

# Grundsätze für die sichere Endlagerung

Die Sicherheitsphilosophie  
des Bundesamtes für Strahlenschutz

1. Entwurf



Bundesamt für Strahlenschutz

# 1. Entwurf

**BfS-01/04**

**ISSN 0937-4426**

**Salzgitter, Juli 2004**

# **Grundsätze für die sichere Endlagerung**

**Die Sicherheitsphilosophie  
des Bundesamtes für Strahlenschutz**

1. Entwurf

## INHALT

1	VORWORT	5
2	ENTSORGUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE ALS EINE GESELLSCHAFTLICHE HERAUSFORDERUNG	7
2.1	VERANTWORTUNG DER HEUTIGEN GENERATION FÜR EINE BESTMÖGLICHE LÖSUNG	7
2.2	VERPFLICHTUNG GEGENÜBER ZUKÜNFTIGEN GENERATIONEN	9
2.3	ENDLAGERUNG - EIN WEG OHNE ALTERNATIVEN	10
3	SCHUTZ VON MENSCH UND UMWELT	12
3.1	VERMEIDUNG UND MINIMIERUNG VON RISIKEN	12
3.2	SICHERHEITSKONZEPT FÜR EIN ENDLAGER	12
3.3	DAS SCHUTZNIVEAU MUSS VON DER GESELLSCHAFT FESTGELEGT WERDEN	17
4	SCHUTZ VOR IONISIERENDER STRAHLUNG	18
4.1	STRAHLENRISIKO	18
4.2	RISIKO BEI ZU ERWARTENDEN ENTWICKLUNGEN	19
4.3	RISIKO BEI AUßERGEWÖHNLICHEN ENTWICKLUNGEN	19
4.4	RISIKO FÜR PRINZIPIELL UNVERMEIDLICHE EREIGNISSE	20
4.5	REGULATORISCHE VORGABEN	20
5	SCHUTZ VOR CHEMOTOXISCHEN STOFFEN	22
6	SICHERHEIT DES ENDLAGERS	23
6.1	ZUVERLÄSSIGKEIT DER SICHERHEITSSYSTEME	23
6.2	NACHWEIS DER SICHERHEIT	24
7	KURZFASSUNG	28
	ANHANG 1	32
	ZUORDNUNG VON ENTWICKLUNGEN DES ENDLAGERS ZU DEN DREI SICHERHEITSEBENEN MIT HILFE VON SZENARIEN	32
	ANHANG 2	36
	RISIKOSTANDARDS	36
	ANHANG 3	38
	NEUGESTALTUNG DES ENDLAGERKONZEPTES	38
	GLOSSAR	40

Abbildung 1: Sicherheitsphilosophie für ein Endlager	6
Abbildung 2: Für wie dringlich halten Sie das Problem der Endlagerung?	7
Abbildung 3: Landessammelstellen und Zwischenlager in der Bundesrepublik	9
Abbildung 4: Radioaktive Abfälle in Deutschland im Jahr 2000 und 2040	9
Abbildung 5: Zuordnung von Ereignissen und Prozessen	25
Tabelle 1: Sicherheitsebenen für die Betriebsphase eines Endlagers	14
Tabelle 2: Sicherheitsebenen für das verschlossene Endlager	16
Tabelle 3: Risikoziele und Strahlenrisiken	21
Tabelle 3: Risikoziele und Strahlenrisiken	30

# 1. Entwurf

# 1 VORWORT

Durch die jahrzehntelange Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung hat sich der damit verbundene Anfall hochradioaktiver Abfälle zu einem Problem entwickelt, dessen Lösung schon seit vielen Jahren überfällig ist. Wir haben uns der Verantwortung für eine sichere Entsorgung dieser Abfälle zu stellen. Die dafür notwendigen Schritte dürfen nicht auf nachfolgende Generationen verlagert, sondern müssen zügig eingeleitet werden. Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) sieht sich gegenüber den Bürgerinnen und Bürgern in der Pflicht, zur Realisierung der bestmöglichen Lösung für dieses Problem beizutragen. Mensch und Umwelt müssen sicher vor schädlichen Auswirkungen der radioaktiven Abfälle geschützt werden.

Die Suche nach einem geeigneten Endlager in Deutschland stellt eine große gesellschaftliche Herausforderung dar. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Frage nach der Sicherheit eines Endlagers. Unter welchen Bedingungen ein Endlager als sicher akzeptiert wird, ist dabei nicht ausschließlich eine wissenschaftliche Fragestellung. Die unverzichtbare Ausweisung eines Endlagers muss sich auch auf einen gesellschaftlichen Konsens stützen können.

Das von der Bundesregierung beschlossene Ende der Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung begrenzt die Menge der zu entsorgenden abgebrannten Brennelemente und trägt dadurch zur öffentlichen Akzeptanz für Entscheidungen im Zusammenhang mit der Endlagerung bei.

Das BfS möchte die Herbeiführung eines gesellschaftlichen Konsens mit seinem Vorschlag zu den Grundsätzen für eine sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle fördern. Deshalb hat das BfS die vorliegende Sicherheitsphilosophie entwickelt, in der die grundlegende Vorgehensweise und sicherheitlichen Zielvorstellungen für ein Endlager in tiefen geologischen Formationen aus seiner Sicht dargelegt und begründet sind. Sie führt zu der aus heutiger Sicht wissenschaftlich und technisch bestmöglichen Lösung auch unter Beachtung ökonomischer Aspekte, zeigt Akzeptanz erhöhende Wege der gesellschaftlichen Kommunikation auf und stellt sich zugleich der Verantwortung für zukünftige Generationen.

Die Sicherheitsphilosophie hat ihre Wurzeln in den ethischen Vorgaben und Erwartungen, die die Gesellschaft an die Entsorgung radioaktiver Abfälle stellt. Die vorrangige Forderung nach Sicherheit

für Mensch und Umwelt verlangt, unzumutbare Belastungen für die heute und zukünftig lebenden Menschen auszuschließen. Aus Achtung vor dem Leben misst der Strahlenschutz die Zumutbarkeit der Belastungen nicht mehr an zu akzeptierenden Dosisgrenzwerten, sondern orientiert sich an der Dimension nicht weiter minimierbarer Risikowerte, wie sie zum Schutz von Mensch und Umwelt vor toxischen Substanzen international empfohlen und festgelegt werden.

Die Sicherheitsphilosophie soll das Dach bilden für die Eignungskriterien und damit die Auswahlkriterien für den bestmöglichen Endlagerstandort und die Sicherheitskriterien für die Endlagerung (siehe Abbildung 1). Die Grundgedanken, die hinter den Forderungen nach Diversität, Redundanz und Fehlertoleranz der Kerntechnik stehen, werden durch gleichwertige Sicherheitsziele für die Endlagerung ergänzt. So unterstützt die Sicherheitsphilosophie den Anspruch, eine verantwortbare und nachhaltige Lösung für die Endlagerung zu finden.

Das BfS lässt sich in seinen Grundsätzen zur Sicherheitsphilosophie von der Überzeugung leiten, dass eine gesellschaftliche Übereinkunft zur Lösung der Endlagerfrage nur dann gefunden werden kann, wenn die Entscheidungen in einem offenen und transparenten Verfahren getroffen werden. Mit den von der Entscheidung betroffenen Bürgerinnen und Bürgern, mit Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, mit Verbänden, Parteien und gesellschaftlichen Institutionen möchten wir deshalb eine Diskussion über unsere Vorstellungen zu den grundlegenden Anforderungen an den Schutz von Mensch und Umwelt für eine sichere und damit verantwortbare Endlagerung anregen.

Die Gesellschaft muss sich der Frage stellen, wie hoch das Risiko sein darf, mit dem sie bereit ist zu leben und das sie zukünftigen Generationen zumuten will.

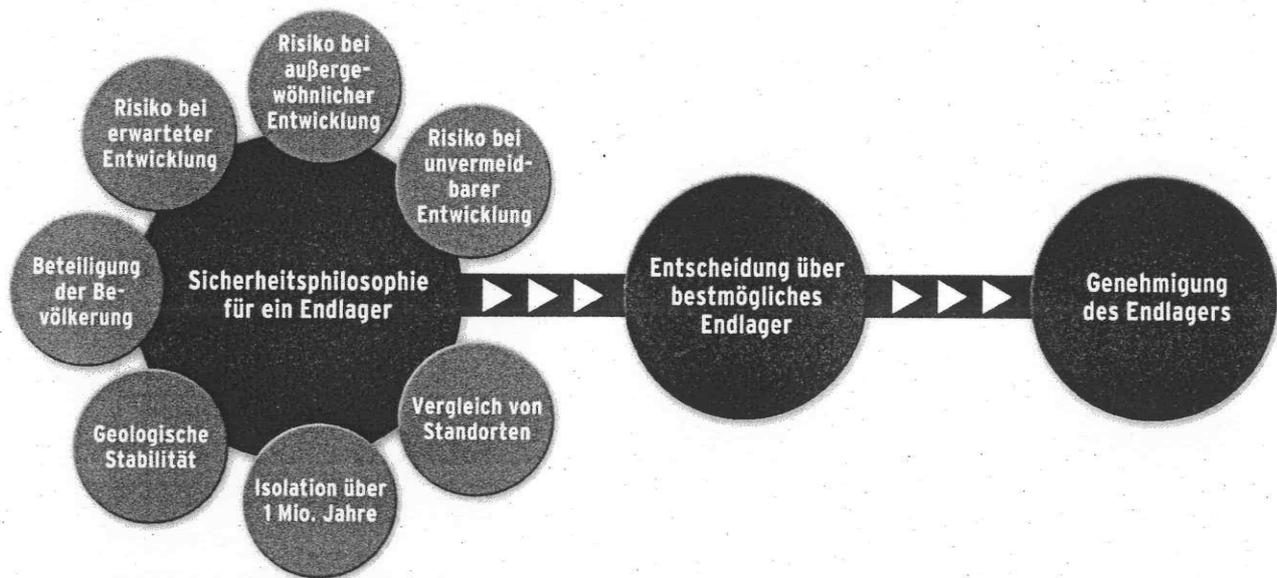


Abbildung 1: Sicherheitsphilosophie für ein Endlager

Auf der Grundlage der Sicherheitsphilosophie können die Kriterien und Sicherheitsziele für die Endlagerung entwickelt werden, bevor dann im Rahmen eines abgestimmten Regelwerkes für die technische Umsetzung verantwortbare Entscheidungen gefällt werden.

Schließlich verlangt gesellschaftliche Akzeptanz nach Verfahrensgerechtigkeit für die zu treffenden Entscheidungen. Ein gerechtes Verfahren zeichnet sich auch dadurch aus, dass es transparent macht, wo die Grenzen wissenschaftlicher Erkenntnisse liegen und wo gesellschaftliche Verantwortung in den Blickpunkt rückt. Weder dürfen politisch, gesellschaftlich oder ökonomisch motivierte Entscheidungen als wissenschaftlich notwendig dargestellt werden, noch dürfen Politik und Gesellschaft den Versuch machen, wissenschaftliche Erkenntnisse auszublenden.

Angesichts der vor uns liegenden Aufgabe ist es notwendig, die gesellschaftliche Verantwortung in den Vordergrund zu stellen und sich nicht an tagesaktuellen politischen Tendenzen oder dem Horizont von Legislaturperioden zu orientieren.

Das BfS stellt sich der Aufgabe, dieses Verfahren und damit den Weg zu einem sicheren Endlager zu gestalten. Deshalb freuen wir uns auf den Dialog mit allen Leserinnen und Lesern.

## 2 ENTSORGUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE ALS EINE GESELLSCHAFTLICHE HERAUSFORDERUNG

Die heutigen Generationen haben mit der Gewinnung von Elektrizität in Kernkraftwerken den Großteil des gesamten radioaktiven Abfalls verursacht. Die Abfälle stellen Hinterlassenschaften für zukünftige Generationen dar, deren Gefährdungspotenzial zwar mit der Zeit abnimmt, aber selbst nach mehr als einer Million Jahre - insbesondere im Fall der abgebrannten Brennelemente - noch hoch ist. Die sichere Entsorgung der radioaktiven Abfälle ist also eine dringende Aufgabe in der Verantwortung der verursachenden Generationen. Diese Einschätzung wird von einem großen Teil der deutschen Bevölkerung geteilt (siehe Abbildung 2).

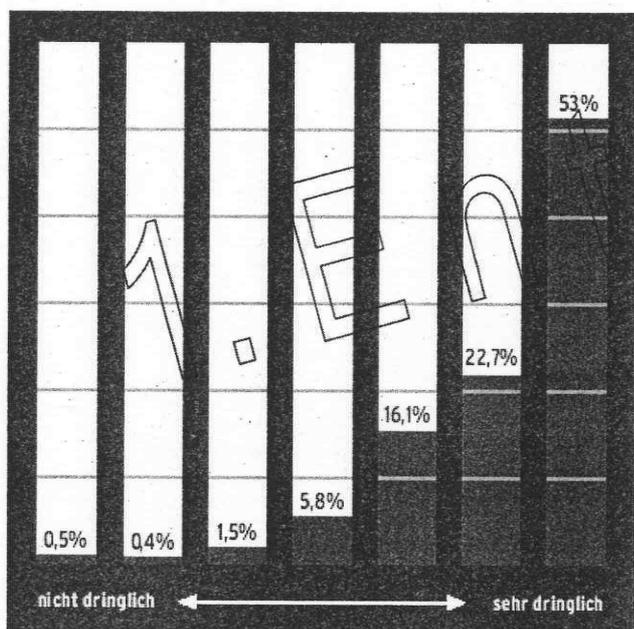


Abbildung 2: Für wie dringlich halten Sie das Problem der Endlagerung?

ITAS, 2002: Ergebnisse der repräsentativen Bevölkerungsumfrage (Bericht im Auftrag des BfS zur fachlichen Unterstützung des AkEnd durch das Institut für Technologiefolgenabschätzung und Systemanalyse)

Die Entsorgung der radioaktiven Abfälle wird nicht als Ergebnis einer rein technischen und vom Staat oder den Verursachern getroffenen Entscheidung hingenommen. 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 sowie gesamtstaatliche Erfordernisse sind so weit 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 (Generationengerechtigkeit).

