkl. tektonisch bedingter Hebung), die Abfallbehälter entsprechend ihrer erwarteten Lebensdauer funktionieren und keinen anfänglichen Defekt aufweisen, das heutige Klima in der Zukunft weiter besteht und keine Erdbeben oder menschliche Einwirkungen auftreten. Im Referenzszenarium wird also vorausgesetzt, dass die komplette Isolation des radioaktiven Abfalls durch die intakten Kupferkanister über den gesamten Untersuchungszeitraum (1 Million Jahre) gewährleistet ist, d. h. es sind keine Radionuklidtransportberechnungen erforderlich. Das Szenarium endet mit einer Beurteilung der Endlagersicherheit, wobei der Schwerpunkt in der Beurteilung der primären Sicherheitsfunktion des Endlagers, also der Isolation des eingelagerten Abfalls, liegt. Dies wird anhand der Integrität der Kupferummantelung der Abfallbehälter demonstriert.

Berechnete Dosis

entfällt entsprechend Annahme im Szenarium → kein Radionuklidtransport !

Alternative Szenarien

Die alternativen Szenarien basieren auf den Annahmen des Referenzszenariums, werden dabei jedoch durch die entsprechenden Annahmen der jeweiligen Alternativszenarien ergänzt:

- Defekte an den Abfallbehältern: Annahme, dass ein paar wenige (1 bzw. 5) der insgesamt 4.000 Kupferbehälter trotz der strengen Qualitätskontrollen versagen und mit einer durchdringenden Öffnung von 1 mm² die Radionuklidfreisetzung bestimmen
- Veränderungen des Klimas: Berücksichtigung der beiden Annahmen, dass alle Behälter intakt sind bzw. dass einige Behälter zu Beginn bereits Defekte aufweisen
- Auswirkungen von tektonischen Aktivitäten und Erdbeben
- menschliches Einwirken

Berechnete Dosis

Die **SR 97-Studie** berücksichtigt drei verschiedene Modellstandorte (Aberg, Beberg, Ceberg), für die jeweils Radionuklidtransportrechnungen durchgeführt und Dosiswerte ermittelt wurden. Dabei wurden zum Teil variierende Datensätze verwendet und damit

verschiedene Fälle berechnet, die sich unter anderem in ihrer Zuordnung als angemessen (*reasonable*) bzw. pessimistisch (*pessimistic*) unterscheiden.

Defekte an den Abfallbehältern, maximale Dosis:

Aberg (<i>reasonable case</i>):	<u>$2 \cdot 10^{-5} - 0,09 \mu\text{Sv/a}$</u>
Beberg (<i>reasonable case</i>):	<u>$0,03 - 0,08 \mu\text{Sv/a}$</u>
Ceberg (<i>reasonable case</i>):	<u>$0,02 - 0,05 \mu\text{Sv/a}$</u>
Aberg (<i>pessimistic case</i>):	<u>$0,07 - 6 \mu\text{Sv/a}$</u>
Beberg (<i>pessimistic case</i>):	<u>$0,03 - 1 \mu\text{Sv/a}$</u>
Ceberg (<i>pessimistic case</i>):	<u>$0,02 - 0,2 \mu\text{Sv/a}$</u>

Spezialfälle berechnet für das Szenarium der defekten Behälter für Aberg (*pessimistic case*), maximale Dosis:

bei schnellerer Auflösung des Abfalls:	<u>$2 \mu\text{Sv/a}$</u>
ohne Löslichkeitsbegrenzungen:	<u>$3 - 600 \mu\text{Sv/a}$</u>
größere anfängliche Behälterdefekte:	<u>$0,4 \mu\text{Sv/a}$</u>
keine Rückhaltung durch Diffusion im Bentonit-Puffer:	<u>$0,4 \mu\text{Sv/a}$</u>
keine Retention (Zurückhaltung) im Wirtsgestein:	<u>$6 \mu\text{Sv/a}$</u>
Abschmelzen der Eisbedeckung:	<u>$2 \cdot 10^{-6} \mu\text{Sv/a}$</u>

Schweiz [5, 6]:

