

Sicherheitsanfor-
derungen
an die Endlagerung
hochradioaktiver
Abfälle
in tiefen geologischen
Formationen
- Entwurf der GRS -



Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH

Sicherheitsanforderungen
an die Endlagerung
hochradioaktiver Abfälle
in tiefen geologischen
Formationen
- Entwurf der GRS-

B. Baltés
K.-J. Röhlig
A. Kindt

Januar 2007

Auftrags-Nr.: 854752

Anmerkung:

Dieser Bericht ist von der GRS im Auftrag des BMU im Rahmen des Vorhabens SR 2523 erstellt worden. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt werden bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

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

Kurzfassung

Der vorliegende Entwurf der „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen“ (nachfolgend kurz „Sicherheitsanforderungen“ genannt) revidiert die derzeit gültigen Sicherheitskriterien aus dem Jahre 1983. In die Revision sind die Entwicklungen des Standes von Wissenschaft und Technik und insbesondere die in jüngster Zeit vorgelegten Entwicklungen internationaler Regelwerke und Empfehlungen eingeflossen, wie die IAEA Safety Requirements WS-R-4, die ICRP-Publikation 81 sowie der „Report by the ICRP Committee 4 Task Group on Optimisation of Protection (The Optimisation of Radiological Protection – Broadening the Process –, Stand Januar 2006)“.

Der Entwurf der Sicherheitsanforderungen hat folgende Struktur:

- Sicherheitsprinzipien und Schutzziele,
- Anforderungen an das Sicherheitsmanagement,
- Anforderungen an das Sicherheitskonzept sowie
- Anforderungen an die Sicherheitsnachweise.

Die Revision erfolgte im Hinblick auf folgende Schwerpunkte:

Sicherheitsprinzipien und Schutzziele

Die Sicherheitsprinzipien und Schutzziele der Endlagerung werden entsprechend den Grundprinzipien über den Umgang mit hochradioaktiven Abfällen formuliert, wie sie im „Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung“ für den sicheren Umgang mit radioaktiven Abfällen, dem Atomgesetz (AtG) sowie den „Principles of Radioactive Waste Management“ und den Fundamental Safety Principles der IAEA niedergelegt sind.

Die Schutzziele für die Betriebsphase des Endlagers sind in den deutschen Regelwerken festgelegt. Eine Entsprechung für die Phase nach Verschluss des Endlagers fehlt. Für die Phase nach Verschluss des Endlagers wird als Schutzziel die Begrenzung des Risikos eines Individuums, eine schwerwiegende Erkrankung aus einer Exposition (z. B. Individualdosis) zu erleiden, gewählt.

- Für wahrscheinliche Entwicklungen (Szenarien) des Endlagersystems dürfen allenfalls geringfügige Mengen an Schadstoffen aus dem einschlusswirksamen

Gebirgsbereich freigesetzt werden, so dass es zu keiner nachteiligen Veränderung von Boden und Wasser und damit zu keinen relevanten Risiken für Mensch und Umwelt kommt.

- Andere Szenarien, die nicht (z. B. aufgrund ihrer extrem geringen Eintrittswahrscheinlichkeit) von der Bewertung auszuschließen sind, dürfen Freisetzungen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufweisen, die allenfalls zu einem geringfügigen zusätzlichen Risiko für Mensch und Umwelt führen.

Anforderungen an das Sicherheitsmanagement

In den vorliegenden Sicherheitsanforderungen wird ein Sicherheitsmanagement gefordert mit dem Ziel

- der Gewährleistung der Sicherheit,
- der stetigen Verbesserung der Sicherheit sowie
- der Förderung der Sicherheitskultur.

Dies erfordert von den Verfahrensbeteiligten, Antragsteller und zuständiger Behörde, die Gewährleistung einer hohen Qualität der sicherheitsrelevanten Infrastruktur, Prozesse und Tätigkeiten. In den Sicherheitsanforderungen werden die Anforderungen an den Antragsteller und die zuständige Behörde zur Erfüllung ihrer Aufgaben formuliert.

Zur stetigen Verbesserung der Sicherheit wird ein schrittweiser Optimierungsprozess unter vorgegebenen Randbedingungen („Constrained Optimisation“ gemäß ICRP 81 und IAEA (WS-R-4)) gefordert. Er erfolgt auf eine im Wesentlichen qualitative Weise unter Berücksichtigung der Schutzziele und der für ihre Einhaltung wesentlichen wissenschaftlich-technischen Grundlagen, Planungs- und Managementprinzipien wie auch anderer, z. B. sozialer und ökonomischer Faktoren. Ziel des Optimierungsprozesses ist es, eine hohe Sicherheit zu gewährleisten und Vertrauen in die Nachweise aufzubauen. Die Randbedingungen (constraints) hinsichtlich der Sicherheit in der Phase nach Verschluss des Endlagers ergeben sich aus den Schutzzielen (Begrenzung des Risikos für Mensch und Umwelt durch Begrenzung der Freisetzung von Schadstoffen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich) und den Anforderungen an das Sicherheitskonzept (insbesondere Maßgeblichkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, der die Isolation gemeinsam mit den Verschlussbauwerken über mindestens eine Million Jahre gewährleisten soll).

Anforderungen an das Sicherheitskonzept

Es wird gefordert, dass der Antragsteller zum sicheren Einschluss der hochradioaktiven Abfälle ein Sicherheitskonzept zu erarbeiten und zu realisieren hat, welches die Einhaltung der Sicherheitsprinzipien und der Schutzziele für alle Phasen der Endlagerentwicklung gewährleistet. Die Entwicklung des Sicherheitskonzeptes soll als Optimierungsprozess sowohl für die Planung und Errichtung, die Betriebsphase als auch für die Phase nach Verschluss des Endlagers erfolgen. Die vorliegenden Sicherheitsanforderungen enthalten die konzeptionellen Randbedingungen des Optimierungsprozesses hinsichtlich

- der Eigenschaften des Endlagerstandortes,
- der Planung und Auslegung,
- des Einlagerungsbetriebs,
- der Stilllegung und der Verschlussmaßnahmen.

Ziele der Optimierung im Sinne dieser Sicherheitsanforderungen sind:

Eine hohe Sicherheit durch eine möglichst dauerhafte, vollständige und zuverlässige Isolation sowie Vertrauen in die Nachweise insbesondere für die Phase nach Verschluss des Endlagers zu erreichen.

Für den Optimierungsprozess zur Langzeitsicherheit werden folgende Randbedingungen (constraints) gesetzt:

- Die vollständige und zuverlässige Isolation der hochradioaktiven Abfälle in einem Endlagersystem ist maßgeblich durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Verbund mit den Verschlussbauwerken des Endlagers sicherzustellen.
- Der einschlusswirksame Gebirgsbereich sowie die Verschlussbauwerke müssen über Eigenschaften derart verfügen, dass die Isolation über einen Zeitraum von mindestens einer Million Jahren gewährleistet werden kann, wodurch die Schutzziele inhärent eingehalten sind.

Anforderungen an den Sicherheitsnachweis

Die vorliegenden Sicherheitsanforderungen enthalten die Anforderungen an den Nachweis der Sicherheit für alle Phasen der Endlagerentwicklung. Es wird gefordert, an den vorgegebenen Haltepunkten sowohl für die Betriebsphase als auch für die Pha-

se nach Verschluss des Endlagers standortspezifische Sicherheitsnachweise zu führen. Der Sicherheitsnachweis muss umfassend, transparent und nachvollziehbar geführt werden. Er muss die Zusammenführung der Argumente und Analysen zur Begründung der Sicherheit des Endlagersystems sowie zum Vertrauen in den Nachweis enthalten. Die vorliegenden Sicherheitsanforderungen konkretisieren die Anforderungen an den Sicherheitsnachweis für alle Phasen der Endlagerentwicklung. Der Schwerpunkt der Nachweisführung liegt auf dem Nachweis der Isolation der hochradioaktiven Abfälle in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Zusammenwirken mit den geotechnischen Verschlüssen, wodurch der Nachweis der Einhaltung der Sicherheitsprinzipien und der Schutzziele inhärent gegeben ist.