### 2.1 VERANTWORTUNG DER HEUTIGEN GENERATION FÜR EINE BESTMÖGLICHE LÖSUNG

Unterschiedliche Wertvorstellungen und Interessen dürfen nicht dazu führen, dass machbare Lösungen zur Entsorgung radioaktiver Abfälle verhindert bzw. bewusst verzögert werden und somit die Lösung auf zukünftige Generationen oder in andere Länder verschoben wird. Vielmehr muss heute eine generationenübergreifende gerechte Lösung für 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. Die wichtigsten Bedingungen hierfür sind:

- Es muss der bestmögliche Schutz für Mensch und Umwelt angestrebt werden. „Bestmöglich“ bezeichnet diejenige Option, die sich bei Vorrang der Sicherheit in einem transparenten Entscheidungsprozess mit sorgfältiger Abwägung unterschiedlicher Werthaltungen und Interessen als die beste realisierbare Lösung darstellt.
- Die Lösung darf nicht zu unbilligen Belastungen zukünftiger Generationen oder der Umwelt führen. Dieses Prinzip bedeutet, dass heute eine Lösung angestrebt werden muss, die zukünftige Generationen unter keinen Umständen Risiken aussetzt, die wir selber heute nicht akzeptieren würden.

keinen Umständen Risiken aussetzt, die wir selber heute nicht akzeptieren würden.

- 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 Nachteile sollen in angemessener Weise so ausgeglichen werden, dass dies zum langfristigen Wohl der Bevölkerung in der betroffenen Region beiträgt.
- Das Verfahren, mit dem eine Lösung gefunden werden soll, muss strengen Anforderungen genügen, insbesondere ergebnisoffen und verlässlich sein. Es müssen die Entscheidungsgrundlagen und -regeln offengelegt, die Entscheidungen transparent gefällt sowie eine Überprüfung und gegebenenfalls die Korrektur von Einzelentscheidungen ermöglicht werden.

1. Entwurf

## 2.2 VERPFLICHTUNG GEGENÜBER ZUKÜNFTIGEN GENERATIONEN

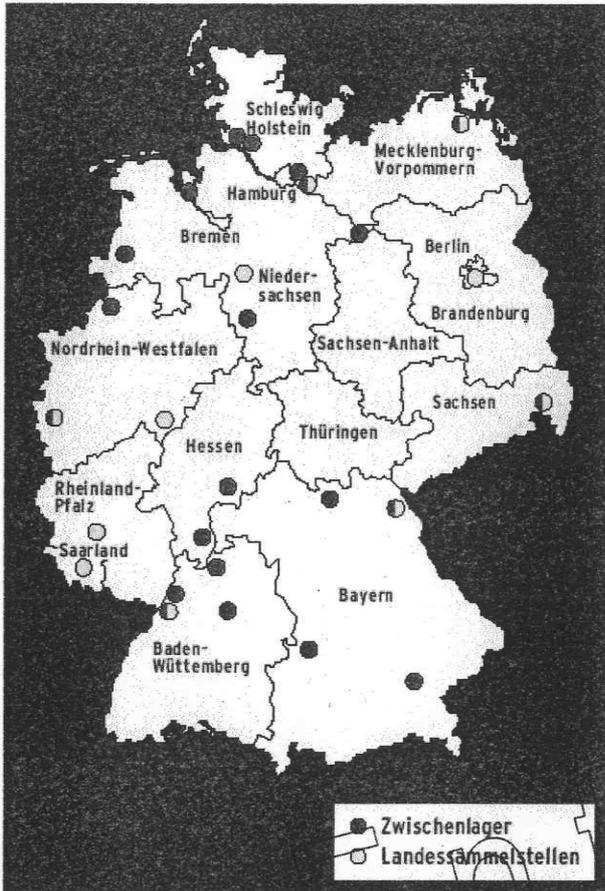


Abbildung 3: Landessammelstellen und Zwischenlager in der Bundesrepublik

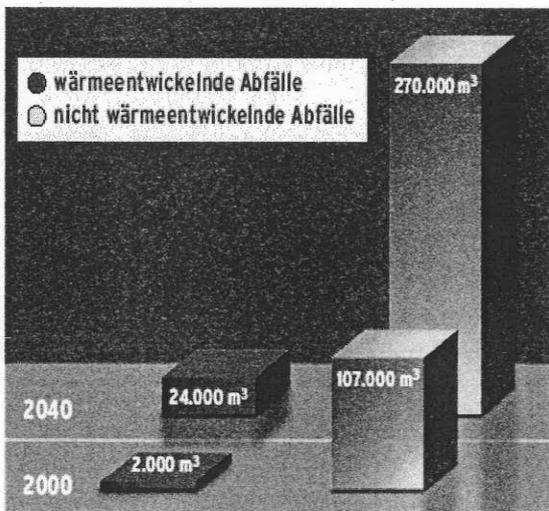


Abbildung 4: Radioaktive Abfälle in Deutschland im Jahr 2000 und 2040

In der Forderung nach einer verantwortungsvollen und nachhaltigen Entsorgung aller Arten radioaktiver Abfälle bedeutet Nachhaltigkeit neben dem erforderlichen Schutz der Menschen und der Umwelt folgendes:

- Die anfallenden Mengen radioaktiver Abfälle sind zu begrenzen.
- Die Entsorgung der Abfälle muss von den heutigen Generationen unter Beachtung ökologischer und ökonomischer Gesichtspunkte und unter Beteiligung der Bevölkerung realisiert werden können.
- Künftige 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 erhebliche Risiken empfunden werden, die Aufrechterhaltung eines sicheren Zustandes des Entsorgungsweges einen hohen Aufwand erfordert oder die angestrebte Entsorgungslösung mit erheblichen Einschränkungen für andere Nutzungen verbunden ist. Hier sind insbesondere die Anforderungen zur Vermeidung einer Verbreitung von stark radioaktiv strahlenden Materialien und von Spaltstoffen, die zum Bau von Atomwaffen verwendet werden können, zu beachten (Proliferationsrisiko).
- Die Umwelt darf in ihren Entfaltungsmöglichkeiten nicht unangemessen beeinträchtigt und in ihrer Anpassungsfähigkeit überfordert werden. Die Entfaltungsmöglichkeiten der Umwelt sind eingeschränkt, wenn z. B. unterschiedliche Pflanzen- und Tierpopulationen Flächen nicht mehr nutzen können.
- Die Lösung muss grundsätzlich reversibel sein. Nachfolgenden Generationen muss die Möglichkeit offen stehen, eine (aus ihrer Sicht) bessere Lösung zu realisieren. Im Sinne der Reversibilität sollen nur Lösungen angestrebt werden, bei denen die Entsorgung radioaktiver

Abfälle nicht auf Verdünnung beruht wie z. B. die Verklappung in den Meeren oder die Verteilung in der Luft. Diese Wege sind grundsätzlich nicht reversibel. Selbst aus einem verschlossenen Endlager können die Abfälle, wenn auch nur mit hohem technischen Aufwand, wieder geborgen werden. Eine Rückholung von Abfällen aus einem Endlager, für die von vornherein technische Möglichkeiten eingeplant werden, um die radioaktiven Abfälle wieder aus einem Endlager zurück zu holen, ist mit Reversibilität nicht gemeint.

Für die Einschätzung, ob ein entsorgungsstrategisches und -technisches Handeln nachhaltig ist, wird von einer gewissen Kontinuität allgemeiner menschlicher Erwartungen an das Leben und der damit verbundenen Wertvorstellungen, Bedürfnisse und Interessen ausgegangen. Hierzu gehören auch die aus heutigem ethischen Verständnis formulierten Forderungen nach "Sicherheit zuerst" und "bestmöglichem Schutz".

### 2.3 ENDLAGERUNG - EIN WEG OHNE ALTERNATIVEN

Für die heute existierenden und bis zur Realisierung des Ausstiegs aus der Kernenergie anfallenden radioaktiven Abfälle ist die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen im Hinblick auf das erreichbare Sicherheitsniveau und die zeitnahe Realisierbarkeit selbst bei Berücksichtigung der Kosten die bestmögliche Entsorgungsstrategie. 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 beherrschbar und deutlich geringer als bei anderen Entsorgungsoptionen, wenn sichergestellt ist, dass

- die Schadstoffe für einen Zeitraum von etwa einer Million Jahre eingeschlossen werden und
- sich die Langzeitsicherheit des Endlagers auf die Zuverlässigkeit der geologischen und geotechnischen Barrieren stützt.

Es muss demnach ein Endlager gesucht werden, das die Schadstoffe möglichst lange in dem durch geologische und geotechnische Barrieren begrenzten Bereich des Endlagers isoliert (einschlusswirksamer Gebirgsbereich) und damit von Menschen und belebter Umwelt fernhält. Der Einschluss der Schadstoffe im einschlusswirksamen Gebirgsbereich muss für den Zeitraum gezeigt werden, für den nach Stand von Wissenschaft und Technik für einen Vergleich von Alternativen ausreichend zuverlässige Prognosen erstellt werden können. Für einen Zeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahre ist dies möglich.

Für Zeiträume jenseits von einer Million Jahren können, abgeleitet aus Erfahrungen 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. Weil die radioaktiven Abfälle aber Isotope enthalten, die Halbwertszeiten von deutlich länger als eine Million Jahre aufweisen (z. B. das radiotoxische Np-237 mit einer Halbwertszeit von 2,1 Millionen Jahren), 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 zuvor genannten Nachteile aus folgenden Gründen:

- Endlager 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 unbemerkt stark radioaktiv strahlende Materialien und zum Bau von Atomwaffen geeignete spaltbare Stoffe aus einem verschlossenen Endlager entwendet werden, ist äußerst gering.
- 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 und können durch entsprechende Standortwahl und seine gezielte Auslegung weiter reduziert werden (z. B. durch die Vermeidung von potenziell wirtschaftlich interessanten Lagerstätten).
- Die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ist mit den bestehenden Technologien aus Bergbau und Ingenieurtechnik in einem akzeptablen Zeitrahmen machbar. Damit kann die Entsorgung radioaktiver Abfälle von den heutigen Generationen mit kalkulierbaren Kosten auch tatsächlich realisiert werden.

Die zur Endlagerung in tiefen geologischen Formationen denkbaren Alternativen können vergleichbare Vorteile nicht auf sich vereinen. Sie weisen auf Grund unzureichender Isolation 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 (etwa der Endlagerung im Meeresboden oder in Subduktionszonen) 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 Isotope (Transmutation) ist auf absehbare Zeit nicht umsetzbar. Diese Strategie wäre zudem mit dem Betrieb kerntechnischer Anlagen und chemischer Abtrennanlagen verbunden, deren Umfang den der - in Deutschland aufgegebenen - Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente weit übertrifft. Auch bei dieser Entsorgungsstrategie müssten Abfälle endgelagert werden, da nicht alle langlebigen

Isotope in kurzlebige bzw. stabile umgewandelt werden können.

Eine Langzeitzwischenlagerung (z. B. über mehrere hundert Jahre) erfordert die aktive Betreuung des Zwischenlagers und ist mit offensichtlichen 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.

MENTwurf

### 3 SCHUTZ VON MENSCH UND UMWELT

Die Suche nach dem bestmöglichen Standort für ein Endlager und die notwendigen gesellschaftlichen und politischen Entscheidungen stellen neben vielen technischen Anforderungen an Nachweisführung und Realisierung auch besondere Anforderungen an das Schutzkonzept. Das Schutzkonzept für ein Endlager muss den bestmöglichen Schutz von Mensch und Umwelt sicherstellen und gleichzeitig den als besten angesehenen Entsorgungsweg der Endlagerung ermöglichen. 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) zu verstehen.

In internationalen Gremien werden zur Zeit Konzepte zum Schutz der Umwelt entwickelt. Es ist absehbar, dass diese Konzepte in neue Basisempfehlungen der International Commission for Radiation Protection (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.

#### 3.1 VERMEIDUNG UND MINIMIERUNG VON RISIKEN

Das Schutzkonzept für ein Endlager muss von dem Grundsatz ausgehen, dass zukünftige Generationen keinen größeren, insbesondere keinen größeren radiologischen Risiken durch das Endlager ausgesetzt sein dürfen, als die Generationen, die die Verantwortung für das Entstehen der radioaktiven Abfälle tragen. Zukünftige Generationen werden durch die Entscheidungen der heutigen Generationen für ein Endlager bleibend gebunden und können diese folglich auch in ihren Auswirkungen nur hinnehmen. Im Gegensatz zu anderen kerntechnischen Anlagen besteht bei einem Endlager nach seinem Verschluss keine einfache Möglichkeit, den „Betrieb einzustellen“. Die Bergung von radioaktiven Abfällen aus einem verschlossenen Endlager ist zwar machbar, die damit verbundenen sicherheitstechnischen Risiken und hohen Kosten werden aber sicherlich nur dann in Kauf genommen, wenn eine akute Gefahr für

Mensch oder Umwelt vorliegt. Es ist deshalb von einer erhöhten Schutznotwendigkeit für zukünftige Generationen auszugehen, und es besteht die Verpflichtung langfristige Risiken zu vermeiden. Wo dies praktisch nicht möglich ist, sind unvermeidbare Risiken soweit zu minimieren, dass das verbleibende Risiko als unerheblich bzw. tolerierbar beschrieben werden kann. 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 und sind daher Ausgangspunkte für die Ausarbeitung eines Schutzkonzepts für ein Endlager.

#### 3.2 SICHERHEITSKONZEPT FÜR EIN ENDLAGER

Das Sicherheitskonzept für ein Endlager muss ausgehen von den Wirkungen auf Mensch und Umwelt und von der Festlegung eines anzustrebenden bzw. einzuhaltenen Schutzniveaus. Es ist damit einem klassischen Immissionskonzept (Betrachtung der Einwirkungen) vergleichbar. Das Sicherheitskonzept für ein Endlager darf nicht bei der heute international üblichen Vorgehensweise im Strahlenschutz stehen bleiben.