Sicherheits- und Endlagerkonzept

Das Sicherheitskonzept beruht auf dem Verständnis der wesentlichen und die Sicherheit beeinflussenden Prozesse und Merkmale. Es wurde mit dem Ziel entwickelt, die angestrebten Sicherheitsfunktionen zu erfüllen. Dazu zählen die Isolation des Abfalls von der menschlichen Umwelt, der Langzeiteinschluss und radioaktive Zerfall des Abfalls innerhalb des Endlagersystems sowie die Verminderung von potentiell freigesetzten Radionukliden in der Umwelt. Zur Gewährleistung dieser Sicherheitsfunktionen wurden ein entsprechendes Endlagerdesign sowie Anforderungen an das Barrierensystem entwickelt. Das Endlagerkonzept sieht die gemeinsame Einlagerung von langlebigen schwach- und mittel-radioaktivem Abfall (LMA) sowie von hoch-radioaktivem Abfall (HLW) und Brennelementen (SF) in getrennten Bereichen vor (LMA-Lager und Hauptlager). Zu den wichtigsten Sicherheitsfaktoren (*Pillars of Safety*), die zur Gewährleistung ihrer Funktionen bestimmte Merkmale aufweisen müssen, zählen die Lage des Endlagers im tiefen geologischen

Untergrund, das Wirtsgestein, das chemische Milieu, der Bentonit-Puffer im Hauptlager sowie die Abfallbehälter für SF und HLW bzw. die Abfallprodukte selbst.

Erwartete Entwicklung / Referenzszenarium

Im Referenzszenarium wird angenommen, dass sich die wichtigen Sicherheitsfaktoren wie erwartet verhalten. Dies beinhaltet, dass die Lage des Endlagers im tiefen geologischen Untergrund über mehrere Millionen Jahre beibehalten wird und so der Abfall von der Umwelt an der Oberfläche isoliert wird. Ebenso behält das Wirtsgestein über diesen Zeitraum seine sicherheitsrelevanten Eigenschaften, die auch durch das Vorhandensein des Endlagers nicht beeinflusst werden. Das günstige chemische Milieu sowie die günstigen Bentoniteigenschaften bleiben ebenfalls über mehrere Millionen Jahre bestehen. Weiterhin bieten die Behälter eine Phase vollständigen Einschlusses bis ggf. einer oder mehrere Behälter versagen und danach halten die Abfallprodukte (SF und HLW) die meisten Radionuklide. Nach einer Freisetzung der Radionuklide bewegen diese sich in Lösung diffusiv durch den Opalinuston (Gesteinsart), gelangen ggf. weiter in überlagernde Grundwasser führende geologische Einheiten, wo sie verdünnt werden, und werden anschließend in die Biosphäre freigesetzt.

Berechnete Dosis

Referenzkonzept:

Maximale Dosis für SF + HLW + LMA: 0,05 μ Sv/a

Alternativkonzepte:

Maximale Dosis für SF + HLW + LMA: 4 10^{-3} – 0,08 μ Sv/a

Alternative Szenarien

Als Alternativen zur erwarteten langsamen und diffusionsgesteuerten Ausbreitung der Radionuklide wird die Verbreitung in der Gasphase sowie die Freisetzung aufgrund menschlichen Einwirkens betrachtet.

Neben den alternativen Szenarien wurden für eine pessimistische Betrachtung „What if?“-Fälle berücksichtigt. Diese im Gegensatz zu den Referenz- und Alternativszenarien aus wissenschaftlicher Sicht nicht zu erwartenden Fälle dienen dazu, die Robustheit des Endlagersystems zu untersuchen und die wesentlichen sicherheitsrelevanten Aspekte einem Belastbarkeitstest zu unterziehen. Annahmen im Rahmen der „What if?“-Fälle beinhalten u. a. eine hohe Grundwasserströmungsrate in der Geosphäre, Radionuklidtransport entlang durchlässigerer Klüfte, erhöhte Löslichkeit der Abfallmatrix der Brennelemente, das Vorhandensein einer Redoxfront (Übergangsschicht von reduzierenden zu oxidierenden

chemischen Verhältnissen) sowie einer verringerten Transportdistanz im Opalinuston (Gesteinsart).

Berechnete Dosis

Ausbreitung der Radionuklide in der Gasphase:	<u>$7 \cdot 10^{-4} - 0,04 \mu\text{Sv/a}$</u>
Menschliches Einwirken:	<u>0,05 - 10 $\mu\text{Sv/a}$</u>
„What if?“-Fälle:	<u>0,02 - 10 $\mu\text{Sv/a}$</u>
Design und Systemoptionen sowie Unsicherheiten bezgl. Biosphäre:	<u>$5 \cdot 10^{-3} - 0,6 \mu\text{Sv/a}$</u>

Literatur:

- [1] ONDRAF/NIRAS: SAFIR 2. Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2.- Belgian Agency for Radioactive Waste and Enriched Fissile Materials, NIRON 2001-06 E; Brüssel, Belgien, 2001.
- [2] Vieno, T., Nordmann, H.: Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara. TILA-99.- Posiva Oy, POSIVA-99-07; Helsinki, Finnland, 1999
- [3] SKB: Deep repository for spent nuclear fuel: SR 97 - Post-closure safety.- Svensk Kärnbränslehantering, SKB TR-99-06 (2 Bde.); Stockholm, Schweden, 1999.
- [4] Lindgren, M., Lindström, F.: SR 97: Radionuclide transport calculations.- Svensk Kärnbränslehantering, SKB TR-99-23; Stockholm, Schweden, 1999.
- [5] NAGRA: Projekt Opalinuston. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle sowie langlebige mittelaktive Abfälle. 2. Ergänzende Auflage. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wetingen, Schweiz, 2003.
- [6] NAGRA: Project Opalinuston. Safety Report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis).- Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, NAGRA Technischer Bericht NTB 02-05; Wetingen, Schweiz, 2002.

Anhang 4

Gestaltung des Diskurses zur Sicherheitsphilosophie des BfS

Mit der Diskussion zu der Sicherheitsphilosophie für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle verfolgt das BfS drei Ziele.

1. Die Rolle des BfS soll verdeutlicht werden. Das BfS muss die Sicherheit der Endlagerung insbesondere als obere Strahlenschutzbehörde wie auch in seiner Zuständigkeiten für die Errichtung und den Betrieb von Endlagern für radioaktive Abfälle bewerten.
2. Der Stand von Wissenschaft und Technik zur Sicherheit der Endlagerung und zum Schutz von Mensch und Umwelt soll vermittelt werden (speziell Strahlenschutz).
3. Fachöffentlichkeit und interessierten Bürgerinnen und Bürgern sollen in die Arbeiten des BfS zur Erarbeitung einer Sicherheitsphilosophie für die Endlagerung einbezogen werden. Die Erarbeitung der Inhalte und die Hintergründe für die Anforderungen an die Sicherheit der Endlagerung sollen nachvollziehbar und transparent werden.

In folgenden Schritte wurde der Diskurs bisher gestaltet und soll weitergeführt werden:

- Präsentation des ersten Entwurfs zur Sicherheitsphilosophie vor Fachleuten aus dem Bereich der Endlagerung und des Strahlenschutzes
- Gespräche mit Fachleuten aus dem Bereich der Risikobewertung und des Strahlenschutzes
- Präsentation eines zweiten Entwurfs im Internet und Diskussion mit interessierten Bürgern und Bürgerinnen sowie mit der Fachöffentlichkeit
- Durchführung eines öffentlichen Workshops mit Fachleuten aus verschiedenen Bereichen (Endlagerung, Strahlenschutz, Recht, Risikobewertung, Verbraucherschutz, Umweltschutz) um den Diskurs abzuschließen
- Erstellung und Veröffentlichung der abschließenden Fassung der Sicherheitsphilosophie des BfS für die Endlagerung

Anschließend wird der Bericht

- dem Bundesumweltministerium als Ausgangspunkt für weitergehende Regelungen gesetzlicher und untergesetzlicher Art übergeben und
- und vorgeschlagen, die entsprechenden Beratungsgremien des Bundesumweltministeriums (Reaktorsicherheitskommission und Strahlenschutzkommission) und den Länderausschuss für Atomkernenergie einzubeziehen.

Diskussionskapitel

GLOSSAR

Bestmögliche Lösung

Die langfristige, möglichst vollständige Isolation der radioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Formationen wird aus Strahlenschutzgründen als beste Option zur Entsorgung der Abfälle angesehen. Unter dem Vorrang von Sicherheitsaspekten ist aus gesellschaftlich akzeptablen, technisch machbaren und bezahlbaren Endlageralternativen unter Beteiligung der Bevölkerung die (relativ) beste auszuwählen. In den Auswahlprozess dürfen nur Alternativen einbezogen werden, die aus unserer heutigen Sicht der Idealvorstellung nach vollständiger Isolation der Abfälle von der Umwelt nahe kommen können. In diesem Sinne ist die dann gefundene Lösung als bestmögliche zu bezeichnen.

Defence-in-depth: gestaffelte Abwehrmaßnahmen

Unter dieser Bezeichnung wird im kerntechnischen Bereich eine hierarchische Staffelung von Abwehrmaßnahmen zum Schutz der Umgebung (Arbeiter, Bevölkerung, Umwelt) vor schädlichen Auswirkungen einer Strahlenquelle unter Betriebsbedingungen und für Ausnahmesituationen verstanden. Die Abwehrmaßnahmen beinhalten physische Barrieren, technische Systeme und Prozesse zum Schutz der Barrieren sowie organisatorische Maßnahmen.