Die Schutzziele gelten zeitlich unbegrenzt, die Nachweisführung soll sich jedoch sowohl an den Grenzen der praktischen Vernunft als auch an den Möglichkeiten des Optimierungsprozesses orientieren. Die Bewertung der Vollständigkeit der Isolation erfolgt bevorzugt anhand von Indikatoren, die durch Modellierung solcher Komponenten des Endlagersystems ermittelt werden, deren Entwicklung sich über den Bewertungszeitraum prognostizieren lässt. Dies sind insbesondere die Komponenten der Teilsysteme einschlusswirksamer Gebirgsbereich und Verschlussbauwerke des Endlagers.

Inhaltsverzeichnis

Beauftragung

1	Einleitung	1
1.1	Das Konzept der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen	1
1.2	Der schrittweise Optimierungsprozess bei der Endlagerentwicklung und die Erarbeitung eines Sicherheitsnachweises (Safety Case)	2
1.3	Die Gewährleistung der Sicherheit nach Verschluss des Endlagers: Nachweis der Isolation der Abfälle	5
2	Anwendungsbereich	7
3	Definitionen	9
4	Sicherheitsprinzipien und Schutzziele	13
4.1	Sicherheitsprinzipien	13
4.2	Schutzziele	14
4.2.1	Radiologische Schutzziele für die Betriebsphase	15
4.2.2	Schutzziele für die Phase nach Verschluss des Endlagers	15
5	Sicherheitsmanagement	17
5.1	Antragsteller	17
5.2	Zuständige Behörde	23
6	Sicherheitskonzept	25
6.1	Grundanforderungen	25
6.2	Anforderungen an den Standort	27
6.3	Anforderungen an die Abfälle und Behälter	28
6.4	Anforderungen an die Errichtung des Endlagerbergwerkes	29
6.5	Anforderungen an den Endlagerbetrieb	29
6.5.1	Anforderungen an die Planung des Einlagerungsbetriebes	30
6.5.2	Anforderungen an die Überwachung der Auslegungsparameter	31
6.6	Anforderungen an Stilllegung und Verschluss des Endlagers	32

7	Nachweis der Sicherheit	33
7.1	Sicherheitsmanagement	33
7.2	Sicherheit in der Betriebsphase	33
7.3	Sicherheit in der Phase nach Verschluss des Endlagers	33
7.3.1	Elemente des Langzeitsicherheitsnachweises	34
7.3.2	Zeitraum für den Langzeitsicherheitsnachweis	35
7.3.3	Langzeitsicherheitsanalysen	35
7.3.4	Einhaltung der Schutzziele	37
7.3.5	Unbeabsichtigtes menschliches Eindringen	39
7.3.6	Dokumentation des Langzeitsicherheitsnachweises	40
Anhang		42

Beauftragung

Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) hat die GRS beauftragt, die Sicherheitskriterien aus dem Jahre 1983 unter Berücksichtigung des Standes von Wissenschaft und Technik zu überarbeiten. Ein Entwurf mit aktualisierten Sicherheitskriterien der GRS wurde der Reaktor-Sicherheitskommission, der Strahlenschutzkommission und dem Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) zur Stellungnahme vorgelegt. Die von diesen Beratungsgremien des BMU vorgelegten Änderungswünsche wurden 2003 in einem weiteren Entwurf der GRS umgesetzt. Beide Entwürfe beziehen sich ausschließlich auf radiologische Schutzziele und Anforderungen, die das in § 1 Nr. 2 und § 7 Abs. 2 Satz 1 Nr. 3 AtG enthaltene Gebot der atomrechtlichen Schadensvorsorge konkretisieren. Nichtradiologische Anforderungen und Anforderungen zum Schutz gegen Einwirkung Dritter sind nicht Gegenstand dieser Sicherheitskriterien. Die Sicherheitskriterien gelten für das nach § 9b Abs. 1 AtG durchzuführende Planfeststellungsverfahren für ein zur Endlagerung radioaktiver Abfälle vorgesehenes Bergwerk an einem geeigneten Standort. Die GRS hat den sich entwickelnden Stand von Wissenschaft und Technik fortlaufend in den Entwurf dieser Sicherheitskriterien eingearbeitet.

Die GRS wurde im November 2006 vom BMU beauftragt, Ende Dezember 2006 einen revidierten Entwurf von Sicherheitskriterien für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle vorzulegen, in dem insbesondere die in jüngster Zeit vorgelegten internationalen Regelwerke und Empfehlungen, wie die IAEA Safety Requirements WS-R-4, die ICRP-Publikation 81 sowie der Draft Report by the ICRP Committee 4 Task Group on Optimisation of Protection (The Optimisation of Radiological Protection – Broadening the Process –, Stand Januar 2006) einbezogen sind. Die dort dargestellten Entwicklungen betreffen insbesondere den schrittweisen Prozess bei der Endlagerentwicklung, verbunden mit einer Optimierung innerhalb vorgegebener Randbedingungen, der Forderung nach einem Sicherheitsmanagement und Sicherheitsnachweisen (Safety Case).

Die Erarbeitung war ohne Berücksichtigung des geltenden einschlägigen Rechtssystems vorzunehmen. Es war nicht Aufgabe der GRS zu prüfen, inwieweit sich die auf dieser Basis zu erarbeitenden Sicherheitsanforderungen in das geltende Rechtssystem eingliedern lassen.

1 Einleitung

1.1 Das Konzept der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen

(1.1) In Deutschland werden bis zum Jahr 2040 voraussichtlich 24.000 m³ wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle anfallen. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um bestrahlte Brennelemente aus Kernkraftwerken, Forschungs- und Versuchsreaktoren sowie Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von Brennelementen. Hinzukommen werden bis 2040 ca. 270.000 m³ konditionierte radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung aus dem Betrieb und Rückbau von Kernkraftwerken, der Wiederaufarbeitung, der Industrie, der Forschung sowie aus den Landessammelstellen (www.bfs.de, Stand vom 18.10.2006). Diese radioaktiven Abfälle können eine Gefährdung für Mensch und Umwelt darstellen. Ihr Gefährdungspotenzial und seine zeitliche Entwicklung hängen vom Aktivitätsinventar sowie von der Art und Strahlung, der Radiotoxizität und der Halbwertszeit der in den Abfällen enthaltenen Radionuklide wie auch von der physikalischen und chemischen Beschaffenheit der Abfälle ab.

(1.2) Das „Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung“ verpflichtet Deutschland zur „Gewährleistung wirksamer Abwehrvorkehrungen gegen eine mögliche Gefährdung in allen Stufen der Behandlung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle, um den Einzelnen, die Gesellschaft und die Umwelt heute und in Zukunft vor schädlichen Auswirkungen ionisierender Strahlung zu schützen, und dies in einer Weise, dass die Bedürfnisse und Wünsche der heutigen Generation erfüllt werden, ohne dass die Fähigkeit künftiger Generationen, die eigenen Bedürfnisse und Wünsche zu erfüllen, aufs Spiel gesetzt wird“. Dies erfordert „sich zu bemühen, Handlungen zu vermeiden, deren vernünftigerweise vorhersehbare Auswirkungen auf künftige Generationen größer sind als die für die heutige Generation zulässigen“ und „zu versuchen, künftigen Generationen keine unangemessenen Belastungen aufzubürden“.