Das heutige Regelwerk zu kerntechnischen Anlagen beruht zum überwiegenden Teil auf Emissionskonzepten und geht von der Kontrollierbarkeit von Emissionen an den Strahlenquellen aus (Betrachtung von Freisetzungen bzw. Auswirkungen). Diese Kontrollierbarkeit ist für ein verschlossenes Endlager nicht gegeben. Das Sicherheitskonzept für das Endlager sieht vor, dass nach seinem Verschluss keine Kontrolle erforderlich ist.

Der Strahlenschutz selbst baut auf empirisch gesicherten wissenschaftlichen Erkenntnissen zur Wirkung von Strahlung auf den Menschen auf. Ionisierende Strahlung kann, in Abhängigkeit von der Strahlendosis, Krebs und Leukämien auslösen. Aufbauend auf grundsätzlichen, empirisch sowie theoretisch wissenschaftlich begründeten Überlegungen zum Wirkungsmechanismus von Strahlung ist anzunehmen, dass diese karzinogene Wirkung der Strahlung auch bei sehr geringen Strahlenbelastungen auftritt.

Aus diesen Erkenntnissen leitet der moderne Strahlenschutz drei Grundprinzipien ab, die auch auf das Problem der radioaktiven Abfälle anzuwenden sind:

- **Rechtfertigung**

Für die bereits vorhandenen Abfälle besteht keine Wahlmöglichkeit mehr. Eine Rechtfertigung mit der notwendigen Nutzen-/Risikoabwägung kann nur noch für die zukünftig anfallenden Abfälle stattfinden. Mit dem Beschluss zum zeitlichen Ende der Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung und der damit beschlossenen Begrenzung der Menge der endzulagernden hochradioaktiven Abfälle wurde auch die Frage der Rechtfertigung weiterer radioaktiver Abfälle politisch entschieden.

- **Minimierungsgebot**

Minimierung der Strahlenbelastung bedeutet hier im Wesentlichen die Minimierung der Freisetzungswahrscheinlichkeit. Das betrifft neben der Endlagerung auch die zügige Beendigung oberirdischer Zwischenlagerung. Darüber hinaus bedeutet Minimierung aber auch, dass etwaige Freisetzungen so gering wie möglich zu halten sind.

- **Dosisbegrenzung**

Dosisbegrenzung bedeutet vor allem Risikobegrenzung. Die Festlegung von Risiko- oder Dosisgrenzwerten baut zwar auf wissenschaftlichen Erkenntnissen auf, beinhaltet aber auch gesellschaftliche Werte und Einstellungen. Deshalb muss in einem geeigneten gesellschaftlichen Verfahren die Festlegung von Risikobegrenzungen erfolgen.

Das Sicherheitskonzept des BfS basiert auf diesen drei Strahlenschutzgrundsätzen. Den Grundsätzen der Begrenzung von Strahlenexpositionen und der Risikominimierung wird durch die Festlegung von Risikozielen entsprochen. Sie sind wesentliche Entscheidungskriterien für die Such- und Planungsphase des Endlagers.

Bei einem Endlager in tiefen geologischen Formationen ist zu unterscheiden zwischen

- der Betriebsphase, in der radioaktive Abfälle eingelagert werden und 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.

#### 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. Diese müssen dem Sicherheitsverständnis und den technischen Möglichkeiten entsprechen, die dann vorliegen, wenn sich im Standortauswahlverfahren der bestmögliche Standort abzeichnet.

Für die Beurteilung der Sicherheit des Endlagers in der Betriebsphase ist ein in vier Ebenen gestaffeltes Sicherheitskonzept analog dem für Kernkraftwerke anzuwenden, das der Forderung nach diversitären, redundanten und fehlerverzeihenden Techniken gerecht wird (siehe Tabelle 1). Die vier Sicherheitsebenen und die zugehörigen Maßnahmen werden entsprechend den Anforderungen und spezifischen Eigenheiten des Endlagers auszufüllen sein.

Sicherheitsebene		Maßnahmen
1	Bestimmungsgemäßer Betrieb	Normalbetrieb Qualität der Betriebssysteme und der betrieblichen Abläufe sowie sicherheitsgerichtetes Handeln Verhinderung von Betriebsstörungen
2	Bestimmungsgemäßer Betrieb	Anomaler Betrieb Inhärent sicheres Anlagenverhalten Verhinderung von Auslegungsstörfällen
3	Auslegungsstörfälle Inhärent sicheres Anlagenverhalten, passive und aktive Sicherheitseinrichtungen Beherrschung von Auslegungsstörfällen	
4	Auslegungsüberschreitende Störfälle/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 die Sicherheit des Endlagers in der Betriebsphase von größerer Bedeutung sein als die Sicherheit nach Verschluss des Endlagers. Der Transport von radioaktiven Abfällen zum Endlager, die Handhabung und Lagerung von radioaktiven Abfällen im Endlager, die Vermeidung einer Verbreitung von spaltbaren Stoffen und stark radioaktiv strahlenden Materialien, die Veränderung der Infrastruktur, des Naturhaushaltes und des Landschaftsbildes sowie in besonderem Maße gesellschaftliche Auswirkungen müssen mit der betroffenen Bevölkerung erörtert und nach Möglichkeit gemeinsam mit ihr gestaltet werden. Der AkEnd hat für die Beteiligung der Bevölkerung umfassende Vorschläge gemacht, die auch aus Sicht des BfS weitgehend umgesetzt werden sollten.

#### Gestaffelte Sicherheitsebenen für das verschlossene Endlager

Im Vordergrund der Sicherheitsphilosophie für die Endlagerung radioaktiver Abfälle steht das verschlossene Endlager. Hierfür gelten besondere Sicherheitsanforderungen, weil der Mensch nicht mehr als Betreiber dieses Endlagers eingreifen

kann und soll. Das bedeutet auch, dass eine Rückholung, für die von vornherein technische Möglichkeit im Endlager eingeplant werden müssten, nicht vorgesehen ist. Es muss nachgewiesen werden, dass die Abfälle langfristig sicher verwahrt sind, ohne dass sich die Sicherheit auf Instandhaltung oder Überwachung abstützt.

Durch eine günstige geologische Gesamtsituation und die Verschlussmaßnahmen soll der vollständige Einschluss der radioaktiven Abfälle erreicht werden. Für die Bewertung der Langzeitsicherheit müssen alle sicherheitsrelevanten Ereignisse und Vorgänge betrachtet werden. Diese kennzeichnen die möglichen "Entwicklungen" des Endlagers. Dabei wird zwischen zu erwartenden, außergewöhnlichen und unvermeidbaren Entwicklungen unterschieden.

Ein Großteil der in den Abfällen anfänglich enthaltenen Radioaktivität klingt durch radioaktiven Zerfall ab, während die Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich isoliert sind. Für die **zu erwartenden Entwicklungen** wird gefordert, dass von einem verschlossenen Endlager allenfalls ein **unerhebliches Risiko** für Mensch und Umwelt durch die in das Endlager eingebrachten Stoffe ausgeht.

Die geologischen Barrieren am Standort müssen darüber hinaus soviel Sicherheit geben, dass selbst bei 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. Solche Entwicklungen werden **als außergewöhnliche Entwicklungen** bezeichnet. Sie dürfen nur mit geringer Wahrscheinlichkeit eintreten. Die Rückhaltung durch die Barrieren des Endlagers, eine äußerst geringe Grundwassergeschwindigkeit (falls überhaupt vorhanden) und durch geochemische Immobilisierungs- und Rückhalteprozesse müssen sicherstellen, dass die Schadstoffe weitgehend im einschlusswirksamen Gebirgsbereich isoliert bleiben. Selbst für außergewöhnliche Entwicklungen des Endlagers muss das mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle verbundene Risiko für Mensch und Umwelt tolerierbar bleiben (**tolerierbares Risiko**).

Die Wahrscheinlichkeit eines **unbeabsichtigten menschlichen Eindringens** in das Barrierensystem des Endlagers muss durch eine geeignete Standortauswahl und Endlagerauslegung minimiert werden. Die Möglichkeit zur Entwendung von spaltbaren Stoffen und stark radioaktiv strahlenden Materialien muss durch geeignete Sicherungs- und Verschlussmaßnahmen so gering wie möglich gehalten werden. Bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen verbleibt allerdings ein **unvermeidbares Risiko** für Mensch und Umwelt, das jedoch von den Risiken aller anderen Optionen für die Entsorgung dieser Abfälle übertroffen wird. Zu diesen Entwicklungen gehören auch äußerst unwahrscheinliche, dabei aber unvermeidbare **Spezialfälle** (z. B. Entstehung durchschlagender Klüftzonen, Vulkanismus). Dies führt zu folgendem in drei Ebenen gestaffelten Sicherheitskonzept:

	Sicherheitsebene	Maßnahmen
1	Zu erwartende Entwicklungen	Sorgfältige Auswahl des Standortes Sicherheitsabstand zu den Belastungsgrenzen der geologischen Barrieren Verschluss des Endlagers gemäß Stand von Wissenschaft und Technik
2	Außergewöhnliche Entwicklungen	Auswahl eines Standortes mit Sicherheitsreserven Anordnung zusätzlicher Barrieren
3	Unbeabsichtigtes menschliches Eindringen	Übermittlung der Information Standortauswahl Anlagenauslegung
	Spezialfälle (z.B. durchschlagende Klüftzonen)	Standortauswahl

Tabelle 2: Sicherheitsebenen für das verschlossene Endlager

Die erste Sicherheitsebene muss ausschlaggebend für die Prüfung alternativer Endlagerstandorte und Anlagenplanungen und die daraus resultierenden Entscheidungen sein. Es muss durch sorgfältige, qualifizierte Standortauswahl, durch Anlagenauslegung und den Verschluss des Endlagers nach Stand von Wissenschaft und Technik der zuverlässige, gut beschreibbare und wartungsfreie Einschluss der radioaktiven Abfälle sichergestellt werden. Die zuverlässige Funktion des Endlagers muss im Vordergrund der Beurteilung stehen. Dies beinhaltet, dass Sicherheitsabstände zu den Grenzen der zulässigen Belastung der geologischen Barrieren durch vom Endlager ausgehende Belastungen, die z.B. durch Bergbau, Wärmeeintrag und Gasbildung auftreten, eingehalten werden. Damit wird erreicht, dass für die zu erwartenden Entwicklungen von den radioaktiven Abfällen allenfalls ein unerhebliches Risiko für Mensch und Umwelt ausgeht.

In der zweiten Sicherheitsebene muss durch Sicherheitsreserven der geologischen Barrieren und der möglicherweise ergänzenden Barrieren sichergestellt werden, dass auch für

außergewöhnliche Entwicklungen nur eine begrenzte Freisetzung von Schadstoffen aus dem Endlager erfolgen kann und hierdurch tolerierbare Risiken für Menschen und Umwelt nicht überschritten werden. An die Einordnung von Entwicklungen in die Kategorie der außergewöhnlichen Entwicklungen sind strenge Maßstäbe anzusetzen. Die Summe der Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten aller voneinander unabhängigen außergewöhnlichen Entwicklungen muss deutlich kleiner ( $< 0,1$ ) als die Wahrscheinlichkeit der zu erwartenden Entwicklungen sein. Einzelfallbetrachtungen müssen durchgeführt werden, wenn die Konsequenzen einer außergewöhnlichen Entwicklung einen starken Einfluss auf das vom Endlager ausgehende Gesamtrisiko haben kann. Insbesondere ist zu prüfen, ob solche Entwicklungen genauso wie die zu erwartenden Entwicklungen zu bewerten und damit an dem strengeren Risikoziel zu messen sind.

In die dritte Sicherheitsebene werden Entwicklungen eingeordnet, die als unvermeidbare Risiken grundsätzlich hingenommen werden müssen. Dennoch sollen durch die Standortauswahl und die Endlagerauslegung die Auswirkungen oder Eintrittswahrscheinlichkeiten solcher Entwicklungen reduziert werden.

### 3.3 DAS SCHUTZNIVEAU MUSS VON DER GESELLSCHAFT FESTGELEGT WERDEN

Die Schutzziele und Schutzniveaus, insbesondere die radiologischen Schutzziele, sollen aufbauend auf wissenschaftlicher Erkenntnis und unter Berücksichtigung gesellschaftlicher Wertvorstellungen in einem offenen gesellschaftlichen Diskurs festgelegt werden. Die Wahrnehmung eines Risikos wird wesentlich bestimmt durch Werte und Normen einer Gesellschaft. Nur durch weitreichende Information und ausreichende Beteiligung kann das Schutzkonzept für ein Endlager die erforderliche gesellschaftliche Legitimation erhalten. Welche Risiken als unerheblich oder tolerierbar bewertet werden, ist das Ergebnis eines gesellschaftlichen Diskurses. In einem offenen Diskurs muss deshalb bestimmt werden, welches Risiko die heutigen Generationen für sich und ihre Nachfahren als unerheblich bzw. tolerierbar akzeptieren. Dabei wird es nicht nur um die Festlegung eines allgemeinen Risikoniveaus, sondern auch um die Verteilung der Risiken über Raum und Zeit und die damit einhergehende Betroffenheit unterschiedlicher Bevölkerungsgruppen und Generationen gehen. Als unerheblich wird das Risikoniveau verstanden, unterhalb dessen beim überwiegenden Teil der Bevölkerung keine Besorgnis hervorgerufen wird; dabei ist auch die Einschätzung der möglicherweise betroffenen Bevölkerung in einer Endlagerregion einzubeziehen. Das tolerierbare Risiko wird von der Gesellschaft in Abwägung von Nutzen und Risiken menschlichen Handelns insbesondere für unbeteiligte Dritte festgelegt.

So bildet das Ergebnis eines gesellschaftlichen Diskurses eine Grundlage für das Sicherheitskonzept eines Endlagers.

## 4 SCHUTZ VOR IONISIERENDER STRAHLUNG

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 aber 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.

### 4.1 STRAHLENRISIKO

Die Wirkung ionisierender Strahlung führt beim Menschen zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit, eine bösartige Krankheit zu erleiden. Die Wahrscheinlichkeit für den Eintritt einer schädlichen Auswirkung nach vorangegangener Strahlenexposition kann in Form eines Risikos ausgedrückt werden.

Als Risiko wird allgemein das Produkt aus der Eintrittswahrscheinlichkeit und dem Ausmaß eines Schadens bezeichnet. Im Strahlenschutz ist der Schaden die schwerwiegende Erkrankung. Beim Auftreten einer Strahlenwirkung entspricht das Risiko daher direkt der Eintrittswahrscheinlichkeit der Erkrankung.