Die Unabhängigkeit der Maßnahmen auf den verschiedenen Abweherebenen ist zentrales Element des Konzeptes. Mit der Staffelung der Maßnahmen (technische und organisatorische) und einer hohen Zuverlässigkeit ihrer Wirksamkeit sollen folgende Ziele und damit der praktische Ausschluss von Schadensfällen bzw. eine Minimierung von Risiken erreicht werden:

- **Vermeidung von Betriebsstörungen;** Bei der Anlagenauslegung wird menschliches Fehlverhalten und Versagen von Anlagenteilen berücksichtigt und kann ausgeglichen werden. Die Anlage soll so ausgelegt sein, dass gestörte (anomale) Betriebszustände hinreichend zuverlässig vermieden werden.
- **Verhinderung von Auslegungsstörfällen;** Schäden an der Anlage, die die Wirksamkeit von Sicherheitsmaßnahmen beeinträchtigen können, werden vermieden. Selbst wenn gestörte Betriebszustände eintreten, darf dies mit hoher Zuverlässigkeit nicht zu Auslegungs-Störfällen führen.
- **Beherrschung von Auslegungsstörfällen;** Die Bevölkerung und Umwelt sind geschützt, selbst dann, wenn nicht alle Barrieren ihre volle Wirksamkeit entfalten. Dies gilt für die der Auslegung zu berücksichtigenden Störfälle. Diese werden Auslegungsstörfälle genannt.
- **Minimierung von Schäden bei auslegungsüberschreitenden Störfällen;** Für Störfälle mit erheblichen Auswirkungen, gegen die die Anlage auf Grund ihrer geringen

Eintrittswahrscheinlichkeit nicht ausgelegt ist, sind Maßnahmen zur Minimierung von Schäden an Bevölkerung und Umwelt vorgesehen.

Sicherheit wird dadurch erreicht, dass auch beim Ausfall der Maßnahmen auf einer Abwehrebene weitere ebenso wirksame Maßnahmen auf einer tieferen Ebene eingreifen. Auf jeder Abwehrebene muss für sich genommen die jeweils erforderliche Sicherheit gewährleistet sein. Dieses allgemein für kerntechnische Anlagen gültige Sicherheitskonzept gilt auch für den Betrieb des offenen Endlagers.

Bei einem verschlossenen Endlager wird das Mehrbarrieren-Konzept realisiert. Es besteht aus einer Staffelung physikalischer Barrieren (Abfallprodukt, Behälter, geotechnische Barriere, geologische Barriere). Die Barrieren wirken in solcher Weise zusammen, dass es selbst bei Versagen bzw. Teilversagen einer Einzelbarriere allenfalls zu Schadstofffreisetzungen aus dem Endlager kommt, die Mensch und Umwelt einem tolerierbaren Risiko aussetzen.

de minimis Ansatz

De minimis ist dem juristischen Sprachgebrauch entlehnt und heißt vollständig in lateinischer Sprache „de minimis non curat lex“ bzw. „de minimis non curat praetor“. Es bedeutet, dass sich das Gesetz bzw. der Ankläger nicht um triviale Angelegenheiten kümmert. In der Risikobewertung wird damit ein Risiko bezeichnet, das als so niedrig erscheint, dass es in weiteren Bewertungen nicht berücksichtigt wird.

Diffusion

Mit diffusivem Transport von Schadstoffen wird die Ausbreitung von Substanzen in einem Medium (z. B. Grundwasser) auf Grund zufälliger und ungerichteter Molekularbewegungen bezeichnet. Diese sind abhängig vom Konzentrationsgefälle, von der Temperatur und der freien Weglänge (Bewegungsspielraum) in dem Medium.