(1.3) In der nationalen und internationalen Fachwelt überwiegt die Überzeugung, dass nach Abwägung der Möglichkeiten – unter Zugrundelegung der für den Umgang mit radioaktiven Abfällen fundamentalen Grundsätze – die geologische Endlagerung die beste verfügbare Option der Entsorgung insbesondere für langlebige radioaktive Abfälle

le darstellt. Unter geologischer Endlagerung wird dabei die Einlagerung fester oder verfestigter radioaktiver Abfälle in geeignete geologische Formationen in ein Endlager in mehreren hundert Metern Tiefe verstanden, so dass die Isolation der Radionuklide von der Biosphäre über lange Zeiträume gewährleistet werden kann.

(1.4) In Deutschland wird in Übereinstimmung mit den von der IAEA und der OECD/NEA formulierten Grundsätzen der international anerkannte Weg des Konzentrierens und des Isolierens mittels Endlagerung aller Arten von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen verfolgt. Damit wird eine nachsorgefreie Gewährleistung der Sicherheit von Mensch und Umwelt („passive Sicherheit“) erreicht. Die Endlagerung verfolgt das Prinzip des Konzentrierens und Isolierens der radioaktiven Abfälle ohne die Intention einer Rückholung. Ziele der Endlagerung sind:

- der sichere Einschluss der Abfälle
- die Isolation der Abfälle
- die Ver- oder Behinderung von Radionuklidfreisetzungen bzw. Verzögerung signifikanter Radionuklidmigrationen
- die Gewährleistung, dass eventuell langfristig nicht zu vermeidende Radionuklidfreisetzungen zu keinem erhöhten Risiko für Mensch und Umwelt führen
- Vorsorge gegen die Möglichkeit von unbeabsichtigtem menschlichem Eindringen in die Abfälle und die damit verbundenen Auswirkungen zu treffen

1.2 Der schrittweise Optimierungsprozess bei der Endlagerentwicklung und die Erarbeitung eines Sicherheitsnachweises (Safety Case)

(1.5) Zum Nachweis der Sicherheit ist „sicherzustellen, ... daß ... vor dem Bau eines Endlagers für die Zeit nach dem Verschuß eine systematische Sicherheitsbewertung und eine Bewertung der Auswirkungen auf die Umwelt vorgenommen und die Ergebnisse anhand der ... festgelegten Kriterien bewertet werden ...“ (Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung). In den Safety Requirements WS-R-4 „Geological Disposal of Radioactive Waste“ der IAEA werden dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechende Anforderungen an solche Kriterien und an die Nachweisführung formuliert. Insbesondere ist die Sicherheitsbewertung im Rahmen eines Sicherheitsnachweises zu führen, der

- die Grundlagen für das Verständnis des Endlagersystems und
- die Schlüsselargumente hinsichtlich der Sicherheit des Endlagers zusammenstellt sowie
- die bislang nicht aufgelösten Unsicherheiten, ihre Sicherheitsrelevanz und Ansätze zum künftigen Umgang mit ihnen darstellt.

(1.6) Das Führen des Sicherheitsnachweises ist dynamisch und steht in engem Zusammenhang mit dem **Entwicklungsprozess** für das Endlager. Die Safety Requirements WS-R-4 sehen für diesen Prozess Halte- und Kontrollpunkte vor („schrittweises Vorgehen“). Entsprechend den jeweiligen Notwendigkeiten erfolgen an diesen Haltepunkten Bewertungen des Standorts und von Optionen hinsichtlich der Endlagerauslegung, des Einlagerungsbetriebs, der Stilllegung, des Verschlusses und des Managements u. a. im Hinblick auf Funktion und Sicherheit des Endlagersystems (WS-R-4, 3.37). An diesen Haltepunkten sind Entscheidungen bezüglich des weiteren Projektverlaufs zu treffen. Hierbei sind die jeweils verfügbaren Optionen abzuwägen und die Entscheidungen u. a. auf der Basis des Sicherheitsnachweises zu begründen.

(1.7) Der Sicherheitsnachweis ist frühzeitig im Prozess der Endlagerentwicklung durch den Antragsteller/Betreiber zu erstellen. Danach ist er an jedem Halte- und Kontrollpunkt anzupassen und in einer hinreichend detaillierten und umfassenden Form vorzulegen, so dass er eine wesentliche technische Grundlage für die jeweils notwendigen regulatorischen und anderen Entscheidungen hinsichtlich des weiteren Vorgehens bildet. Insbesondere bildet er eine Grundlage für Genehmigungsentscheidungen und für Tätigkeiten im Bereich der Forschung und Endlagerentwicklung. Gegebenenfalls kann die zuständige Behörde eine Anpassung oder Revision des Sicherheitsnachweises oder gar des Projektes anordnen. Eine solche Anpassung oder Revision kann auch zur Stützung politischer Entscheidungen hinsichtlich der Endlagerentwicklung oder zum Erlangen der hierzu notwendigen Akzeptanz in der Öffentlichkeit erforderlich werden (WS-R-4, 3.42, 3.43).

(1.8) Die schrittweise Entwicklung des Sicherheitsnachweises und die Interaktion mit der zuständigen Behörde und/oder Entscheidungsträgern an festgelegten Halte- und Kontrollpunkten ist ein wesentliches Element des von der ICRP in ihrer Publikation 81 empfohlenen Optimierungsprozesses zum Erreichen der Sicherheit, da im Sicherheitsnachweis das Verständnis hinsichtlich der sicherheitstechnischen Bedeutung der je-

weils zur Entscheidung anstehenden Optionen entwickelt und dargelegt wird (WS-R-4, 3.15).

(1.9) Damit wird deutlich, dass die Sicherheit, die auf dem Zusammenwirken von Standorteigenschaften und technischen Maßnahmen beruht, nur durch die Umsetzung adäquater Planungs- und Managementprinzipien erreicht werden kann. Der Nachweis der Einhaltung dieser Prinzipien ist deshalb unverzichtbarer Bestandteil des Sicherheitsnachweises. Es ist zu zeigen, dass das zur Anwendung gelangte Sicherheitsmanagement die adäquate Erstellung und Umsetzung des Sicherheitskonzepts gewährleistet.

(1.10) Zur Gewährleistung des beschriebenen schrittweisen Entwicklungsprozesses ist ein entsprechender rechtlicher und organisatorischer Rahmen zu schaffen. Dies schließt die Definition von Schritten (also Halte- und Entscheidungspunkten), die Zuordnung von Verantwortlichkeiten und die Gewährleistung unabhängiger Genehmigungsfunktionen ein (WS-R-4, 3.5).

(1.11) Die „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen“ (nachfolgend kurz „Sicherheitsanforderungen“ genannt) setzen diese Anforderungen um. Sie erfassen den schrittweisen Entwicklungsprozess für neu zu errichtende und zu genehmigende Endlager für hochradioaktive Abfälle von der Standorterkundung bis hin zum Verschluss und darüber hinaus. Die Sicherheitsanforderungen beziehen sich auf den Nachweis der technischen Sicherheit für alle Phasen der Endlagerentwicklung. Die technische Sicherheit ist im Sinne dieser Sicherheitsanforderungen gewährleistet, wenn der Prozess der Endlagerentwicklung und der Abwägung von Optionen und Optimierung sicherheitstechnischer, technischer, ökonomischer, planerischer, sozialer und anderer Zielgrößen unter Einhaltung der in diesen Sicherheitsanforderungen festgelegten sicherheitstechnischen Randbedingungen durchlaufen wurde.

(1.12) Entsprechend den Anforderungen der ICRP 81 erfolgt der Optimierungsprozess auf im Wesentlichen qualitative Weise unter Berücksichtigung der Schutzziele und der für ihre Einhaltung wesentlichen wissenschaftlich-technischen Grundlagen und Planungs- und Managementprinzipien wie auch anderer, z. B. sozialer und ökonomischer Faktoren.