Die Strahlenrisiken sind so realitätsnah wie möglich zu ermitteln. Dabei soll der Abschätzung möglicher Risikobandbreiten der Vorrang vor der Abschätzung von Einzelwerten gegeben werden. 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.

Die Vorgabe, möglichst realitätsnahe Abschätzungen vorzunehmen, unterscheidet sich weitgehend vom Vorgehen im derzeit praktizierten Strahlenschutz. Während die Dosis-Risiko-Abschätzung im Wesentlichen auf der Basis epidemiologischer Daten beruht und als weitgehend realistisch bewertet wird, basieren die

heute angewandten Expositionsmodelle des Strahlenschutzes (siehe u.a. Allgemeine Verwaltungsvorschrift - AVV zu § 47 StrlSchV) auf Strahlenexposition überschätzende Überlegungen. Eine Beaufschlagung einzelner Eingangsparameter jeweils mit Sicherheits- oder Unsicherheitsfaktoren und deren anschließende Aggregation vermeidet zwar eine Unterschätzung, führt aber in der Regel dazu, dass in der abschließenden Bewertung häufig nicht oder nur schwer der Grad der Konservativität benannt werden kann. Dieses Vorgehen, das gewählt wurde, um den Nachweis von Sicherheit für Tätigkeiten und Anlagen führen zu können, ist jedoch ungeeignet für ein entscheidungsleitendes Verfahren wie das der Endlagersuche.

Die Festlegung, was unter einem unerheblichen Risiko zu verstehen ist, soll sich an internationalen und nationalen Empfehlungen und Regelungen orientieren und in einem gesellschaftlichen Diskurs erfolgen. Dabei ist zu unterscheiden zwischen dem Risiko, einen gesundheitlichen Schaden zu erleiden, falls es durch die Endlagerung zu einer Strahlenexposition einer Person kommt (Risiko bei Eintritt der Strahlenexposition, Strahlenrisiko) und dem insgesamt mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle verbundenen Risiko. Internationale Richtlinien unter anderem der Weltgesundheitsorganisation zur Qualität der Luft in Europa und zur Qualität von Trinkwasser (WHO 2000, 1996) spezifizieren den Risikobereich durch Schadstoffe mit krebsauslösendem Potential in den genannten Umweltmedien mit 1 in 100.000 bis 1 in 1.000.000, d.h. 1 schwere Erkrankung bei 100.000 bzw. 1.000.000 lebenslang exponierter Personen.

Nach heutigem Stand des Wissens über die Wirkung ionisierender Strahlung muss davon ausgegangen werden, dass die Strahlenexposition einer Person in Höhe von 1 mSv die Wahrscheinlichkeit, dass diese Person einen schweren gesundheitlichen Schaden erleidet, um den Faktor  $12 \times 10^{-5}$  erhöht (d. h. bei 100.000 exponierten Personen erkranken 12 Personen schwer) (UNSCEAR, 2000). Für die Übertragung der Risikoabschätzung von akuten Expositionen auf lang andauernde Expositionen im niedrigen Dosisbereich wird der Risikoeffizient von  $12 \times 10^{-5}$  nach Empfehlung der ICRP (1990) um den Faktor 2 reduziert (DDREF, Dosis- und Dosisleistungsreduktionsfaktor). Diese Reduktion

ist fachlich umstritten, da sie durch Beobachtungsstudien an exponierten Personen nicht bestätigt werden kann.

Für den Fall, dass es zu Emissionen aus einem Endlager kommt, muss angenommen werden, dass diese über lange Zeiträume wirken. Bezogen auf eine Lebenszeit von 70 Jahren und bei einer ständigen Strahlenexposition in Höhe von 1 mSv pro Jahr bedeutet dies eine Erhöhung des Risikos etwa um den Faktor  $4 \times 10^3$  (d. h. bei 1.000 exponierten Personen erkranken 4 Personen schwer). Eine solche Risikoerhöhung durch ein verschlossenes Endlager wäre aber weder unerheblich noch tolerierbar.

Zum Vergleich von Strahlenrisiken wird häufig die natürlich bedingte Strahlenexposition in Deutschland, die im Mittel etwa 2,2 mSv pro Jahr beträgt, herangezogen. Das dadurch bedingte Lebenszeitrisko einer schweren Erkrankung liegt mit 0,01 (1 Erkrankung pro 100 Personen) so hoch, dass Risikoziele für ein Endlager deutlich niedriger sein müssen.

Im Strahlenschutzkonzept für ein Endlager sollen Risikoziele festgelegt werden. Aus diesen werden Dosiswerte berechnet, aus denen dann maximal zulässige Konzentrationen von Radionukliden in Boden, Wasser und Luft abgeleitet werden können.

## 4.2 RISIKO BEI ZU ERWARTENDEN ENTWICKLUNGEN

Ein Risiko wird vom Bundesamt für Strahlenschutz als unerheblich bewertet, wenn es in einer Gruppe von einhunderttausend bis eine Million Personen, die lebenslang exponiert waren, zu weniger als einer zusätzlichen schweren Erkrankung kommen kann. Ob dieser Risikostandard eingehalten wird, ist sowohl am Risikowert, der als Medianwert (50 % der Werte liegen unterhalb und 50 % der Werte liegen oberhalb dieses Wertes) von 1 in 1.000.000 definiert wird, als auch an der oberen Bandbreite der berechneten Risikowerte zu messen. (Risikobegrenzung durch Festlegung des 90-Perzentilwertes bei 1 in 100.000). Für die vorläufige Bewertung in der Phase der Standortauswahl wird empfohlen, den Medianwert des Strahlenrisikos für die zu erwartende Entwicklung mit den maximalen Auswirkungen und zum Zeitpunkt der maximalen Auswirkungen

heranzuziehen. Dieser Wert kann schon durch wenige Berechnungswerte zuverlässig ermittelt werden. Hiermit wird dem noch vorläufigen Charakter der Datengrundlage während der Standortauswahl Rechnung getragen. Insgesamt steht das vorgeschlagene unerhebliche Risiko im Einklang mit international anerkannten Wertevorstellungen für Gesundheit und Wohlfahrt.

## 4.3 RISIKO BEI AUßERGEWÖHNLICHEN ENTWICKLUNGEN

Der Endlagerstandort soll so ausgewählt und das Endlager so geplant werden, dass die Anzahl und Wahrscheinlichkeit außergewöhnlicher Entwicklungen (Herleitung siehe Anhang) möglichst gering ist. Die Auswirkungen außergewöhnlicher Entwicklungen auf Mensch und Umwelt sind dementsprechend keine geplanten Konsequenzen. Deshalb ist es berechtigt, hierfür ein höheres Risikoziel festzulegen. Es wird empfohlen, den Risikowert für das tolerierbare Risiko bei außergewöhnlichen Entwicklungen so festzulegen, dass zukünftigen Generationen selbst im Fall des Auftretens dieser außergewöhnlichen Entwicklungen keine höheren Risiken zugemutet werden als den gegenwärtigen Generationen aus dem Betrieb kerntechnischer Anlagen im normalen Betrieb entstehen. Es wird deshalb für das unbedingte Risiko ein um den Faktor 10 höheres Risikoziel als bei den zu erwartenden Entwicklungen vorgeschlagen.

Als Risiko wird hier die Summe aller von außergewöhnlichen Entwicklungen ausgehenden Risiken verstanden, die unabhängig voneinander eintreten können. Es ist der Maximalwert der sich überlagernden Auswirkungen zu bewerten. In noch stärkerem Maße als bei den zu erwartenden Entwicklungen muss mit einer nur gering abgesicherten Datengrundlage gerechnet werden. Deshalb ist auch hier der Medianwert des Risikos heranzuziehen. Es wird als Risikostandard für außergewöhnliche Entwicklungen ein Wert von 1 in 100.000 vorgegeben. Durch Einzelfallbetrachtungen muss aber sichergestellt werden, dass es nicht zu Unterschätzungen von Risiken durch einzelne außergewöhnliche Entwicklungen kommen kann. Es muss insbesondere sichergestellt sein, dass für außergewöhnliche Entwicklungen, deren Auswirkungen nahe an das Risikoziel heranreichen, belastbar deren sehr geringe

Eintrittswahrscheinlichkeit begründet werden kann. Andernfalls müssen sie den zu erwartenden Entwicklungen zugeordnet werden. Die geringere Eintrittswahrscheinlichkeit der außergewöhnlichen Entwicklungen von 10 % wird durch den Faktor 10 für das unbedingte Risiko berücksichtigt.

Das Strahlenrisiko bei Eintritt der außergewöhnlichen Entwicklungen, d.h. das potentielle oder bedingte Risiko, darf somit in der Regel zu nicht mehr als einer zusätzlichen schweren Erkrankung in einer Gruppe von einhunderttausend Personen, die lebenslang exponiert waren, führen, bei der Abschätzung sich überlagernder Auswirkungen zu nicht mehr als einer Erkrankung in zehntausend Personen (Risikobegrenzung). Unter der Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeit der außergewöhnlichen Entwicklungen von kleiner 10 % und dem um den Faktor 10 höheren Risikostandard bedeutet dies, dass das bedingte Strahlenrisiko nicht mehr als den Faktor 100 höher als bei den zu erwartenden Entwicklungen sein darf.

Auch für außergewöhnliche Entwicklungen muss das Ziel angestrebt werden, das Risiko für Mensch und Umwelt so gering wie möglich zu halten. Das für diese Entwicklungen festgelegte tolerierbare Risiko stellt somit eine Obergrenze dar. Optimierungsziel muss sein, möglichst nahe an das unerhebliche Risikoniveau heranzukommen. Hierbei ist entscheidend, dass nicht nur das Individualrisiko zu beachten ist, sondern dass auch die mögliche Anzahl betroffener Menschen und die Größe des möglicherweise betroffenen Umweltbereichs in Optimierungsbetrachtungen mit einbezogen werden. Die Verdünnung freigesetzter Radionuklide im Grundwasser darf die vergleichende Bewertung von Endlagerstandorten nicht maßgeblich beeinflussen (siehe Kapitel 6).

#### 4.4 RISIKO FÜR PRINZIPIELL UNVERMEIDLICHE EREIGNISSE

Bereits die Lagerung der radioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Formationen reduziert das mit ihnen verbundene Risiko. Standortauswahl für das Endlager und Anlagenauslegung müssen so erfolgen, dass auch das durch unvermeidliche und extrem seltene Entwicklungen verursachte Risiko minimiert wird. Manche dieser Entwicklungen (z.

B. mit einem Meteoriteneinschlag verbundene Entwicklungen) würden bei vielen anderen Wegen der Entsorgung von radioaktiven Stoffen zu höherer Freisetzung und damit zu höherer Strahlenexposition führen. Einige haben außerdem unmittelbare Auswirkungen auf Mensch und Umwelt, die über die radiologischen Folgen wahrscheinlich weit hinausgehen. Für diese Entwicklungen kann kein Risikoniveau, das für die Bewertung ihrer Auswirkungen herangezogen werden kann, festgelegt werden.

Andere Entwicklungen stehen mit dem unbeabsichtigten Eindringen in das Endlager durch Menschen in Zusammenhang. Sie sind im Rahmen des Sicherheitsnachweises darzustellen und zu beurteilen. Es macht jedoch keinen Sinn, für die Bewertung der daraus resultierenden Auswirkungen Risikoziele festzulegen, da über den Ablauf der damit verbundenen Szenarien nahezu beliebige Annahmen getroffen werden können. Berechnungen zu Konsequenzen solcher Szenarien stellen daher keine sinnvollen Entscheidungsgrundlagen für die Suche nach einem bestmöglichen Endlager dar.

#### 4.5 REGULATORISCHE VORGABEN

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  $\mu$ Sv pro Jahr und für weniger wahrscheinliche Szenarien (Eintrittswahrscheinlichkeit kleiner 0,1) einen Dosisrichtwert von 1 mSv pro Jahr vor. Unter Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeit repräsentieren beide Werte gleichwertige Schutzziele. Eine zusätzliche Begrenzung der Kollektivdosis wird von SSK und RSK nicht empfohlen. Das Bundesamt für Strahlenschutz betrachtet das Vorgehen, eine mögliche Expositionsverteilung nur durch Dosisrichtwerte ohne begleitende Risiko- oder Dosisbegrenzung eingrenzen zu wollen, als nicht hinreichend.

Auch sind die von SSK und RSK vorgeschlagenen Werte eher auf den Nachweis der Sicherheit für einen schon ausgewählten Endlagerstandort und eine bestimmte Endlagerplanung ausgerichtet. Das BfS schlägt vor, einen sehr viel strengeren Maßstab

für die Beurteilung der erwarteten Entwicklungen eines Endlagers anzulegen als für außergewöhnliche Entwicklungen( siehe Tabelle 3). Dieser Vorschlag ist darauf ausgerichtet, ein Endlager zu finden, das die radioaktiven Abfälle möglichst gut (nahezu vollständig) isoliert. Die Entscheidungen über den Endlagerstandort und die Endlagerplanung sollen im Wesentlichen auf der Basis einer Risikobeurteilung für die erwarteten Entwicklungen und weniger durch die außergewöhnlichen Entwicklungen bestimmt werden.

In dem sich an die Standortsuche und Endlagerplanung anschließenden Genehmigungsverfahren für das Endlager muss gezeigt werden, dass mit der Wahl der jeweils

bestmöglichen Alternative dem Minimierungsgebot des Strahlenschutzes entsprochen wurde. Bei der Bewertung der Alternativen müssen sowohl die Medianwerte für die vom Endlager ausgehenden Risiken als auch obere Werte der Risikoverteilung berücksichtigt werden. Die konkrete Verfahrensweise zur Berechnung und Bewertung der Risiken muss in entsprechenden Sicherheitskriterien für die Endlagerung ausgeführt werden. Im Genehmigungsverfahren soll vor allem der Prozess zur Minimierung der Risiken und nicht nur die Einhaltung von Risikogrenzwerten oder Dosisgrenzwerten geprüft werden. Dies bedeutet eine deutliche Veränderung gegenüber der bisherigen Vorgehensweise.