Dosis-Wirkungs-Beziehung

Eine Dosis-Wirkungs-Beziehung beschreibt das Ausmaß einer beobachteten Wirkung, z.B. die Schädigung eines Organs in Abhängigkeit von der zugeführten Substanzmenge bzw. der Strahlenexposition (Dosis). Für viele chemotoxische Substanzen kann ein Schwellenwert angegeben werden, der dadurch definiert ist, dass eine Dosis unterhalb dieses Schwellenwertes mit hinreichender Wahrscheinlichkeit keine Wirkung zeigt und daher als unbedenklich eingestuft wird. Auch für *deterministische Strahlenwirkungen* können derartige Schwellenwerte bestimmt werden. Die so bestimmten Schwellenwerte werden nur bei relativ hohen Strahlenbelastungen erreicht bzw. überschritten, z.B. bei Strahlenunfällen oder als Nebenwirkung in der Strahlentherapie. Bei genotoxischen Substanzen sowie bei ionisierender Strahlung, die Krebserkrankungen und genetische Mutationen auslösen können, kann dagegen bereits ein einziger molekulare Veränderung der Erbsubstanz (Mutation) ausreichend sein, die Erkrankung auszulösen. Wegen diese Wirkmechanismus

kann für genotoxische Noxen kein Schwellenwert bestimmt werden. Da die Art der Schädigung meist unspezifisch für eine bestimmte Noxe ist, kann insbesondere im Bereich niedriger Dosen nur durch epidemiologische Untersuchung einer großen Zahl von exponierten Personen der Zusammenhang zwischen Exposition und Erkrankung nachgewiesen werden (*stochastische Strahlenwirkung*). Im Bereich sehr niedriger Dosen und Dosisraten, in dem die statistischen Auswertungen nicht mehr zu signifikanten Resultaten führen, wird die Dosis-Wirkungs-Beziehung für genotoxische Noxen in der Regel linear zum Nullpunkt extrapoliert.

Eindringen, unbeabsichtigtes menschliches

Als unbeabsichtigtes menschliches Eindringen werden alle Ereignisse bezeichnet, bei denen Menschen in der Zukunft, nachdem die Kenntnis über die Existenz des Endlagers verloren gegangen ist, die technischen und/oder geologischen Barrieren ohne Absicht beeinträchtigen. Für die Beurteilung der (→) Risiken als Folge des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens werden Tätigkeiten unter Verwendung des heutigen Standes der Technik, z. B. Explorationsbohrungen in oder durch das Endlager oder Bergbau in unmittelbarer Nähe des Endlagers betrachtet.

Das beabsichtigte Eindringen in ein Endlager ist vom unbeabsichtigten Eindringen zu unterscheiden. Nach international übereinstimmender Meinung unterliegt die Verantwortung für die Folgen eines beabsichtigten Eindringens der jeweils handelnden Gesellschaft. Für die Beurteilung der Langzeitsicherheit eines Endlagers sind die Auswirkungen eines beabsichtigten Eindringens deshalb nicht zu betrachten (ICRP 81).

Einschlusswirksamer Gebirgsbereich

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich ist der Teil der geologischen Barrieren, der bei zu erwartender Entwicklung des (→) Endlagersystems – in Zusammenwirken mit technischen und geotechnischen Barrieren – den Einschluss der Abfälle während des Isolationszeitraums sicherstellen muss.

Endlagersystem

Das Endlagersystem besteht aus dem Endlagerbergwerk mit seinen Komponenten wie Strecken, Kammern und den darin eingelagerten Abfallgebänden, Versatz und Dichtelementen sowie der das Bergwerk aufnehmenden geologischen Schichten und der überlagernden Schichten bis zur Erdoberfläche.

Entwicklungen, außergewöhnliche

Außergewöhnliche Entwicklungen sind jene Entwicklungen, die erkennbar weniger wahrscheinlich sind und bei denen der vollständige Einschluss im einschlusswirksamen

Gebirgsbereich nicht über den gesamten Nachweiszeitraum und für alle Schadstoffe sichergestellt werden kann. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten für außergewöhnliche Entwicklungen dürfen in der Summe und für den gesamten Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre 0,1 nicht übersteigen.

Entwicklungen, spezielle

Als spezielle Entwicklungen werden jene Entwicklungen bezeichnet, deren konventionelle Auswirkungen alle denkbaren radiologischen Auswirkungen übersteigen, wie z.B. ein Meteoriteneinschlag, sowie das (→) unbeabsichtigte menschliche Eindringen. Durch spezielle Entwicklungen, verursachte Risiken sind nicht bewertbar und müssen grundsätzlich hingenommen werden.

Entwicklungen, zu erwartende

Zu erwartende Entwicklungen sind jene Entwicklungen, die vorhersehbar wahrscheinlich sind, d.h. deren Eintrittswahrscheinlichkeit hoch ist.

Erosion

Abtragung der Erdkruste durch die auf sie wirkenden äußeren Einflüsse wie z.B. Wasser, Wind, Gletscher

Extrapolationsbereich

Aussagen über den Beobachtungsbereich hinaus, für den Daten aufgrund epidemiologischer oder experimenteller Untersuchungen vorliegen, hin zum niedrigeren Expositionsbereich bis zum Nullpunkt, unter zur Hilfenahme plausibler mathematischer oder biomathematischer Modelle von Expositions-Wirkungs-Beziehungen.