(1.13) Im Prozess der Endlagerentwicklung ist auch die Frage der Akzeptanz des Endlagerprojekts durch Betroffene / Interessierte von Bedeutung. Diese Fragestellung ist jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Sicherheitsanforderungen. Auch die Bewertung von Faktoren, die üblicherweise Gegenstand von Umweltverträglichkeitsprüfungen sind (z. B. Raumplanung, Verkehrsbelästigung, Lärmbelästigung, Landschaftsschutz, soziale und ökonomische Faktoren), wird nicht behandelt.

1.3 Die Gewährleistung der Sicherheit nach Verschluss des Endlagers: Nachweis der Isolation der Abfälle

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

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

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

(1.17) Die Sicherheit des Endlagers nach dessen Verschluss beruht primär auf der Gewährleistung der Isolation der Abfälle. Ist diese Isolation über lange Zeiträume gesichert und nachgewiesen, impliziert dies die Einhaltung der Ziele zum Schutz von Mensch und Umwelt, auch wenn sich die Entwicklungen von Biosphäre, Mensch und

Gesellschaft über diese Zeiträume nicht prognostizieren lassen und demzufolge auch eine Nachweisführung mittels der Ableitung von Bewertungsgrößen für radiologische Konsequenzen (Dosis, Risiko) an Grenzen stößt.

(1.18) Für den Optimierungsprozess werden Randbedingungen („constrained optimisation“, vgl. die ICRP-Publikation 81) hinsichtlich der Dauer, der Vollständigkeit und der Zuverlässigkeit der Isolation gesetzt.

(1.19) Der Endlagerstandort hat Eigenschaften derart aufzuweisen, dass ein entsprechend entwickeltes Endlagerkonzept die Einhaltung dieser Randbedingungen an diesem Standort gewährleisten kann. Eine besondere Rolle bei der Gewährleistung der Isolation spielt der „einschlusswirksame Gebirgsbereich“, der gemäß den im „Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte“ entwickelten Ideen – im Zusammenwirken mit den ingenieurtechnischen Barrieren – die Isolation der hochradioaktiven Abfälle gewährleisten soll. Die Nachweisführung muss sich an den Grenzen der praktischen Vernunft orientieren. Die Bewertung der Vollständigkeit der Isolation erfolgt bevorzugt anhand von Indikatoren, die durch Modellierung solcher Komponenten des Endlagersystems ermittelt werden, deren Entwicklung sich über den Bewertungszeitraum prognostizieren lässt. Dies trifft insbesondere auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich zu. Deshalb werden hauptsächlich Indikatoren aus diesem Bereich bzw. seiner Randzone zur Bewertung herangezogen. Die Bewertungsmaßstäbe orientieren sich soweit als möglich an in der Natur vorgefundenen Zuständen.

2 Anwendungsbereich

(2.1) Die vorliegenden „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen“ konkretisieren das in § 1 Nr. 2 und § 9b in Verbindung mit § 7 Abs. 2 Satz 1 Nr. 3 AtG enthaltene Gebot der nach Stand von Wissenschaft und Technik erforderlichen Schadensvorsorge durch Anforderungen und Kriterien. Davon unberührt bleiben die wesentlichen Anforderungen aus anderen Rechtsgebieten (Bundesberggesetz, Wasserhaushaltsgesetz, Bundesimmissionsschutzgesetz, Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz). Die Anforderungen aus den jeweiligen Rechtsgebieten müssen aufeinander abgestimmt werden. Im Einklang mit Art. 2 lit. d) der nuklearen Entsorgungskonvention wird nicht von einer beabsichtigten Rückholung der radioaktiven Abfälle ausgegangen. Nichtradiologische Anforderungen und Anforderungen zum Schutz gegen Einwirkung Dritter sind nicht explizit Gegenstand dieser Sicherheitsanforderungen.

(2.2) In Konkretisierung der gesetzlichen Grundlagen dienen die Anforderungen und Kriterien der Feststellung der Sicherheit eines Endlagers in einem schrittweisen Genehmigungsverfahren. Sie erfassen den schrittweisen Entwicklungsprozess für neu zu errichtende und zu genehmigende Endlager für hochradioaktive Abfälle von der Standorterkundung bis hin zum Verschluss und dienen fortlaufend zur Optimierung der Sicherheit.

(2.3) Die Sicherheitsanforderungen beziehen sich auf den Nachweis der technischen Sicherheit für alle Phasen der Endlagerentwicklung. Die technische Sicherheit im Sinne dieser Sicherheitsanforderungen ist gewährleistet, wenn der Prozess der Endlagerentwicklung und der Abwägung von Optionen und Optimierung sicherheitstechnischer, technischer, ökonomischer und planerischer Zielgrößen unter Einhaltung der in diesen Sicherheitsanforderungen festgelegten sicherheitstechnischen Randbedingungen durchlaufen wurde. Im Prozess der Endlagerentwicklung ist auch die Frage der Akzeptanz des Endlagerprojekts durch Betroffene / Interessierte von Bedeutung. Diese Fragestellung ist jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Sicherheitsanforderungen. Auch die Bewertung von Faktoren, die üblicherweise Gegenstand von Umweltverträglichkeitsprüfungen (z. B. Raumplanung, Verkehrsbelästigung, Lärmbelästigung, Landschaftsschutz, soziale und ökonomische Faktoren) sind, wird nicht behandelt.

(2.4) Für bereits begonnene Endlagerprojekte ist je nach deren Entwicklungsstand ein Sicherheitsnachweis im Sinne dieser Sicherheitsanforderungen vorzulegen und für die verbleibenden Prozessschritte schrittweise weiterzuentwickeln.

3 Definitionen

(3.1) Hochradioaktiver **Abfall** ist die Bezeichnung des radioaktiven Abfalls mit nicht vernachlässigbarer Wärmeentwicklung. Hierzu gehören vor allem die bestrahlten Brennelemente sowie hochradioaktive flüssige Abfälle (Spaltproduktlösungen) aus der Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente, die aufkonzentriert und in Glas eingeschmolzen werden (Glaskokillen).

(3.2) **Abfallbehälter** ist der Behälter zur Aufnahme eines Abfallprodukts (z. B. Fass, Betonbehälter, Gussbehälter, Container).

(3.3) **Abfallcharakterisierung** ist die Ermittlung der endlagerrelevanten Eigenschaften von Abfallgebinden mit Angabe von Bandbreiten.

(3.4) **Abfallgebinde** ist die endzulagernde Einheit aus Abfallprodukt und Abfallbehälter.

(3.5) **Abfallmatrix** ist das ausgehärtete Fixierungsmittel, in dem radioaktiver Abfall fixiert ist.

(3.6) **Abfallprodukt** ist verarbeiteter radioaktiver Abfall ohne Verpackung oder unverarbeiteter radioaktiver Abfall in einem Behälter verpackt.

(3.7) Die **Betriebsphase** beginnt nach Erteilung der Betriebsgenehmigung zur planmäßigen Einlagerung der radioaktiven Abfälle und endet mit dem Abschluss der Stilllegungsmaßnahmen des Endlagers einschließlich der Fertigstellung des Schachtverschlusses.

(3.8) **Biosphäre** ist generell definiert als die Gesamtheit der mit lebenden Organismen besiedelten Bereiche der Erde.

(3.9) **Einschlusswirksamer Gebirgsbereich** ist das geologische Teilsystem des Endlagers, das im Zusammenwirken mit den geotechnischen Verschlüssen (Schachtverschluss) die Isolation der Abfälle sicherstellen muss.

(3.10) Das **Endlager** ist der Teil des Endlagersystems, in den hochradioaktive Abfälle eingelagert werden. Das Endlager umfasst das Endlagerbergwerk, das Wirtsgestein und den einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Es wird nach Beendigung des Einlagebetriebs der Abfälle im Endlagerbergwerk durch Stilllegung und Verschluss der Zugänge in den wartungsfreien Zustand überführt.

(3.11) **Endlagersystem** umfasst das Endlager sowie seine geologische Umgebung, die alle Gebirgsbereiche einschließt, die für den Nachweis der Einhaltung der Sicherheitsprinzipien und Schutzziele der Endlagerung betrachtet werden müssen.