Sicherheitsebene	Risikoziel <sup>a</sup>	Eintrittswahrscheinlichkeit	Strahlenrisiko <sup>b</sup>
zu erwartende Entwicklungen	unerheblich: <1:1.000.000	≈1	unerheblich: < 1:1.000.000 abgeleitete effektive Dosis: < 1 µSv pro Jahr
außergewöhnliche Entwicklungen	tolerierbar: <1:100.000	< 0,1 für die Summe voneinander unabhängiger Entwicklungen	tolerierbar: < 1:10.000 abgeleitete effektive Dosis <sup>c</sup> : < 100 µSv pro Jahr
unvermeidbare Entwicklungen	so gering wie möglich	unbestimmt	kein Wert

<sup>a</sup> unbedingtes oder Gesamtrisiko

<sup>b</sup> bedingtes oder potentielles Risiko

<sup>c</sup> Umrechnung des Strahlenrisikos in eine effektive Dosis nach heutigem Kenntnisstand

Tabelle 3: Risikoziele und Strahlenrisiken

## 5 SCHUTZ VOR CHEMOTOXISCHEN STOFFEN

Neben den möglichen radiologischen Auswirkungen eines Endlagers müssen auch weitere Einflüsse auf Mensch und Umwelt berücksichtigt werden. Hier ist insbesondere das Schutzgut Wasser von Bedeutung. Aus Gründen des Umweltschutzes ist das Wasser, 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) und 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. Blei, Cadmium oder bestimmte organische Verbindungen.

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 das Sicherheitsziel verfolgt werden, dass chemotoxische Stoffe höchstens unerhebliche bzw. tolerierbare Risiken verursachen, und dass das Schutzziel des Wasserrechts eingehalten wird.

Das derzeit akzeptierbare Risikoniveau ergibt sich aus dem Schutzziel des Wasserrechts. Hiernach 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 besorgen ist.

Durch die Sicherheitsziele für die drei Sicherheitsebenen des verschlossenen Endlagers wird erreicht, dass die in den Abfällen enthaltenen Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich mit hoher Zuverlässigkeit isoliert sind. Die Rückhaltung durch geologische und geotechnische Barrieren sowie geochemische Immobilisierungs- und Rückhalteprozesse sorgen dafür, dass die Schadstoffe für die zu erwartenden Entwicklungen des Endlagers in der direkten Umgebung des Einlagerungsbereichs im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bleiben. 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.

Im Hinblick auf den Schutz des Grundwassers ergibt sich somit, dass seine mögliche Verschmutzung oder die schädliche Veränderung seiner physikalischen, chemischen oder biologischen Beschaffenheit durch die Isolation der Schadstoffe im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vermieden bzw. auf das tolerierbare Maß begrenzt wird. Damit sind nicht tolerierbare chemotoxische Auswirkungen auf Mensch und Umwelt nicht zu befürchten.

## 6 SICHERHEIT DES ENDLAGERS

### 6.1 ZUVERLÄSSIGKEIT DER SICHERHEITSSYSTEME

#### Betriebsphase

Das Endlager unterliegt während der Betriebsphase - und für bestimmte Teile auch in der Errichtungsphase - als kerntechnische Anlage dem kerntechnischen und sonstigen Regelwerk in sinngemäßer Anwendung. Damit sind alle einschlägigen Anforderungen wie z. B. an die Zuverlässigkeit der Systeme, die Sicherheit des Betriebes, die Fachkunde des Personals und die Qualitätssicherung 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 dahin 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 sichergestellt 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 ein umsetzbares und geprüftes Verschlusskonzept vorliegen. Dieses muss entsprechend dem sich weiterentwickelnden Stand von Wissenschaft und Technik im Rahmen der Sicherheitsüberprüfungen aktualisiert werden. Es muss dafür gesorgt sein, dass die finanziellen und technischen Gegebenheiten eine rasche 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. Durch ein robustes System mehrerer Barrieren soll selbst für den Fall, dass einzelne Barrieren nicht ihre volle Funktion erfüllen, die Sicherheit des Gesamtsystems erhalten bleiben. Die langfristigen Sicherheitsfunktionen müssen dabei durch die geologischen und geotechnischen Barrieren erfüllt werden.

Durch eine auf die Sicherheit des Endlagers abgestellte kriteriengesteuerte Standortauswahl muss sichergestellt werden, dass eine gut charakterisierbare günstige geologische Gesamtsituation mit einem definierten einschlusswirksamen Gebirgsbereich ausgewählt wird, deren Entwicklung über einen Zeitraum von etwa einer Million Jahre möglichst zuverlässig prognostiziert werden kann. Dies setzt 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 eine hohe Rückhaltewirkung für Schadstoffe aufweisen. 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. Bei den technischen Barrieren dürfen nur solche Materialien bzw. Konstruktionen zum Einsatz kommen, deren Eigenschaften gut bekannt sind bzw. deren Funktionen erprobt sind.

Die Übermittlung der Informationen (für zumindest einige Jahrhunderte) über das Endlager und sein Gefährdungspotenzial an zukünftige 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 in das Endlager vermieden werden. Weiterhin kann das von einem unbeabsichtigten menschlichen Eindringen in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich des Endlagers ausgehende Risiko durch die Wahl eines Standortes ohne wirtschaftlich bedeutende Ressourcen und durch die Auslegung des Endlagers verringert werden.

## 6.2 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 und Untersuchungen zu Einwirkung von Dritten.

### Phase nach Verschluss des Endlagers

Der Nachweis der Langzeitsicherheit des Endlagers kann nur mit Hilfe von Modellen erfolgen, welche 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.

Dazu werden die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik zu betrachtenden Entwicklungen des Endlagersystems 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 Bergbaus sowie Wärme- und Gasentwicklung der Abfälle) verursacht werden. Die Szenarien müssen alle in den Grenzen praktischer Vernunft denkbaren Entwicklungen erfassen (Szenarienanalyse). Sie werden anschließend entsprechend ihrer Charakteristik den Sicherheitsebenen (siehe Abbildung 5, Anhang 1) zugeordnet. Ihre Auswirkungen werden mit Hilfe standortspezifischer Sicherheitsanalysen (Konsequenzenanalyse) ermittelt, die sich auf gut verstandene und wirksame Prozesse abstützen. Die Ergebnisse werden mit den Sicherheitszielen der jeweiligen Sicherheitsebene verglichen und hinsichtlich Einhaltung dieser 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 Barriersystem 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). 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 (unzulässige konsequenzüberschätzenden Anhäufung).

Die Robustheit des Endlagers muss aufgezeigt werden. Robustheit bedeutet, dass kleine

Änderungen des Endlagersystems zu keinen großen Änderungen der Sicherheit führen. Neben den Sicherheitsanalysen, die quantitative Aussagen zum Risiko liefern, sollen deshalb weitere Sicherheitsindikatoren bewertet werden, um die Einhaltung der Sicherheitsziele zu belegen. Es muss dargelegt werden, dass offene Sachverhalte, welche die Sicherheit grundsätzlich in Frage stellen könnten, nicht mehr bestehen. Unsicherheiten bei der Bewertung müssen aufgezeigt werden. Deshalb muss die Unempfindlichkeit des Endlagers gegenüber Veränderungen der Systemeigenschaften und die Robustheit gegen Fehler gezeigt werden.

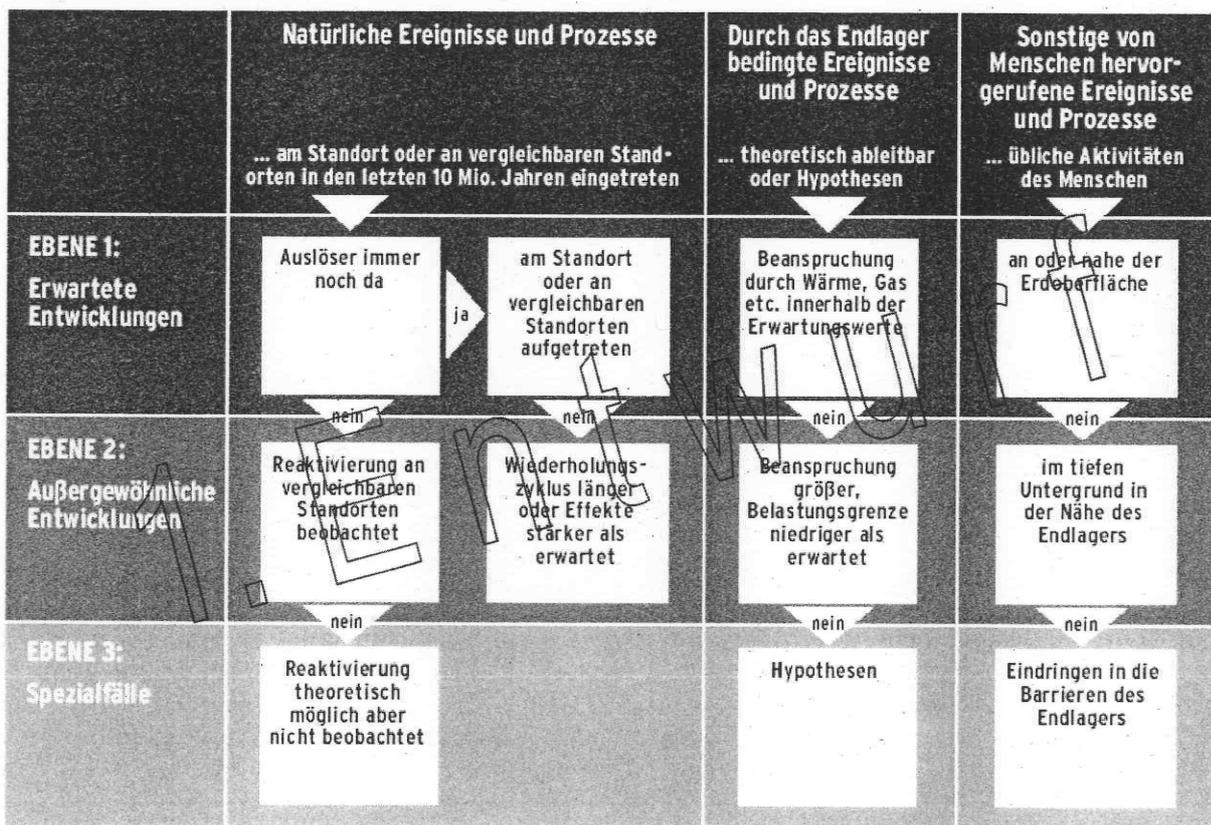


Abbildung 5: Zuordnung von Ereignissen und Prozessen

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 ( $\approx 50$  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 ( $\approx 500$  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. Sr-90, Cs-137).

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

Die Lagerorte der Abfälle im Endlager sollten bekannt bleiben und die Abfallgebinde sollten 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 die Rückholung der Abfälle nicht gezielt vorgesehen wird.

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

Das Aktivitätsinventar des Endlagers ist immer noch so hoch, dass es eine Gefährdung für Mensch und Umwelt darstellt. Die Auswirkung 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 Lebensbedingungen für Menschen, Fauna und Flora erhalten bleiben.

Ein strenger Nachweis der Funktionstüchtigkeit geotechnischer 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.

Berechnungen zu Risiken für Mensch und Umwelt, die sich aus einer Freisetzung von Schadstoffen ergeben, müssen auf der Basis eines idealisierten Berechnungsmodells für die Akkumulation 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 und seine Bedürfnisse nicht geändert haben, aus der Konzentration von Schadstoffen in Boden, Wasser und Luft ein zu erwartendes Risiko für den Menschen berechnen können. Es soll nicht auf extremen Annahmen zu Lebensgewohnheiten zukünftiger Menschen und Verdünnung der Schadstoffe im Grundwasser basieren.

- 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. Dennoch muss qualitativ gezeigt werden, dass keine Anzeichen für eine abrupte sicherheitsrelevante Veränderung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs vorliegen.

## 7 KURZFASSUNG

Den heutigen Generationen fällt mit der Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung und der damit verbundenen Produktion radioaktiver Abfälle die Verpflichtung zu, eine auch dem Schutzbedürfnis zukünftiger Generationen gerecht werdende Lösung für die Entsorgung der Abfälle zu finden und zu realisieren. Dieses Schutzbedürfnis zukünftiger Generationen ist nicht bekannt. Daraus erwächst die Verpflichtung, die auf der Basis der heutigen wissenschaftlichen, technischen, gesellschaftlichen, sozialen und finanziellen Bedingungen bestmögliche Lösung umzusetzen.

Von den heute vorstellbaren Lösungen zur Entsorgung der jetzt existierenden und noch bis zum Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung anfallenden radioaktiver Abfälle ist die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen die bestmögliche. Um ihrer Verantwortung gerecht zu werden, müssen die heutigen Generationen zügig nach dem bestmöglichen Endlagerstandort suchen und die dafür optimale Anlagenauslegung entwickeln. Der zentrale Gesichtspunkt hierbei muss der Schutz von Mensch und Umwelt vor schädlichen Wirkungen der im Endlager gelagerten Schadstoffe sein. Die Kriterien für die Auswahl eines Endlagerstandortes und die Sicherheitskriterien für die Endlagerung müssen hierauf ausgerichtet sein. Die Sicherheitsphilosophie bildet hierfür das naturwissenschaftliche und ethische Dach.

**Es muss eine gesellschaftliche Einigung über die erforderliche Sicherheit für ein Endlager erzielt werden**

Wegen des lange anhaltenden Gefährdungspotentials und der weder vorgesehenen noch gewünschten Eingriffsmöglichkeiten des Menschen kommt der Sicherheit nach Verschluss des Endlagers (Langzeitsicherheit) besondere Bedeutung zu. Dazu muss auf der Grundlage neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse eine Einigung darüber erzielt werden, welche Anforderungen an die Sicherheit des Endlagers gestellt und welche Entscheidungsgrundlagen bei der Suche nach dem Endlagerstandort zum Tragen kommen sollen. Es

steht fest, dass hundertprozentige Sicherheit weder für die Endlagerung noch für irgendeine andere Entsorgungsoption erreicht werden kann. Die Sicherheitsanforderungen müssen daher aus dem von der Gesellschaft als tolerierbar angesehenen Risiko abgeleitet werden. Die Schwierigkeit dabei ist, subjektive und objektive Risikoeinschätzungen in Übereinstimmung zu bringen. Eine Einigung darüber erfordert die Beteiligung der Öffentlichkeit und deshalb einen intensiven Diskurs sowohl mit Fachleuten über die wissenschaftlichen Grundlagen als auch mit den Bürgerinnen und Bürgern in Deutschland über ihre Vorstellungen zur Sicherheit eines Endlagers. Wenngleich das Ergebnis eines solchen Diskurses naturgemäß nicht alle zufrieden stellen kann, bietet es die Chance, zu einer gesellschaftlichen Verständigung über die Anforderungen an die Sicherheit eines Endlagers zu kommen.