Features, Events, Processes (FEP)

Features, Events, Processes (FEP) sind die englischen Ausdrücke für Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse und bezeichnen die Merkmale, welche die Entwicklung eines Endlagers bestimmen und beschreiben.

Ein *feature* ist eine sicherheitsrelevante Eigenschaft bzw. ein Sachverhalt, die bzw. der für die Integrität von Barrieren oder die Freisetzung bzw. den Transport von Schadstoffen aus dem Endlager von Bedeutung ist (z. B. Wasser führende Kluft).

Ein *event* ist ein natürliches oder ein von Menschen ausgelöstes Ereignis, das über eine kurze Periode des Beurteilungszeitraums auftritt und damit den weiteren Ablauf der Entwicklung des Endlagersystems beeinflusst, also ein Kurzzeit-Ereignis (z. B. Erdbeben).

Ein *process* ist ein natürliches oder ein von Menschen ausgelöster Vorgang, der über eine signifikante Periode des Beurteilungszeitraums auftritt und damit den Ablauf der Entwicklung mit beschreibt, also ein Langzeit-Vorgang (z.B. Erosion).

Inzidenz

Inzidenz beschreibt die Zahl der Neuerkrankungen an einer bestimmten Krankheit (z. B. Tumoren), die in einem festgelegten Zeitraum (z. B. 1 Jahr) in einer definierten Population auftreten. Inzidenz wird oft als Synonym für die Inzidenzrate benutzt. Die Inzidenzrate ist der Quotient aus der Zahl der Neuerkrankungen und der Größe der beobachteten Population. Meist wird dabei die Zahl der Neuerkrankungen bezogen auf eine festgelegte Zahl von Personen (z.B. 100.000).

Kluft

Gesteine meist ebenflächig durchtrennende Risse. Klüfte entstehen durch von tektonischen oder von physikalischen Zustandänderungen (Pressung, Temperaturänderungen, Umkristallisation usw.) bewirkten Spannungen im Gestein. Klüfte können ganz oder teilweise mit anderen Gesteinen oder Mineralen gefüllt sein.

Kluftzone

(Kluftschar) System von weitgehend parallel verlaufenden benachbarten Klüften, deren Entstehung auf den gleichen Prozess zurückgeführt werden kann.

Konvergenz

Natürlicher Prozess der Volumenreduzierung von untertägigen Hohlräumen infolge Verformung bzw. Auflockerung aufgrund des Gebirgsdrucks.

Kritikalität

Die Kritikalität ist ein Zustand der andauernden Kettenreaktion in einem Kernspaltungsprozess. In einem Endlager wird durch Anforderungen an die Beladung der Behälter mit abgebrannten Kernbrennstoffen und hochradioaktiven Abfällen und durch die Anordnung der Behälter im Endlager sichergestellt, dass keine Kritikalität und damit auch keine Kettenreaktion eintritt.

Medianwert

Der Medianwert kann für Größen angegeben werden, die mit gewissen Wahrscheinlichkeiten unterschiedliche Werte annehmen, wie z.B. die Niederschlagsmenge beim Brandenburger Tor in der letzten Woche des Jahres 2100. Der Medianwert einer Größe ist jener Wert, der von der Größe mit der Wahrscheinlichkeit von 50 % überschritten und damit auch mit der Wahrscheinlichkeit von 50 % unterschritten wird. Der Medianwert ist das (→) 50. Perzentil.

median-orientiert

Ein Vorgehen wird als median-orientiert bezeichnet, wenn es sich am (→) Medianwert von wahrscheinlichkeitsverteilten Größen orientiert, im Gegensatz zu einer Orientierung am Maximalwert oder am (→) 90. Perzentil. Beispielsweise ist die Planung des deutschen Haushalts aufgrund einer median-orientierten Ermittlung der künftigen Steuereinnahmen vertretbar. Eine median-orientierte Planung der Niederschlagsentwässerung des Platzes vor dem Brandenburger Tor wäre falsch, da sie zu einer Überschwemmung bei 50 % der Niederschlagsereignisse führen würde.