(3.12) **Isolation** beschreibt **im Allgemeinen** einen Zustand, bei dem der Transport einer Substanz oder von Energie vermindert oder verhindert wird, d.h. den durch Isolierung / Abdichtung mittels isolierender Materialien (Isolatoren) erreichten Zustand. (Vollkommene Isolatoren gibt es nicht.) **Isolation** bedeutet **bei der Endlagerung**, die Freisetzung und den Transport von Schadstoffen so zu behindern, dass die Sicherheitsprinzipien und Schutzziele innerhalb des Nachweiszeitraumes eingehalten werden.

(3.13) **Indikator** ist eine Mess- oder Bewertungsgröße zur Beurteilung einer geforderten Eigenschaft:

(3.14) **Sicherheitsindikatoren** dienen dem Nachweis der Einhaltung der Schutzziele. Sie ermöglichen die integrale Bewertung der Sicherheit des Endlagersystems.

(3.15) **Funktionsindikatoren** dienen der Bewertung der Funktionsfähigkeit von Teilsystemen und Komponenten des Endlagersystems im Hinblick auf die gestellten Anforderungen.

(3.16) **Isolationsvermögen** ist das Vermögen des Endlagersystems, die Isolation zu gewährleisten.

(3.17) **Kritikalität** ist der Zustand einer sich selbst erhaltenden Kettenreaktion, d.h. die Neutronenproduktionsrate ist gleich oder größer als die Neutronenverlustrate. Unterkritikalität beschreibt den Zustand einer sich nicht selbst erhaltenden Kettenreaktion.

(3.18) **Langzeitsicherheit** kennzeichnet denjenigen Zustand des Endlagersystems, bei dem innerhalb des Nachweiszeitraumes nachsorgefrei die Schutzziele eingehalten werden.

(3.19) **Langzeitsicherheitsanalyse** ist die standortspezifische Analyse der Funktion des Endlagersystems. Sie umfasst die Entwicklung konzeptioneller Modelle, die Szenarienentwicklung, die Konsequenzenanalyse sowie den Vergleich der Ergebnisse mit vorgegebenen Schutzziele. Sie ist Bestandteil des Langzeitsicherheitsnachweises.

(3.20) Der **Nachweiszeitraum** ist der regulatorisch festgelegte Zeitraum, für den die Langzeitsicherheit nachzuweisen ist.

(3.21) **Prognose** beschreibt **im Allgemeinen** die Voraussage der zukünftigen Entwicklungen mit Hilfe von Erfahrungen und eines Wahrscheinlichkeitsschlusses. **Langzeitprognose** bedeutet für die Bewertung der Langzeitsicherheit die wissenschaftlich begründete Herleitung der möglichen Entwicklungen der für die Sicherheit relevanten Bereiche des Endlagersystems mit einem Wahrscheinlichkeitsschluss.

(3.22) **Robustheit des Endlagersystems** ist die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen sowie gegen Unsicherheiten.

(3.23) Eine **Sicherheitsfunktion** ist die Funktion, die in einem sicherheitsbezogenen System, Teilsystem oder einer Einzelkomponente die Erfüllung der sicherheitsrelevanten Anforderungen übernimmt. Durch das Zusammenwirken solcher Funktionen wird die Isolation als die primäre Sicherheitsfunktion in einem Endlagersystem gewährleistet und die Einhaltung der Sicherheitsprinzipien und der Schutzziele sowohl in der Betriebsphase als auch in der Phase nach Verschluss des Endlagers garantiert.

(3.24) Der umfassende **Sicherheitsnachweis** entsteht durch die Zusammenführung aller Argumente und Analysen zur Begründung der Sicherheit des Endlagersystems sowie zum Vertrauen in die Sicherheitsaussage (Safety Case). Es wird unterschieden nach **Sicherheitsnachweisen für die Betriebsphase** und dem **Langzeitsicherheitsnachweis**.

(3.25) Die **Stilllegung** umfasst alle Maßnahmen zum Sichern - Herstellung der Barriereintegrität und des Isolationsvermögens - des Endlagers. Man unterscheidet nach Stilllegung von Teilbereichen des Endlagerbergwerks, wie etwa Einlagerungsbereichen, und der Stilllegung des Endlagerbergwerks nach Einstellung des Einlagerungsbetriebs.

(3.26) Ein **Szenarium** beschreibt eine postulierte Entwicklung des Endlagersystems und seiner Sicherheitsfunktionen, die durch eine Kombination relevanter Faktoren spezifiziert ist, welche das Endlagersystem charakterisieren oder dieses beeinflussen.

(3.27) Das **Verfüll- und Verschlusskonzept** ist darauf ausgerichtet, die Integrität des Endlagersystems dauerhaft zu sichern. Verfüllung ist das Einbringen von Versatzmaterial in die Grubenbaue zur Verringerung der verbleibenden Hohlräume sowie zur Erhöhung der Stabilität und Integrität des Endlagers. Das Verschlusskonzept umfasst sowohl den Verschluss der Einlagerungsbereiche durch firstbündige Verfüllung ausgewählter Strecken und Grubenbaue als auch den Verschluss der Zugänge zum Endlagerbergwerk.

(3.28) **Wirtsgestein** ist das Gebirge, in das die hochradioaktiven Abfälle eingelagert werden.

4 Sicherheitsprinzipien und Schutzziele

4.1 Sicherheitsprinzipien

(4.1) Das „Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung“ für den sicheren Umgang mit radioaktiven Abfällen, das Atomgesetz (AtG) sowie die „Principles of Radioactive Waste Management“ und die „Fundamental Safety Principles“ der IAEA enthalten die fundamentalen Prinzipien für den Umgang mit radioaktiven Abfällen. Sie sind Grundlage für folgende Sicherheitsprinzipien der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen nach dem Konzept des Konzentrierens und Isolierens ohne die Intention einer Rückholung.

(4.2) Radioaktive Abfälle müssen so gehandhabt und eingelagert werden, dass Mensch und Umwelt in allen Phasen der Endlagerentwicklung geschützt sind.

(4.3) Die Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen hat die Isolation der radioaktiven Abfälle in einem Endlagersystem über lange Zeiten sicherzustellen, um damit

- (4.4) langfristig Mensch und Umwelt vor den potenziell schädlichen Auswirkungen der eingelagerten radioaktiven Abfälle zu schützen und
- (4.5) zu verhindern, dass zukünftigen Generationen unzumutbare Lasten und Verpflichtungen auferlegt werden.

Dies bedeutet, dass

- (4.6) die aus der Endlagerung resultierenden potenziellen Auswirkungen für Mensch und Umwelt auch in Zukunft das Maß heute akzeptierter Auswirkungen nicht übersteigen dürfen,
- (4.7) die potenziellen Auswirkungen für Mensch und Umwelt aus der Endlagerung radioaktiver Stoffe in Deutschland außerhalb der Grenzen Deutschlands nicht größer sein dürfen als innerhalb zulässig,
- (4.8) jede Strahlenexposition und Kontamination von Mensch und Umwelt unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichti-

gung aller Umstände des Einzelfalls auch unterhalb der Grenzwerte so gering wie möglich zu halten ist, und

- (4.9) die aus der Endlagerung resultierende Strahlenexposition für Mensch und Umwelt niedrig sein soll gegenüber der natürlichen Strahlung.

4.2 Schutzziele

(4.10) Bei der Formulierung der Schutzziele für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle werden die einschlägigen deutschen Gesetze und die Empfehlungen internationaler Organisationen berücksichtigt.

(4.11) Radiologische Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle sind im Atomgesetz, der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) und dem „Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung“ niedergelegt.

(4.12) Nach § 1 Nr. 2 AtG sind Leben, Gesundheit und Sachgüter vor den Gefahren der Kernenergie und der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung zu schützen sowie durch Kernenergie oder ionisierende Strahlen verursachte Schäden auszugleichen.