### **Sicherheitsgerichtete Entscheidungen sind leitend**

Bei der sicherheitsgerichteten Suche nach dem bestmöglichen Endlager müssen entscheidungsorientierte Bewertungsmaßstäbe zur Sicherheit eines Endlagers angewendet werden. Anders als bei anderen kerntechnischen Anlagen und den bisherigen Endlagerprojekten darf das Sicherheitsverständnis nicht ausschließlich auf den Nachweis ausgerichtet sein, dass an dem ausgewählten Standort die regulatorischen Anforderungen (z. B. aus der Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) eingehalten werden. Vielmehr müssen die sicherheitsgerichtete Entscheidungsfindung und die Begründung des Ergebnisses im Mittelpunkt stehen. Hierzu müssen Sicherheitsziele festgelegt und bei der Standortauswahl sowie der nachfolgenden Endlagerplanung eingesetzt werden. Nicht das Tolerierbare, sondern das vor dem ethischen Hintergrund der heutigen Gesellschaft Gebotene muss der Maßstab sein.

Für drei Sicherheitsebenen werden Risiko- und Sicherheitsziele festgelegt

Durch die Wahl der jeweils bestmöglichen Alternative bei der Standortauswahl und der Endlagerplanung muss nachvollziehbar gezeigt werden, dass dem Minimierungsgebot des Strahlenschutzes entsprochen wurde. Ausschlaggebend für das Ergebnis der Alternativenprüfung und für nachfolgende Entscheidungen müssen die zu erwartenden Entwicklungen eines Endlagers sein. Durch die Bewertung von außergewöhnlichen Entwicklungen wird zusätzlich abgesichert, dass das Endlager robust und die Sicherheit mit hoher Zuverlässigkeit gegeben ist.

In der Vergangenheit wurden keine klaren Zielvorgaben und Anforderungen für ein zuverlässig funktionierendes Endlager aufgestellt. Vielmehr waren extreme Entwicklungen eines Endlagers, die zur Schwächung oder zum Versagen von Barrieren des Endlagers führen, Grundlage von Sicherheitsbewertungen.

Für die Suche nach dem bestmöglichen Endlager müssen die Sicherheitsziele aber auch auf das funktionierende Endlager ausgerichtet sein. Darauf aufbauend ist zusätzlich zu beurteilen, welche Auswirkungen vom Endlager ausgehen, wenn eine andere als die erwartete Entwicklung eintritt. Aus diesen Gründen werden für die Suche nach dem bestmöglichen Endlagerstandort und damit für die Bewertung der Langzeitsicherheit verschiedener Alternativen die nachfolgenden drei Sicherheitsebenen definiert. Die Einhaltung der zugehörigen Sicherheitsziele ist Voraussetzung für den umfassenden und dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor den von einem Endlager möglicherweise ausgehenden Risiken.

Die **erste Sicherheitsebene** ist auf die zu erwartenden Entwicklungen des Endlagers ausgerichtet. Sicherheitsziel ist der vollständige und zuverlässige Einschluss der Schadstoffe im Endlager über etwa eine Million Jahre. Der Einschluss muss so gut sein, dass das vom Endlager ausgehende Risiko für Mensch und Umwelt unerheblich ist. Dieses Sicherheitsziel muss vorrangig für die Suche nach dem bestmöglichen Endlager sein und ist damit entscheidungsleitend.

In der **zweiten Sicherheitsebene** wird als Sicherheitsziel gefordert, dass das vom Endlager ausgehende Risiko selbst bei Eintritt außergewöhnlicher Entwicklungen (Eintrittswahrscheinlichkeit  $< 0,1$ ) tolerierbar bleibt. Als tolerierbar wird ein Risiko angesehen, das maximal um den Faktor 100 höher als bei den zu erwartenden Entwicklungen sein darf. Die geringe Eintrittswahrscheinlichkeit der außergewöhnlichen Entwicklungen sind in diesem Faktor berücksichtigt. An die Einordnung von Entwicklungen in die Kategorie der außergewöhnlichen Entwicklungen und ihre Bewertung sind strenge Maßstäbe anzusetzen.

In der **dritten Sicherheitsebene** müssen die Eintrittswahrscheinlichkeiten und die Auswirkungen solcher Entwicklungen bewertet und soweit wie sinnvoll möglich reduziert werden, die als unvermeidbare Risiken hingenommen werden müssen. Eine Risikobegrenzung kann für solche Entwicklungen nicht sinnvoll formuliert werden.

**Maßstab ist das individuelle Strahlenrisiko**

Als Bewertungsmaßstab für den Schutz der Bevölkerung wird das individuelle Strahlenrisiko gewählt. Darauf beruhende Risikoziele für das Endlager können im Gegensatz zu Dosisgrenzwerten weitgehend unabhängig vom wissenschaftlichen Kenntnisstand zur Strahlenwirkungsbeziehung abgeleitet werden.

Als Strahlenrisiko wird das Verhältnis aus der Anzahl derjenigen Personen einer Gruppe, die einen schweren gesundheitlichen Schaden innerhalb ihrer Lebenszeit erleiden, zur Gesamtanzahl der Personen dieser Gruppe bezeichnet, wenn die gesamte Gruppe lebenslang einer Strahlenexposition ausgesetzt war. Als unerheblich ist nach heutigen Maßstäben ein Strahlenrisiko zwischen 1:1.000.000 und 1:100.000 zu bezeichnen. Auf der Basis des heutigen Wissens zur Dosis-Risiko-Beziehung führt eine effektive Dosis von 1 µSv pro Jahr und den heute üblichen Modelle zur Berechnung der Strahlenexposition zu einem Strahlenrisiko von etwa 1:1.000.000. Bei der Bewertung eines Strahlenrisikos ist immer eine statistische Verteilung von Risikowerten zu

berücksichtigen und anzugeben, wie viel Prozent (Perzentile) der berechneten Werte unterhalb einer Risikoschwelle liegen.

In dem an Standortauswahl und Endlagerplanung anschließenden Genehmigungsverfahren muss gezeigt werden, dass damit dem Minimierungsgebot des Strahlenschutzes entsprochen wurde. Dabei müssen bei der Bewertung der Alternativen sowohl die Medianwerte für die Strahlenrisiken als auch obere Werte der Risikoverteilungen berücksichtigt worden sein. Die konkrete Verfahrensweise zur Berechnung und Bewertung der Risiken muss in Sicherheitskriterien für die Endlagerung ausgeführt werden.

1. Entwurf

Sicherheitsebene	Risikoziel <sup>a</sup>	Eintrittswahrscheinlichkeit	Strahlenrisiko <sup>b</sup>
zu erwartende Entwicklungen	unerheblich: <1:1.000.000	≈1	unerheblich: < 1:1.000.000  abgeleitete effektive Dosis <sup>c</sup> : < 1 µSv pro Jahr
außergewöhnliche Entwicklungen	tolerierbar: <1:100.000	< 0,1  für die Summe voneinander unabhängiger Entwicklungen	tolerierbar: < 1:10.000  abgeleitete effektive Dosis <sup>c</sup> : < 100 µSv pro Jahr
unvermeidbare Entwicklungen	so gering wie möglich	unbestimmt	kein Wert

<sup>a</sup> unbedingtes oder Gesamtrisiko

<sup>b</sup> bedingtes oder potentielles Risiko

<sup>c</sup> Umrechnung des Strahlenrisikos in eine effektive Dosis nach heutigen Kenntnisstand

Tabelle 4: Risikoziele und Strahlenrisiken

## Sicherheit in der Betriebsphase des Endlagers

Für die heute lebenden Generationen steht neben der Langzeitsicherheit das mit dem Endlagerbetrieb verbundene Risiko im Vordergrund. Der Transport der radioaktiven Abfälle zum Endlager, ihre Handhabung und Lagerung in den oberirdischen und untertägigen Anlagenteilen, die Schutzmaßnahmen gegen Einwirkungen Dritter und die Verbreitung stark radioaktiv strahlender Materialien sowie zum Bau von Atomwaffen geeigneter spaltbarer Stoffe müssen in einem gesellschaftlichen Diskurs aufgegriffen werden. Daran sollten sich insbesondere die möglicherweise durch den Betrieb eines Endlagers betroffenen Bürgerinnen und Bürger beteiligen. Grundlage dieses Diskurses müssen das Sicherheitsverständnis, die technischen Möglichkeiten sowie gesellschaftlichen Verhältnisse sein, die dann vorliegen, wenn sich im Standortauswahlverfahren der bestmögliche Standort abzeichnet.

### Beteiligung der Bevölkerung

An der Auswahl eines Endlagerstandortes und dem damit verbundenen Entscheidungsprozess ist die Bevölkerung zu beteiligen. Im Hinblick auf die Langzeitsicherheit müssen dabei die heutigen Generationen stellvertretend für zukünftige Generationen diskutieren und handeln.

Diese Diskussion möchte das Bundesamt für Strahlenschutz mit seinem Vorschlag zu einer Sicherheitsphilosophie zur Endlagerung anstoßen und aktiv mitgestalten.

## ANHANG 1

### Zuordnung von Entwicklungen des Endlagers zu den drei Sicherheitsebenen mit Hilfe von Szenarien

#### Vorbemerkung

Das BfS schlägt in seinen Grundsätzen für die sichere und nachhaltige Endlagerung radioaktiver Abfälle eine Zuordnung von Szenarien zu den drei Sicherheitsebenen für das verschlossene Endlager vor. Bei der Zuordnung 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.

#### Definitionen

- Ein Szenarium 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, and processes) 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 die Freisetzung bzw. den Transport von

Schadstoffen aus dem Endlager von Bedeutung ist (z.B. wasserführende Kluft).

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.

#### Einordnung von Szenarien in die drei Sicherheitsebenen

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.

Die Szenarien werden in die drei Sicherheitsebenen für die Phase nach Verschluss des Endlagers eingeordnet. Die Sicherheitsebenen sind dadurch charakterisiert, dass der Sicherheitsebene 1 **zu erwartende Entwicklungen** des Endlagersystems, der Sicherheitsebene 2 **außergewöhnliche Entwicklungen** und der Sicherheitsebene 3 **unvermeidbare Entwicklungen** zugeordnet sind.

Für die Zuordnung der Szenarien zu den drei Sicherheitsebenen werden innerhalb jedes betrachteten Szenariums diejenigen FEP herangezogen, die für die qualitative Unterscheidung der Szenarien maßgeblich sind. Maßgeblich für die Zuordnung zu den verschiedenen Sicherheitsebenen 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 Mio. Jahre 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 sind der Klasse der erwarteten FEP zuzuordnen (z.B. wasserführende Kluft 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), ist das feature der Klasse der außergewöhnlichen FEP zuzuordnen. Obgleich z. B. geologischen features in der Regel keine streng abgeleiteten Zahlen für die Eintrittswahrscheinlichkeiten zugeordnet werden können, sind damit Eintrittswahrscheinlichkeiten von 0,1 und kleiner gemeint. Dies muss, wenn keine harten 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 soll 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 Mio. Jahre zurück).
- Ereignisse und Prozesse, die in den letzten 1 Million Jahren aufgetreten sind, rezent andauern oder / und über ein großes Wiederholungspotential für die kommenden 1 Mio. Jahre verfügen, sind der Klasse der erwarteten FEP zuzuordnen (z.B.

Inlandsvereisung, Permafrost (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 der Klasse der außergewöhnlichen FEP zugeordnet. 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, ist das FEP der Klasse der außergewöhnlichen Entwicklungen zuzuordnen (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 der Klasse der Spezialfälle zugeordnet (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, sind die daraus abgeleiteten Ereignisse und Prozesse den zu erwartenden FEP zuzuordnen.
- Werden in den Modellvorstellungen und Berechnungen Daten verwendet, die außerhalb der durch Erfahrungswerte abgestützten Schwankungsbreite liegen, sind die daraus abgeleiteten Ereignisse und Prozesse den außergewöhnlichen FEP zuzuordnen. Hierunter fallen z. B. Ereignisse und Prozesse, die nur zustande kommen können, wenn beispielsweise ungewöhnlich hohe Gasbildungsrate 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 der Klasse der Spezialfälle zugeordnet 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, sind der Klasse der erwarteten FEP zuzuordnen (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, sind

der Klasse der außergewöhnlichen FEP zuzuordnen.

- Ereignisse und Prozesse, die durch ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Endlager verursacht werden, werden der Klasse der Spezialfälle zugeordnet.

#### Schema zur Einordnung eines Szenariums

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

- Das Szenarium wird der Sicherheitsebene 3 unvermeidbare Entwicklungen zugeordnet, wenn mindestens ein das Szenarium definierendes FEP einen Spezialfall charakterisiert.
- Das Szenarium wird der Sicherheitsebene 2 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. In Einzelfallbetrachtungen ist aber zu prüfen, ob nicht einzelne außergewöhnliche Entwicklungen wie zu erwartende Entwicklungen zu bewerten sind.
- Das Szenarium wird der Sicherheitsebene 1 zu erwartende Entwicklungen zugeordnet, wenn alle das Szenarium definierenden FEP erwartet werden müssen.