Mortalität

Mortalität beschreibt die Zahl der Personen, die an einer bestimmten Krankheit (z. B. Tumoren), in einem festgelegten Zeitraum (z. B. 1 Jahr) und in einer definierten Population verstorben sind. Mortalität wird oft als Synonym für die Mortalitätsrate benutzt. Die Mortalitätsrate ist der Quotient aus der Zahl der Verstorbenen und der Größe der beobachteten Population. Meist wird dabei die Zahl der Verstorbenen bezogen auf eine festgelegte Zahl von Personen (z. B. 100.000).

Noxe

Noxe ist ein Überbegriff für alle Dinge (hier: Schadstoffe), die im Organismus Schaden anrichten können und Krankheiten auslösen; von lat. noxa: Schaden

Perzentil, Perzentilwert

Das Perzentil bzw. der Perzentilwert einer wahrscheinlichkeitsverteilten Größe ist jener Wert, der mit der angegebenen Wahrscheinlichkeit unterschritten wird. Das 90. Perzentil der Niederschlagsmenge beim Brandenburger Tor in der letzten Woche des Jahres 2100, als Beispiel, ist jene Niederschlagsmenge, die mit der Wahrscheinlichkeit von 90 % unter- und damit mit der Wahrscheinlichkeit von 10 % überschritten wird. Das 50. Perzentil wird auch (→) Medianwert genannt.

probabilistische Verfahren

Probabilistische Rechenverfahren berücksichtigen die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Verteilung von Parametern in den Rechenmodellen.

Rezent

Als rezente geologische Ereignissen werden solche bezeichnet, die in jüngster geologischer Vergangenheit abgelaufen sind bzw. noch ablaufen.

Risiko

Mit Risiko wird i.A. die Kombination, meistens das Produkt, von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß einer Entwicklung oder eines Ereignisses bezeichnet. Im Zusammenhang mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle wird der Begriff Risiko üblicherweise – und auch hier – als Kurzform für das (→) Individualrisiko verwendet.

Risiko, unerhebliches

Als unerheblich wird ein Risiko nach den vorliegenden Grundsätzen bezeichnet, wenn es geringer als das (→) Risikoziel ist und deshalb für Entscheidungen zwischen Alternativen und für die Optimierung der Endlagerplanung nicht mehr vorrangig zu berücksichtigen ist

Risiko, tolerierbares

Als tolerierbar wird ein Risiko nach den vorliegenden Grundsätzen bezeichnet, wenn es geringer als die (→) Risikoschranke und das Minimierungsgebot des Strahlenschutzes beachtet wurde. Das von einem Endlager ausgehende Risiko muss bei allen möglichen Entwicklungen – außer eventuell bei (→) speziellen Entwicklungen – nach dieser Definition tolerierbar sein.

Risiko, Gesamt-

Das Gesamtrisiko bezeichnet das über mehrere oder alle möglichen Entwicklungen oder über alle eingelagerten Schadstoffe kumulierte (→) Risiko.

Risiko, Individual-

Im Zusammenhang mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle bezeichnet das Individualrisiko die Wahrscheinlichkeit, dass die betrachtete Person als Folge des Endlagers während ihres Lebens einen schwerwiegenden Gesundheitsschaden erleidet. Das Individualrisiko kann sich auf ein einzelnes (→) Szenarium oder kumuliert auf alle möglichen Entwicklungen des Endlagersystems beziehen. Bezieht sich das Individualrisiko auf ein Szenarium, ist es das Produkt aus zwei Wahrscheinlichkeiten: (1) der Eintrittswahrscheinlichkeit des Szenariums und (2) der Wahrscheinlichkeit eines Gesundheitsschadens bei Eintreten des Szenariums (→ Strahlenrisiko). Das kumulierte Individualrisiko für alle möglichen Entwicklungen ist die Summe der Individualrisiken aller Szenarien.

Risiko, Strahlen-

Mit dem Begriff Strahlenrisiko wird die Wahrscheinlichkeit bezeichnet, dass eine betrachtete Person als Folge einer bestimmten (→) Strahlenexposition einen schwerwiegenden Gesundheitsschaden in Form von Leukämie oder Krebs erleidet. Im vorliegenden Bericht bezeichnet das Strahlenrisiko auch die Wahrscheinlichkeit eines Gesundheitsschadens der betrachteten Person bei einer bezeichneten Entwicklung des Endlagersystems (→ Szenarium).

Risikoschätzer

Der Risikoschätzer, gemeinhin auch Risikokoeffizient genannt, ist die zahlenmäßige Beziehung zwischen dem Risiko einer exponierten Person, einen schwerwiegenden Gesundheitsschaden zu erleiden, und der Exposition dieser Person. Bei einer Strahlenexposition ist der Risikoschätzer das Verhältnis von (→) Strahlenrisiko und (→) Strahlenexposition.