(4.13) Für Errichtung und Betrieb eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle werden die in § 7 Abs. 2 Nr. 1, 2, 3 und 5 AtG genannten Voraussetzungen herangezogen. Nach § 7 Abs. 2 Satz 1 Nr. 3 AtG muss die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb des Endlagers getroffen sein.

(4.14) Die Strahlenschutzgrundsätze gemäß § 5 und § 6 StrlSchV sind auf die gesamte Endlagerentwicklung anzuwenden. Dosisgrenzwerte dürfen nicht überschritten werden und darüber hinaus ist nach § 6 StrlSchV dabei jede unnötige Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt zu vermeiden. Auch unterhalb der genannten Grenzwerte ist jede Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls so gering wie möglich zu halten.

(4.15) Insbesondere § 46 und § 47 StrlSchV kommen für die Phase nach Verschluss des Endlagers nicht zur Anwendung.

4.2.1 Radiologische Schutzziele für die Betriebsphase

(4.16) Während der Betriebsphase des Endlagers sind die nach Strahlenschutzverordnung geltenden Anforderungen für den Schutz der Beschäftigten, der Bevölkerung und der Umwelt einzuhalten.

(4.17) Radiologisches Schutzziel für den Menschen ist die Begrenzung der Individualdosis unter Beachtung der Anforderungen der Strahlenschutzverordnung zur Vermeidung unnötiger Strahlenexposition und Dosisreduzierung.

Optimierung des Strahlenschutzes für die Betriebsphase

(4.18) Jede unnötige Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt ist zu vermeiden (§ 6 StrlSchV).

(4.19) Wirksamkeit und Aufwand der Schutzmaßnahmen gegen die Wirkung ionisierender Strahlung sind entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik und unter Beachtung der Verhältnismäßigkeit abzuwägen (§ 6 StrlSchV). Für den Abwägungsprozess können auch konventionelle Sicherheitsaspekte (bergtechnische Sicherheit, Auswirkungen sonstiger toxischer Stoffe) bedeutsam sein.

(4.20) Bei sehr kleinen Dosisbeiträgen von etwa 0,01 mSv pro Kalenderjahr oder kleiner ist eine Optimierung des Strahlenschutzes nicht mehr erforderlich.

4.2.2 Schutzziele für die Phase nach Verschluss des Endlagers

(4.21) Ein Schutzziel für die Phase nach Verschluss des Endlagers ist die Begrenzung des Risikos eines Individuums, eine schwerwiegende Erkrankung aus einer Exposition (z. B. Individualdosis) zu erleiden.

(4.22) Für wahrscheinliche Entwicklungen (Szenarien) des Endlagersystems dürfen allenfalls geringfügige Mengen an Schadstoffen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzt werden, so dass es zu keiner nachteiligen Veränderung von Boden und Wasser und damit zu keinen relevanten Risiken für Mensch und Umwelt kommt.

(4.23) Andere Szenarien, die nicht (z. B. aufgrund ihrer extrem geringen Eintrittswahrscheinlichkeit) von der Bewertung auszuschließen sind, dürfen Freisetzungen aus dem

einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufweisen, die allenfalls zu einem geringfügigen zusätzlichen Risiko für Mensch und Umwelt führen.

(4.24) Szenarien, die zu einer höheren Freisetzung führen, müssen unwahrscheinlich sein bzw. ausgeschlossen werden können.

(4.25) Der Schutz der Umwelt umfasst die natürlichen Lebensgrundlagen des Menschen sowie den Schutz von Flora und Fauna.

(4.26) Nach dem derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik wird davon ausgegangen, dass durch den Schutz des Menschen auch der Schutz der Umwelt gewährleistet ist.

(4.27) Die Schutzziele für Mensch und Umwelt gelten zeitlich unbegrenzt.

Optimierung für die Phase nach Verschluss des Endlagers

(4.28) Umfang und Wirksamkeit der Maßnahmen zur langzeitigen Isolation der Schadstoffe unterliegen einem Prozess der Optimierung im Rahmen der schrittweisen Endlagerentwicklung. Ziel ist eine hohe Sicherheit durch eine möglichst dauerhafte, vollständige und zuverlässige Isolation und Vertrauen in die Nachweise insbesondere für die Phase nach Verschluss des Endlagers zu erreichen. Dieser Prozess unterliegt Randbedingungen („constrained optimisation“, vgl. die ICRP-Publikation 81) hinsichtlich der Vollständigkeit, der Zuverlässigkeit und der Dauer der Isolation.

- (4.29) Die vollständige und zuverlässige Isolation der hochradioaktiven Abfälle in einem Endlagersystem ist maßgeblich durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Verbund mit den Verschlussbauwerken des Endlagers sicherzustellen.
- (4.30) Der einschlusswirksame Gebirgsbereich sowie die Verschlussbauwerke müssen über Eigenschaften derart verfügen, dass die Isolation über einen Zeitraum von mindestens einer Million Jahren gewährleistet werden kann, wodurch die Schutzziele inhärent eingehalten sind.

(4.31) Die Sicherheitsanforderungen an die Phase nach Verschluss gelten als umgesetzt, wenn der Optimierungsprozess erfolgreich durchlaufen ist. Eine weitere Optimierung ist nicht erforderlich.

5 Sicherheitsmanagement

(5.1) Das Sicherheitsmanagement umfasst die Gesamtheit der Maßnahmen zur sachgerechten Planung, Organisation, Leitung und Kontrolle von Personen und deren Handlungen. Die Zielsetzungen des Sicherheitsmanagements in der hier verwendeten umfassenden Bedeutung sind die Gewährleistung der Sicherheit des Endlagers, die stetige Verbesserung der Sicherheit im Rahmen der Endlagerentwicklung sowie die begleitende Förderung der Sicherheitskultur aller Beteiligten.

(5.2) Die Gewährleistung der Sicherheit erfordert eine hohe Qualität der Infrastruktur zur Erfüllung der Anforderungen, der Prozesse und der Tätigkeiten von allen Beteiligten in allen Phasen der Endlagerentwicklung. Dies bedeutet u. a. den Einsatz von Managementprinzipien, von qualifiziertem Personal und von qualifizierten Methoden.

(5.3) Zur stetigen Verbesserung der Sicherheit wird ein schrittweiser Optimierungsprozess unter vorgegebenen Randbedingungen („Constrained Optimisation“ gemäß ICRP 81 und IAEA (WS-R-4)) gefordert. Er erfolgt auf eine im Wesentlichen qualitative Weise unter Berücksichtigung der Schutzziele und der für ihre Einhaltung wesentlichen wissenschaftlich-technischen Grundlagen und Planungs- und Managementprinzipien wie auch anderer, z. B. sozialer und ökonomischer Faktoren. Ziel des Optimierungsprozesses ist eine hohe Sicherheit und ein Vertrauen in die Nachweise. Die Randbedingungen (constraints) hinsichtlich der Sicherheit in der Phase nach Verschluss des Endlagers ergeben sich aus den Schutzzielen (Kapitel 4) und den Anforderungen an das Sicherheitskonzept (Kapitel 6).

5.1 Antragsteller

(5.4) Der Antragsteller ist der Hauptbeteiligte im Prozess der Endlagerentwicklung, ihm kommt die Verantwortung für die Entwicklung des Endlagers zu. Nach erteilter Betriebsgenehmigung übernimmt er auch die Rolle des Betreibers des Endlagers.

Der Antragsteller hat

(5.5) die Verantwortung für die Entwicklung eines sicheren Endlagersystems für hochradioaktive Abfälle.

(5.6) ein Sicherheitsmanagementsystem aufzustellen und vorzulegen.