## ANHANG 2

### Risikostandards

Das BfS empfiehlt, als primären Standard zur Beurteilung der Sicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle eine Begrenzung des Risikos negativer Gesundheitseffekte für potentiell exponierte Personen festzulegen. Dieser Risikostandard bezieht sich auf Einzelpersonen, die während der gesamten Lebenszeit exponiert waren. In diesem Zusammenhang ist das Risiko die Wahrscheinlichkeit, im Verlauf des Lebens einen negativen Gesundheitseffekt zu erleiden, der durch Strahlenbelastungen aus einem verschlossenen Endlager verursacht worden ist. Von der Verwendung eines jährlichen Risikos, wie es sonst oft im Strahlenschutz durchgeführt wird, wird hier wegen der speziellen Expositionssituation durch ein verschlossenes Endlager, abgesehen. Kommt es zu Emissionen aus einem verschlossenen Endlager, so muss davon ausgegangen werden, dass diese Emissionen zeitlich andauernd sind und zu Expositionen führen, die in aller Regel ein Leben lang anhalten.

Die Empfehlung des BfS, als primären Standard eine individuelle Risikobegrenzung festzulegen, begründet sich wie folgt:

- Ein risikobasierter Standard muss im Gegensatz zu Konzentrations- und/oder Expositionsstandards in aller Regel nicht an neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu Dosis-Wirkungs-Beziehungen angepasst werden, wie es wiederholt in der Vergangenheit für Dosisstandards notwendig war. Auch zukünftig sind Anpassungen von Dosisstandards aufgrund neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse absehbar.
- Risiken für die menschliche Gesundheit und die Umwelt resultierend aus Emissionen unterschiedlicher Art sowohl durch Strahlung als auch durch toxische Chemikalien können auf der Ebene von Risiken vergleichbar und damit verständlich gemacht werden. So kann es gelingen, potentielle Risiken durch Radionuklide und toxische Chemikalien aus einem Endlager für radioaktive Abfälle in einem vergleichbaren Bewertungsrahmen zu betrachten und vergleichend Risiken durch andere technische Anlagen oder Deponien für toxische Chemikalien zu betrachten.

Aus den primären Risikostandards werden auf der Basis des etablierten Wissens zur Dosis-Wirkungs-Beziehung, zu Expositionspfaden und zu Freisetzungswegen aus einem Endlager Dosisgrenzwerte und Konzentrationsgrenzwerte als sekundäre Standards abgeleitet.

In der internationalen Diskussion über akzeptable Risikoniveaus durch Immissionen aus Umweltmedien auf den Menschen, die auf Emissionen durch menschliche Tätigkeiten zurückführbar sind, fokussiert sich die Diskussion auf ein akzeptables Risiko von einer schwerwiegenden Erkrankung pro Hunderttausend bis eine Million lebenslang exponierter Personen (1 in 100.000 bis 1 in 1.000.000).

Auf der Basis des derzeitigen Wissens kann der Risikokoeffizient für strahlenverursachte schwerwiegende Erkrankungen nach akuter Strahleneinwirkung unter Berücksichtigung einer linearen Dosis-Wirkungs-Beziehung ohne Schwellendosis mit 12% pro Sievert angegeben werden (d.h. das zusätzliche absolute Strahlenrisiko beträgt 12 schwerwiegende Erkrankungen unter 100 Personen, die mit 1 Sievert exponiert worden waren). Die Unsicherheiten in diesem Wert betragen etwa einen Faktor 2. Eine wesentliche weitere Unsicherheit stellt die von der ICRP (als DDREF bezeichnete) vorgenommene Reduktion des Risikokoeffizienten um den Faktor 2 für die Übertragung von Beobachtungsdaten aus akuten Expositionen auf chronische Expositionen dar, die im Strahlenschutz Grundlage der Risikoabschätzung im Bereich kleiner Dosen und chronischer Expositionen ist. Nach Auffassung des BfS ist dieser Reduktionsfaktor durch epidemiologische Beobachtungsstudien an exponierten menschlichen Populationen nicht belegt.

Aus einem Risikostandard (R) von 1 in 1.000.000 kann ein Dosisgrenzwert wie folgt abgeleitet werden:

- Der Risikokoeffizient (RK) für Krebserkrankungen in der Gesamtbevölkerung beträgt nach ICRP (1990)  $6 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ .
- Die Eintrittswahrscheinlichkeit für eine Freisetzung aus einem verschlossenen Endlager durch erwartete Entwicklungen ist gleich eins.
- Kommt es zu Freisetzungen aus einem verschlossenen Endlager ist von lang andauernden Expositionen, d.h. in der Regel lebenslangen Expositionen, auszugehen. Es wird eine Lebenszeit (LZ) von 70 Jahren angenommen.

- Mit einem stark simplifizierten Risikomodell unter der Annahme der Linearität der Dosiswirkungsbeziehung und der Konstanz des Risikos über die Lebenszeit erhält man für die zulässige jährliche Dosis D

$$D = R / (RK \times LZ),$$

aus der sich mit den genannten Werten ein jährlicher Dosisgrenzwert in der Größenordnung von 1  $\mu$ Sv ableiten lässt.

ige Eintrittswahrscheinlichkeit oder kleiner) folgt aus der Risikobegrenzung für das Gesamtrisiko auf einen Wert von 1 in 100.000 eine Risikobegrenzung auf einen Wert von 1 in 10.000. Ein Strahlenrisiko von 1 in 10.000 entspricht nach heutigem Kenntnisstand einer jährlichen Dosis von etwa 100  $\mu$ Sv. Unter den genannten Randbedingungen kann dieser Risikobereich als tolerabel bezeichnet werden.

#### Anmerkungen

Diese Berechnungen sind stark simplifiziert, geben aber die jährliche Dosis, die ursächlich für eine schwerwiegende Erkrankung verantwortlich gemacht werden kann, in der richtigen Größenordnung an. Es sei darauf hingewiesen, dass dieser Dosis entsprechende Aktivitätskonzentrationen in den einzelnen Umweltmedien (Wasser, Boden, Luft) für die meisten Radionuklide an der derzeitigen messtechnischen Nachweisgrenze liegen.

#### Zusammenfassung

- Das BfS empfiehlt für die Standortauswahl und später auch für die Langzeitsicherheitsanalysen eines Endlagers für radioaktive Abfälle einen Risikostandard für schwerwiegende Erkrankung von 1 in 1.000.000 bis 1 in 100.000 lebenslang exponierter Personen festzulegen.

Eine (1) Erkrankung pro 1.000.000 exponierter Personen entspricht unter Verwendung eines Risikokoeffizienten von 6% pro Sievert einer jährlichen Dosis von etwa 1  $\mu$ Sv.

- Es wird als Risikoziel (Medianwert) für die Entwicklung eines Endlagers für radioaktive Abfälle der Risikowert von 1 in 1.000.000 vorgeschlagen, der als unerheblich charakterisiert werden kann, als Risikobegrenzung (90-Perzentilwert) der Wert von 1 in 100.000.

Für außergewöhnliche Entwicklungen wird ein Risikowert von 1 in 100.000, der dem oben definierten Wert für eine Risikobegrenzung entspricht, vorgeschlagen.

- Für das potentielle Strahlenrisiko bei einer außergewöhnlichen Entwicklung, d.h. das Gesundheitsrisiko im Fall der Freisetzung (10%-

## ANHANG 3

### Neugestaltung des Endlagerkonzepts

Die Arbeiten des Bundesumweltministeriums zur Neugestaltung des Endlagerkonzepts basieren auf der Koalitionsvereinbarung von 1998 und 2002 zwischen SPD und Bündnis 90/Die Grünen und der Vereinbarung zwischen Bundesregierung und Elektrizitätsversorgungsunternehmen vom 11. Juni 2001 sowie dem Entschließungsantrag 14/7840 des Bundestages zum Gesetz zur geordneten Beendigung der Kernenergienutzung zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität vom 14.12.2001. Die Arbeiten lassen sich in folgende Themen untergliedern:

- Erarbeitung eines nationalen Entsorgungsplanes, in dem die vorhandenen und zukünftig anfallenden Abfallmengen abgeschätzt und Entsorgungsoptionen bewertet werden
- Wirtsgesteins- und standortübergreifende Klärung sicherheitstechnischer und konzeptioneller Einzelfragen zur Endlagerung
- Weiterentwicklung der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle
- Schaffung einer gesetzlichen Regelung, in der insbesondere die Kriterien und das Verfahren für die Auswahl eines Endlagerstandortes und die Zuständigkeiten für die Endlagerung neu geregelt werden.

Im ersten Halbjahr 2005 werden die oben erwähnten sicherheitstechnischen Einzelfragen geklärt sein. Das BfS erarbeitet eine zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse.

Im Dezember 2002 stellte die Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) in einer gemeinsamen Stellungnahme mit der Strahlenschutzkommission (SSK) fest, dass die Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk aus dem

Jahr 1983 nicht mehr dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Neue wissenschaftliche und technische Erkenntnisse müssen einbezogen werden.

Nahezu zeitgleich hat im Dezember 2002 der Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) Empfehlungen zu Kriterien und Verfahren zur Auswahl eines bestmöglichen Endlagerstandortes dem Bundesumweltministerium überreicht.

Mit dem Bericht des BfS zu "Grundsätzen für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle" wird ein gedankliches Dach für die Weiterentwicklung der Sicherheitskriterien, Bewertung der sicherheitstechnischen Einzelfragen sowie die gesetzliche Regelung für die Standortsuche aufgebaut.

Hiermit wird kein Neuland betreten. Der Wissenschaftliche Beirat für Globale Umweltveränderungen hat sich in seinem Jahresgutachten 1998 der Bewältigung globaler Umweltrisiken bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle gewidmet. Die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit hat einen Diskussionsvorschlag für die Weiterentwicklung der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle erarbeitet und darüber hinaus auch ethische Aspekte bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle thematisiert. Die Internationale Atom Energie Organisation entwickelt zur Zeit Sicherheitsanforderungen für ein Endlager in tiefen geologischen Formationen.

Die politische Zielsetzung, ein Endlager für alle Arten von radioaktiven Abfällen etwa im Jahr 2030 in Deutschland betriebsbereit zu haben, kann nur erreicht werden, wenn Klarheit über die sicherheitstechnischen und sozioökonomischen Anforderungen an ein Endlager bestehen. Darüber hinaus ist eine eindeutige Rollenverteilung, die die Zuständigkeiten der Abfallverursacher, des Endlager-Betreibers, der staatlichen Kontrolle und der Entscheidungsfindung klar voneinander trennt, für einen nachvollziehbaren Entscheidungsprozess erforderlich. Die Erfahrungen bisheriger Entscheidungsprozesse zeigen, dass zur Vermeidung von Interessenkonflikten unterschiedliche Funktionen nicht von derselben Institution wahrgenommen

werden sollten. Außerdem sollte der Fortschritt bei der Auswahl eines Endlagerstandortes nicht durch wechselnde politische Verhältnisse in den jeweiligen Legislaturperioden bei Bund und Ländern dominiert werden.

Deshalb wird die Bundesregierung in dieser Legislaturperiode dem Bundestag einen Beschlussvorschlag zu den Auswahlkriterien und dem Auswahlverfahren für den Standort eines Endlagers unterbreiten, der die Grundlage für eine sichere Entsorgung der radioaktiven Abfälle bilden soll.

# 1. Entwurf

## GLOSSAR

### Abfallgebinde

Die Einheit aus Abfallprodukt mit Verpackung und Abfallbehälter.

### AkEnd (Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte)

Vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) im Februar 1999 eingerichteter Arbeitskreis zur Entwicklung von Kriterien und Verfahren für die Auswahl eines Endlagerstandortes für alle Arten von radioaktiven Abfällen. Der AkEnd hat seine Arbeit im Dezember 2002 mit der Übergabe seiner Empfehlungen an den BMU abgeschlossen.

### Aktivität

Anzahl der pro Zeiteinheit in einem radioaktiven Stoff auftretenden Kernumwandlungen. Maßeinheit der Aktivität ist das Becquerel (Kurzzeichen: Bq), mit der die Anzahl der radioaktiven Kernumwandlungen pro Sekunde angegeben wird. Da die Radionuklide in Stoffmengen unterschiedlicher Konfiguration enthalten sein können, wird die Aktivitätsangabe auch häufig auf diese bezogen, z.B. Becquerel pro Gramm (Bq/g) in Feststoffen, Becquerel pro Liter (Bq/l) in Flüssigkeiten oder Becquerel pro Kubikmeter (Bq/m<sup>3</sup>) in Luft. Die alleinige Angabe der Aktivität ohne Kenntnis des Radionuklids lässt keine Aussage über die Strahlenexposition zu, da die Radionuklide unterschiedliche Strahlungseigenschaften aufweisen.

### Aktivitätsinventar

Die gesamte Aktivität aller Radionuklide in einer Abfallmenge.

### Anthropogen

Durch Menschen verursacht.

### Auffahrung

Der in einem Bergwerk untertage ausgebrochene Hohlraum.

### Barrieren - Geologische

Geologische Einheiten zwischen Einlagerungsbereich und Biosphäre, die eine Schadstoffausbreitung be- oder verhindern.

### Barrieren - Geotechnische

Im Bergwerk eines Endlagers nach Beendigung der Nutzung errichtete Abdichtmaßnahmen (z. B. Schachtverschluss) zur Heilung der Störung der geologischen Barrieren als Folge der Auffahrung des Endlagerbergwerks (z.B. Schacht). Besteht im Wesentlichen aus ausgesuchten und besonders qualifizierten natürlichen Materialien, die ihre Wirkung zusammen mit dem umliegenden Gebirgsbereich entfalten.

### Barrieren - technische

Abdicht- und Abschirmmaßnahmen, zur Be- oder Verhinderung der Schadstoffausbreitung, die als Fertigprodukte in einem Endlager eingesetzt werden (Behälter).

### Betriebsphase

Zeitraum, in dem radioaktive Abfälle in das Endlager eingelagert werden und in dem mit fortschreitender Einlagerung der Zustand hergestellt wird, der für das verschlossene Endlager kennzeichnend ist; endet mit dem Verschluss des Endlagers.

### Biosphäre

Gesamtheit des von Leben erfüllten Teils der Erde.

### Brennelement

Anordnung, in der eine Vielzahl von mit Kernbrennstoff gefüllten Stäben zu einer Baueinheit zusammengefasst sind und in der der Kernbrennstoff in den Kernreaktor eingesetzt wird.

### BMU

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

### Chemotoxische Stoffe

Stoffe, von denen chemische Schädwirkungen ausgehen.

### Cs-137

Radioaktives Isotop des Cäsiums.