Risikoschranke

Die Risikoschranke im Sinne der vorliegenden Grundsätze ist die Minimalanforderung an die Einschlusswirksamkeit eines (→) Endlagersystems (minimales Schutzziel): Das durch das Endlager am betrachteten Standort verursachte (→) Strahlenrisiko muss bei allen möglichen Entwicklungen – außer eventuell bei (→) speziellen Entwicklungen – geringer als die Risikoschranke sein. Wird die Risikoschranke unterschritten, und hat eine Minimierung stattgefunden, so ist das verbleibende Risiko (→) tolerierbar. Die Risikoschranke soll nach einem offenen gesellschaftlichen Diskurs von den legitimierten Vertretern der Gesellschaft festgelegt werden.

Risikoziel

Das Risikoziel im Sinne der vorliegenden Grundsätze ist die Zielvorgabe für die Einschusswirksamkeit eines (→) Endlagersystems (Schutzziel): Das durch das Endlager am betrachteten Standort verursachte (→) Risiko soll nach Möglichkeit geringer als das Risikoziel sein. Ist das Risikoziel erreicht, so ist das Minimierungsgebot im Sinne der StrlSchV §6 (2) erfüllt und das verbleibende Risiko (→) unerheblich. Das Risikoziel soll nach einem offenen gesellschaftlichen Diskurs von den legitimierten Vertretern der Gesellschaft festgelegt werden.

Sensitivitätsanalyse

Ein deterministisches Modell liefert bei festgelegten Eingabewerten ein bestimmtes Ergebnis. In einer Sensitivitätsanalyse wird die Ergebnisänderung in Relation zur Änderung der Eingangswerte ermittelt. Aufgeschlüsselt nach Eingabewerten, kann so der „sensitivste“ und damit in der näheren Umgebung des betrachteten Ergebnisses entscheidendste Eingabewert ermittelt werden.

Stochastisch

Stochastik ist die Lehre von Häufigkeiten und Wahrscheinlichkeiten. Bei Strahlenwirkungen können grundsätzlich zwei Arten der Wirkung unterschieden werden. Sogenannte deterministische Strahlenwirkungen treten oberhalb von Schwellenwerten auf. Ist der Schwellenwert erreicht bzw. überschritten, so ist der Erkrankungseintritt vorherbestimmt (determiniert) und damit vorhersehbar. Die Erbsubstanz schädigende Strahlenwirkungen sind hingegen stochastischer Natur, d.h. der Krankheitseintritt ist nicht eindeutig vorherbestimmt und kann nicht sicher vorhergesagt werden. Es kann aber die Wahrscheinlichkeit angegeben werden, mit der eine exponierte Person erkranken wird. Diese Aussagen beziehen sich dabei immer auf eine Person mit durchschnittlichen Eigenschaften innerhalb einer exponierten Bevölkerung. Bis zum Ausbruch der Krankheit können aber Jahre oder Jahrzehnte vergehen, so dass in der Regel im Einzelfall kein direkter Zusammenhang mit der Strahlenexposition nachgewiesen werden kann, wohl aber ein statistischer.

Szenarium, Szenarien

Ein Szenarium (Plural: Szenarien) beschreibt eine mögliche Entwicklung des (→) Endlagersystems mit seinen sicherheitsrelevanten Eigenschaften. Die Entwicklung wird durch das Vorliegen von nicht genau zu ermittelnden Sachverhalten, das Eintreten von künftigen Ereignissen und den Ablauf von Prozessen bestimmt. Jedes Szenarium ist durch eine Eintrittswahrscheinlichkeit gekennzeichnet, wobei diese allerdings häufig nicht belastbar ermittelt, sondern höchstens in der Größenordnung abgeschätzt werden kann.

Szenarienanalyse

Die Szenarienanalyse ist die qualitative Analyse des Endlagersystems zur Ermittlung aller in den Grenzen praktischer Vernunft denkbaren Entwicklungen des Systems (→ Szenarium). Für Alternativenprüfungen ist ein repräsentativer Satz von Entwicklungen abzuleiten und für die Ermittlung der Sicherheit zu untersuchen. Für die Genehmigung eines Endlagers ist der Sicherheitsanalyse ein abdeckender Satz von Entwicklungen zu Grunde zu legen. Abdeckend bedeutet, dass andere Entwicklungen als die betrachteten entweder nachweisbar zu geringeren Auswirkungen führen oder nach praktischer Vernunft ausgeschlossen werden können.

Diskussionspapier