(5.7) den Standort vorzuschlagen, die Standorterkundung und Standortcharakterisierung, die Planung und Auslegung vorzunehmen, Sicherheitsnachweise zu führen, die Errichtung des Endlagers durchzuführen, dessen sicheren Betrieb zu gewährleisten, die Stilllegung und den Verschluss zu planen und zu realisieren.

(5.8) die für die sichere Endlagerung hochradioaktiver Abfälle erforderlichen Kenntnisse über Zusammenhänge und Prozesse zu erwerben, vorzuhalten und zur Anwendung zu bringen. Ihm obliegt es, die hierzu erforderlichen Untersuchungen und Forschungen projektbezogen vorzunehmen und die Forschungsprogramme sowie die Forschungsergebnisse offen zu legen.

(5.9) Sorge dafür zu tragen, dass in dem Projekt angemessene Managementprinzipien zur Anwendung gelangen.

(5.10) ein umfassendes Qualitätssicherungsprogramm zu erstellen und einzuhalten, welches die Phasen Planung und Auslegung, Errichtung und Betrieb, Stilllegung und Verschluss des Endlagers abdeckt. Grundlage hierfür sind die einschlägigen Regeln und Normen (KTA, DIN, ISO).

(5.11) ein Sicherheitskonzept für das Endlager zu erstellen und zu realisieren, welches die Einhaltung der Sicherheitsprinzipien und der Schutzziele für alle Phasen der Endlagerung gewährleistet. Er hat das Sicherheitskonzept in einem schrittweisen Optimierungsprozess mit dem Ziel der stetigen Verbesserung der Sicherheit weiterzuentwickeln. Die Anforderungen aus Kapitel 6 sind dabei zu beachten.

(5.12) Endlagerungsbedingungen für die einzulagernden hochradioaktiven Abfälle und Abfallgebinde zu entwickeln und ein Produktkontrollsystem zu implementieren.

(5.13) die Safeguards-Verpflichtungen von IAEA und EURATOM zu berücksichtigen. Prozessleitend ist dabei die Sicherheit des Endlagers.

(5.14) der zuständigen Behörde seine Planung des Optimierungsprozesses darzulegen.

(5.15) mit der zuständigen Behörde die Prozessschritte des Optimierungsprozesses zu vereinbaren, die mindestens die Schritte

- Standorterkundung und Standortcharakterisierung,

- Planung und Auslegung,
- Errichtung und Betrieb,
- Stilllegung und Verschluss des Endlagerbergwerks

umfassen.

(5.16) den Optimierungsprozess durchzuführen.

(5.17) zu den mit der zuständigen Behörde vereinbarten Prozessschritten den Stand des Projektes und die im Optimierungsprozess gewonnenen Erkenntnisse im Hinblick auf das Projektziel darzulegen und seine Planungen über den weiteren Projektverlauf zu begründen. Zum Ende eines jeden Verfahrensschrittes hat der Antragsteller die erreichten Erkenntnisse zusammenzuführen und einen fortgeschriebenen Sicherheitsnachweis vorzulegen. Dieser muss die Umsetzung der Anforderungen an das Sicherheitsmanagement und an das Sicherheitskonzept darlegen, den Nachweis der Einhaltung der Sicherheitsprinzipien und Schutzziele enthalten und wesentliche Veränderungen gegenüber den vorangegangenen Prozessschritten begründen und bewerten. Die Aussagetiefe muss der zum jeweiligen Prozessschritt erreichten Erkenntnis unter Berücksichtigung der jeweils verbleibenden Unsicherheiten angemessen sein und die Entscheidung, die im Hinblick auf den weiteren Prozessverlauf getroffen werden soll, untermauern. Im Hinblick auf die Optimierung der Sicherheit sind die verfügbaren Optionen abzuwägen und die Entscheidung für die jeweilige Option zu begründen und transparent und nachvollziehbar darzulegen.

(5.18) für den gesamten Optimierungsprozess ein Unsicherheitsmanagement zu etablieren. Dies bedeutet, dass zu jedem Verfahrensschritt die bestehenden Unsicherheiten im Sicherheitsnachweis darzulegen und die hieraus resultierenden Konsequenzen darzustellen sind. Der Antragsteller muss aufzeigen, wie im weiteren Projektverlauf den Unsicherheiten Rechnung getragen wird, z. B. durch Erkenntniszugewinn im Rahmen von Forschungsarbeiten oder durch eine robuste Endlagerauslegung. Ist eine weitere Reduzierung von Unsicherheiten nicht angemessen oder nicht möglich, ist dies zu begründen und im Sicherheitsnachweis zu berücksichtigen.

Standorterkundung und Standortcharakterisierung

Der Antragsteller hat

(5.19) den Standort, für den eine Eignungsuntersuchung durchgeführt werden soll, der zuständigen Behörde anzuzeigen und seine Eignungshöflichkeit zu begründen. In die Begründung sind auch die Aspekte Ressourcenschutz und menschliche Tätigkeiten nach Verschluss des Endlagers einzubeziehen.

(5.20) ein Standorterkundungsprogramm zur Standortcharakterisierung zu entwickeln und durchzuführen. Das Standorterkundungsprogramm ist mit der zuständigen Behörde abzustimmen.

(5.21) die Standorteigenschaften nach qualifizierten Methoden zu erheben und zu bewerten, um ausreichende Kenntnis hinsichtlich der Eignung des Standorts und der Bewertung der Sicherheit zu erhalten. Die Erkundungsarbeiten müssen sowohl von Über- als auch von Untertage durchgeführt werden. Sie müssen derart ausgeführt werden, dass das Isolationsvermögen des Standortes so wenig wie möglich beeinträchtigt wird. In situ-Messungen müssen durchgeführt werden. Untersuchungen zu wesentlichen Auslegungsparametern technischer Komponenten (z. B. Verschlussmaßnahmen) sowie deren Wechselwirkung mit dem Wirtsgestein und den natürlichen Gegebenheiten müssen durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Standorterkundung sind zu dokumentieren.

(5.22) die aufgrund von inneren und äußeren Ursachen möglichen zukünftigen Entwicklungen des geologischen Barrierensystems und seiner Sicherheitsfunktionen in einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose zu beschreiben und zu bewerten. Dabei muss die anthropogene Beeinflussung des geologischen Barrierensystems und seiner Sicherheitsfunktionen durch die Errichtung des Endlagerbergwerkes sowie durch die Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen in die Betrachtung mit einbezogen werden.

(5.23) die erreichten Erkenntnisse zusammenzuführen und unter Zugrundelegung eines vorläufigen Endlagerkonzeptes einen Sicherheitsnachweis vorzulegen.

Planung und Auslegung

Der Antragsteller hat

(5.24) die Planung und Auslegung des Endlagers auf Basis der Anforderungen aus dem Sicherheitskonzept vorzunehmen.

(5.25) ein Konzept zur Errichtung und zum Betrieb des Endlagers zu entwickeln, das den Sicherheitsanforderungen für die Betriebsphase und den relevanten Anforderungen der Langzeitsicherheit genügt.

(5.26) ein Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerbergwerk zu entwickeln und zu planen, das den Anforderungen der Langzeitsicherheit genügt.

(5.27) ein Stilllegungskonzept zu entwickeln, das den Anforderungen der Langzeitsicherheit genügt.

(5.28) unter Zugrundelegung des Sicherheitskonzeptes einen Sicherheitsnachweis vorzulegen. Dieser muss auch die Umsetzbarkeit des Sicherheitskonzeptes darlegen.

Errichtung und Betrieb

Der Antragsteller hat

(5.29) Sorge dafür zu tragen, dass das Endlager entsprechend den Vorgaben der Genehmigung errichtet und betrieben wird. Die Umsetzung und Einhaltung der Genehmigungsbedingungen ist zu dokumentieren.

(5.30) die Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten der Betriebsführung festzulegen. Er hat den Betrieb geeignet zu strukturieren, und die für den sicheren Betrieb der Anlage erforderlichen finanziellen, personellen und organisatorischen Voraussetzungen zu schaffen und nachzuweisen.