### Diversität

In der Kerntechnik Sicherheitsprinzip, nach dem mehrere Sicherheitssysteme vorhanden sein müssen, die nach unterschiedlichen technischen bzw. physikalischen Prinzipien arbeiten.

### Dosis

Maß für eine näher anzugebende Strahlenwirkung.

### Energiedosis:

Die Energiedosis beschreibt die Energie, die einem Volumenelement beliebiger Materie mit einer bestimmten Masse durch ionisierende Strahlung zugeführt wird, dividiert durch diese Masse. Die Maßeinheit der Energiedosis ist das Gray (Kurzzeichen: Gy).

### Äquivalentdosis:

Die Äquivalentdosis berücksichtigt die unterschiedliche biologische Wirksamkeit der verschiedenen Arten ionisierender Strahlung. Die Äquivalentdosis ist das Produkt aus der Energiedosis im Gewebe und einem Bewertungsfaktor (Strahlungs-Wichtungsfaktor). Die Einheit der Äquivalentdosis ist das Sievert (Sv).

### Effektive Dosis:

Die effektive Dosis berücksichtigt die unterschiedliche Empfindlichkeit der Organe und Gewebe bezüglich der stochastischen Strahlenwirkung. Sie ist das Produkt aus der Äquivalentdosis und einem Bewertungsfaktor (Gewebe-Wichtungsfaktor). Die effektive Dosis erhält man durch Summation der gewichteten Äquivalentdosen der einzelnen bestrahlten Organe und

Gewebe. Die Wichtungsfaktoren berücksichtigen die unterschiedliche Strahlenempfindlichkeit der Organe und Gewebe. Die Einheit der effektiven Dosis ist das Sievert (Sv).

In der Praxis des Strahlenschutzes werden in der Regel Bruchteile der Doseinheit verwendet, zum Beispiel: Millisievert (1 mSv), Mikrosievert (1  $\mu$ Sv), Nanosievert (1 nSv).

### Einschlusswirksamer Gebirgsbereich

Teil der geologischen Barrieren, der bei normaler Entwicklung des Endlagers für den Isolationszeitraum - im Zusammenwirken mit technischen und geotechnischen Barrieren - den Einschluss der Abfälle sicherstellen muss.

### Emission

Freisetzung von Stoffen und Strahlung aus einer Anlage in ein Umweltmedium.

### Endlagerung

International wird unter Endlagerung die Einlagerung abgebrannter Brennelemente oder radioaktiver Abfälle in einer geeigneten Anlage verstanden, wobei eine Rückholung nicht beabsichtigt ist. In Deutschland ist dafür die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen, die eine sichere, langzeitige Isolation von Schadstoffen von der Biosphäre sicherstellen, vorgesehen.

### Halbwertszeit

Zeitintervall, in dem die Hälfte der Kerne eines radioaktiven Nuklids zerfallen ist. Kurze Halbwertszeiten führen zu einer hohen Strahlungsaktivität und lange Halbwertszeiten beinhalten eine niedrige Strahlungsaktivität. Die biologische Halbwertszeit ist die Zeit, in der ein biologisches System, beispielsweise ein Mensch oder Tier, auf natürlichem Wege die Hälfte der aufgenommenen Menge eines bestimmten Stoffes aus dem Körper oder einem speziellen Organ wieder ausscheidet. Die effektive Halbwertszeit ist die Zeit, in der in einem biologischen System die Menge eines Radionuklids auf die Hälfte abnimmt, und zwar im Zusammenwirken von radioaktivem

Zerfall und Ausscheidung infolge biologischer Prozesse.

#### ICRP

Internationale Strahlenschutzkommission. Internationales Fachgremium auf dem Gebiet des Strahlenschutzes. Die Internationale Strahlenschutzkommission besteht aus einem Vorsitzenden, zwölf weiteren Mitgliedern und dem Sekretär. Die Wahl der Mitglieder erfolgt durch die ICRP aus Nominierungen, die ihr von den nationalen Delegationen des Internationalen Kongresses für Radiologie und aus den eigenen Reihen vorgelegt werden. Die Mitglieder der ICRP werden aufgrund ihrer anerkannten Leistungen auf den Gebieten medizinische Radiologie, Strahlenschutz, Physik, medizinische Physik, Biologie, Genetik, Biochemie und Biophysik ausgewählt. Die ICRP wurde 1928 unter dem Namen „International X-ray and Radium Protection Committee“ auf Beschluss des 2. Internationalen Kongresses für Radiologie gegründet. 1950 wurde sie umstrukturiert und umbenannt. Die Kommission arbeitet eng mit der Internationalen Kommission für radiologische Einheiten und Messungen (ICRU) zusammen.

#### Immission

Das Einwirken von Luftverunreinigungen, Schadstoffen, Lärm, Strahlen u.ä. auf Menschen, Tiere und Pflanzen.

#### Ionisierende Strahlung

Jede Strahlung, die direkt oder indirekt durch Aufnahme oder Abgabe von Elektronen aus neutralen Atomen oder Molekülen elektrisch geladene atomare oder molekulare Teilchen, sog. Ionen, erzeugt und somit in der Lage ist, Ionisationsvorgänge an Atomen und Molekülen in der von ihr durchdrungenen Materie zu bewirken.

#### Alphastrahlung:

Teilchenstrahlung in Form von Kernen des Elements Helium (Alpha-Teilchen).

#### Betastrahlung:

Teilchenstrahlung in Form von Elektronen (Beta-Teilchen).

#### Gammastrahlung:

Hochenergetische, kurzwellige elektromagnetische Strahlung, die beim radioaktiven Zerfall eines Nuklids vom Atomkern ausgesendet wird. Sie tritt häufig zusammen mit der Alpha- und Betastrahlung auf.

#### Neutronenstrahlung:

Strahlung in Form elektrisch neutraler Elementarteilchen (Neutronen).

#### Röntgenstrahlung:

Hochenergetische, kurzwellige elektromagnetische Strahlung, die mit Hilfe technischer Einrichtungen (Röntgenröhre) erzeugt wird. Röntgenstrahlung und Gammastrahlung sind in ihrer grundsätzlichen physikalischen Natur identisch.

#### Isotope

Atome ein- und desselben chemischen Elements mit gleicher Anzahl von Protonen (gleiche Ordnungszahl, jedoch unterschiedliche Massenzahl) und Elektronen, jedoch unterschiedlicher Anzahl von Neutronen. Isotope weisen die gleichen chemischen, jedoch unterschiedliche kernphysikalische Eigenschaften auf.

#### Kerntechnische Anlage

Anlage mit ihrem Gelände, ihren Gebäuden und ihrer Ausrüstung, in der radioaktives Material in solchem Umfang hergestellt, verarbeitet, verwendet, gehandhabt, gelagert oder endgelagert wird, dass Sicherheitsüberlegungen erforderlich sind.

#### Kritikalität

Mit Kritikalität wird eine Änderung der Kernspaltungsrate bezeichnet. Bei einer Kritikalität von 1 wird durch eine Kernspaltung genau eine neue Kernspaltung und damit die Kettenreaktion ausgelöst. Bei einer Kritikalität kleiner 1 ist die Anordnung „unterkritisch“. Durch eine Begrenzung des Aktivitätsinventar und der Aktivitätskonzentrationen in endzulagernden

Abfallgebunden wird vermieden, dass eine Kritikalität von 1 - und damit eine Kettenreaktion - entstehen kann.

#### Landessammelstellen

Zwischenlager der Bundesländer, die für die angefallenen Abfälle aus den Bereichen Medizin, Technik und Forschung eingerichtet wurden. Landessammelstellen nehmen keine Abfälle aus dem Bereich der Energieversorgung und Wiederaufarbeitung an.

#### Langzeitsicherheitsnachweis

Nachweis, dass der sichere Verbleib der eingelagerten radioaktiven Abfälle im Endlager über den erforderlichen Zeitraum gewährleistet ist; ist im Rahmen des Genehmigungsverfahrens für ein Endlager zu erbringen

#### Np-237

Radioaktives Isotop des Neptuniums

#### Radioaktivität

Eigenschaft bestimmter Atomkerne (Radionuklide), sich ohne äußere Einwirkung in andere Atomkerne umzuwandeln und dabei ionisierende Strahlung auszusenden. Messgröße ist die »Aktivität«, d.h. die Anzahl der pro Zeiteinheit auftretenden Kernumwandlungen eines Radionuklids oder Radionuklidgemisches. Die Einheit ist das »Becquerel« (Bq), das einer Kernumwandlung pro Sekunde entspricht. Es gibt sowohl in der Natur vorkommende natürliche Radionuklide als auch durch kernphysikalische Prozesse erzeugte künstliche Radionuklide. Kennzeichnend für jedes Radionuklid ist seine Halbwertszeit.

#### Radionuklid

Instabiles Atom, das sich unter Aussendung von radioaktiver Strahlung in ein anderes Atom umwandelt.

#### Reaktor-Sicherheitskommission (RSK)

Seit 1958 bestehende Kommission, die das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit in den Angelegenheiten der Sicherheit und den damit in Zusammenhang

stehenden Angelegenheiten der Sicherung von kerntechnischen Anlagen und der Entsorgung radioaktiver Abfälle berät. Die Reaktor-Sicherheitskommission besteht in der Regel aus zwölf Mitgliedern. In ihr sollen die Fachgebiete vertreten sein, die für die sachverständige Beratung des Bundesministeriums in den genannten Angelegenheiten erforderlich sind. Die Mitgliedschaft in der Reaktor-Sicherheitskommission ist ein persönliches Ehrenamt. Die Mitglieder der Kommission sind unabhängig und nicht an Weisungen gebunden. Die Mitglieder müssen die Gewähr für eine sachverständige und objektive Beratung des Bundesministeriums bieten.

#### Redundanz

In der Kerntechnik Sicherheitsprinzip, nach dem mehrere Sicherheitssysteme vorhanden sein müssen, die nach unterschiedlichen technischen bzw. physikalischen Prinzipien arbeiten, so dass die Sicherheit selbst dann gegeben ist, wenn ein Sicherheitssystem ausfällt.

#### Risikokommission

Im Jahr 2000 vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und vom Bundesministerium für Gesundheit und soziale Sicherung eingesetzte Kommission zur Neuordnung der Verfahren und Strukturen zur Risikobewertung und Standardsetzung im gesundheitlichen Umweltschutz. Die Risikokommission bestand aus 19 Mitgliedern. In ihr waren die Fachgebiete vertreten, in denen Risikobetrachtungen im gesundheitlichen Umweltschutz eine Rolle spielen. Die Mitgliedschaft in der Risikokommission war ein persönliches Ehrenamt. Die Mitglieder der Kommission waren unabhängig und nicht an Weisungen gebunden. Die Risikokommission hat ihre Arbeit im Juni 2003 mit der Übergabe ihres Berichtes und ihrer Empfehlungen an die Bundesministerien abgeschlossen.

#### Schachtverschluss

Verfüllmaßnahmen, die die Zugänge eines Endlagerbergwerks nach Beendigung der Einlagerung so dicht abschließen, dass die geologischen Barrieren wieder nahezu die Wirksamkeit ihres ungestörten Zustands erreichen.

Der Schachtverschluss ist eine geotechnische Barriere.

#### Sicherheitsanalyse

Im Rahmen einer Sicherheitsanalyse werden mit Hilfe von Berechnungen und Untersuchungen mögliche radiologische Auswirkungen eines Endlagers in der Betriebsphase, im Normalbetrieb und bei Störfällen abgeschätzt und überprüft.

#### Sievert

SI-Einheit der Äquivalentdosis und der effektiven Dosis  $1 \text{ Sievert (Sv)} = 100 \text{ Rem}$ ,  $1 \text{ Sievert} = 1000 \text{ Millisievert (mSv)} = 1000000 \text{ Mikrosievert } (\mu\text{Sv})$ .

#### Sr-90

Radioaktives Isotop des Strontiums.

#### Strahlenexposition

Einwirkung von Strahlung auf den menschlichen Körper oder Körperteile. Ganzkörperexposition ist die Einwirkung ionisierender oder nichtionisierender Strahlung auf den ganzen Körper, Teilkörperexposition ist die Einwirkung ionisierender oder nichtionisierender Strahlung auf einzelne Organe, Gewebe oder Körperteile. Bei der äußeren Strahlenexposition durch ionisierende Strahlung wirkt die Strahlung von außen auf den Körper ein. Als innere Strahlenexposition bezeichnet man die Einwirkung der Strahlung von Radionukliden, die in den Körper mit der Atemluft (Inhalation) und mit der Nahrung (Ingestion) aufgenommen werden. Das Maß für die Strahlenexposition durch ionisierende Strahlung ist die effektive Dosis.

#### Strahlenschutzkommission (SSK)

Seit 1974 bestehende Kommission, die das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit in den Angelegenheiten des Strahlenschutzes berät. Die Strahlenschutzkommission besteht in der Regel aus 14 Mitgliedern. In ihr sollen die Fachgebiete vertreten sein, die für die sachverständige Beratung des Bundesministeriums in den Angelegenheiten des Strahlenschutzes erforderlich sind. Die Mitgliedschaft in der Strahlenschutzkommission ist ein persönliches

Ehrenamt. Die Mitglieder der Kommission sind unabhängig und nicht an Weisungen gebunden. Die Mitglieder müssen die Gewähr für eine sachverständige und objektive Beratung des Bundesministeriums bieten.

#### Subduktionszonen

Gebiete, in denen sich eine Platte der Erdkruste unter eine andere schiebt.

#### Toxizität

Giftigkeit.

#### Zwischenlagerung

Zeitlich befristete Lagerung bestrahlter Brennelemente oder radioaktiver Abfälle vor ihrer Endlagerung.

Atwurf

## **Dieser Bericht wurde erstellt von:**

**Karl Amannsberger**

**Georg Arens**

**Peter Brennecke**

**Thomas Jung**

**Gerald Kirchner**

**Hartmut Klönk**

**Jürgen Wollrath**

**unter Mitarbeit von**

**Detlef Appel (Pan-Geo, Hannover)**

**Michael Sailer (Öko-Institut, Darmstadt)**

**Volker Schäfer (kommunikation + beratung, Kassel)**

1. Entwurf