(5.31) in einem Zechenbuch/Betriebshandbuch eindeutige technische Sicherheitsspezifikationen und Arbeitsanweisungen für alle sicherheitstechnischen oder arbeitsmäßig bedeutsamen Betriebsvorgänge, für die Beherrschung von Störfällen und die Beseitigung von Störfallfolgen festzulegen und im Betrieb einzuhalten.

(5.32) für die Inbetriebnahme des Endlagers ein Inbetriebsetzungsprogramm festzulegen, das die Schritte der Inbetriebnahme, durchzuführende Inbetriebsetzungsprüfungen und erforderliche Tests sowie Kalterprobungen definiert. Erforderliche wiederkehrende Prüfungen sind in einem Prüfhandbuch festzulegen.

(5.33) den Betrieb des Endlagers dahingehend zu überwachen, dass sicherheitstechnisch bedeutsame Störungen des Betriebes und Störfälle zuverlässig erkannt und die im Zechenbuch/Betriebshandbuch niedergelegten Gegenmaßnahmen ergriffen werden können. Das Betriebsgeschehen ist zu dokumentieren. Der Antragsteller hat Sorge dafür zu tragen, dass Störungsmeldungen zentral erfasst und dokumentiert werden, über sicherheitstechnisch bedeutsame Ereignisse Buch geführt wird, meldepflichtige Ereignisse gemäß den entsprechenden Meldekriterien zur Anzeige gelangen, sicherheitsrelevante Erkenntnisse aus Inbetriebnahme, bestimmungsgemäßigem Betrieb (insbesondere bei Reparatur) und wiederkehrenden Prüfungen dokumentiert und in den diesbezüglichen Arbeitsanweisungen berücksichtigt werden.

(5.34) die Erfahrungen aus dem Betrieb des Endlagers systematisch auszuwerten und bei der weiteren Betriebsführung zu berücksichtigen.

(5.35) für Notfälle Notfallschutzpläne auszuarbeiten und an einer ständig besetzten Stelle im Betrieb verfügbar zu halten.

(5.36) neben den routinemäßigen Betriebs- und Strahlenschutzüberwachungsmaßnahmen ein Überwachungsprogramm für das in Betrieb befindliche Endlager zu planen und durchzuführen. Dieses Programm dient der Bestätigung der betrieblichen Auslegungsparameter, die in das Sicherheitskonzept und den Sicherheitsnachweis eingeflossen sind. Ergebnisse und Konsequenzen aus dem Überwachungsprogramm sind der zuständigen Behörde anzuzeigen.

(5.37) in Abstimmung mit der zuständigen Behörde wiederkehrende Sicherheitsnachweise vorzulegen, die insbesondere die während des Betriebs gewonnenen weiteren Erkenntnisse berücksichtigen. Sie dienen der Optimierung des Sicherheitskonzeptes und der Maßnahmen zur Stilllegung und des endgültigen Verschlusses des Endlagers.

Stilllegung und Verschluss des Endlagerbergwerks

Der Antragsteller hat

(5.38) Sorge dafür zu tragen, dass nach Beendigung des Einlagerungsbetriebs die Stilllegung sowie der Verschluss des Endlagerbergwerks gemäß den Anforderungen des optimierten Sicherheitskonzeptes erfolgen.

(5.39) Vorsorge dahingehend zu treffen, dass das Endlager jederzeit innerhalb weniger Jahre stillgelegt und verschlossen werden kann.

(5.40) einen abschließenden Sicherheitsnachweis vorzulegen.

(5.41) ein Dokumentationssystem zu entwickeln und zu installieren, in dem die mark-scheiderischen Daten des Endlagers, die gemäß Endlagerungsbedingungen vorzulegenden Daten der eingelagerten Abfallgebinde, ihre Anzahl und räumliche Verteilung im Endlager, die wesentlichen technischen Maßnahmen bei Errichtung und Betrieb des Endlagers, das Sicherheitskonzept für die Stilllegung und den Verschluss und die Phase nach Verschluss des Endlagers sowie die umweltrelevanten Daten zu Beginn der Phase nach Verschluss des Endlagers dokumentiert werden. Er hat Sorge dafür zu tragen, dass vollständige Dokumentensätze räumlich getrennt an geeigneten Orten aufbewahrt werden und dass Informationssysteme entwickelt werden, die den Wissenserhalt über die Existenz des Endlagers für einen Zeitraum von mindestens 500 Jahren ermöglichen.

(5.42) Errichtung, Betrieb, Stilllegung und Verschluss des Endlagerbergwerks so durchzuführen und zu überwachen, dass in der Phase nach Verschluss kein Kontroll- und Überwachungsprogramm aus Sicherheitsgründen erforderlich ist. Umweltschutzmessungen und Geländevermessungen, die aufgrund anderer Regelungen erfolgen, können zur Vertrauensbildung herangezogen werden.

5.2 Zuständige Behörde

Die zuständige Behörde

(5.43) prüft, ob der vom Antragsteller vorgeschlagene Entwicklungsprozess des Endlagersystems dem Optimierungsgebot Rechnung trägt.

(5.44) definiert im Zusammenwirken mit dem Antragsteller die Schrittfolge und Haltepunkte (Kapitel 5.1), zu denen das Projekt und die darin gewonnenen Erkenntnisse im Hinblick auf das Projektziel bewertet und Entscheidungen über den weiteren Projektverlauf getroffen werden.

(5.45) prüft die zu den jeweiligen Verfahrensschritten vom Antragsteller vorgeschlagenen Entscheidungen über zu verfolgende Optimierungsoptionen sowie die umfassenden Sicherheitsnachweise im Hinblick auf die geforderte Sicherheit und das zu erreichende Projektziel und trifft die erforderlichen Entscheidungen (Genehmigungen).

(5.46) hat Sorge dafür zu tragen, dass die zur Bewältigung ihrer Aufgaben erforderlichen Kompetenzen jederzeit verfügbar sind.

(5.47) betreibt zur Erfüllung ihrer Aufgaben eine vom Antragsteller unabhängige Forschung zur Endlagersicherheit.

(5.48) hat Maßnahmen zu ergreifen, damit das Wissen über die Existenz des Endlagers bei beabsichtigten Tätigkeiten am Standort zur Kenntnis gelangt.

6 Sicherheitskonzept

(6.1) Zentrale Sicherheitsfunktion des Endlagersystems in allen Phasen der Endlagerentwicklung ist die Isolation der hochradioaktiven Abfälle.

(6.2) Zur Isolation der hochradioaktiven Abfälle ist ein Sicherheitskonzept nach Stand von Wissenschaft und Technik zu konzipieren und zu realisieren, welches die Einhaltung der Sicherheitsprinzipien und der Schutzziele für alle Phasen der Endlagerentwicklung gewährleistet.

(6.3) Das Sicherheitskonzept muss alle folgenden Anforderungen erfüllen, so dass die Sicherheit während der Betriebsphase sowie in der Phase nach Verschluss des Endlagers erreicht wird.

6.1 Grundanforderungen

(6.4) Zur sicheren Einhaltung der Schutzziele in der Phase nach Verschluss des Endlagers müssen die hochradioaktiven Abfälle in einem Endlagersystem dauerhaft und wartungsfrei isoliert werden.

(6.5) Die vollständige und zuverlässige Isolation der hochradioaktiven Abfälle in einem Endlagersystem ist maßgeblich durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Verbund mit den Verschlussbauwerken des Endlagers sicherzustellen.

(6.6) Der einschlusswirksame Gebirgsbereich sowie der Verschluss müssen über Eigenschaften derart verfügen, dass die Isolation über einen Zeitraum von mindestens einer Million Jahren sichergestellt werden kann. Damit kann von der Erreichung der Ziele zum Schutz von Mensch und Umwelt ausgegangen werden, auch wenn sich die Entwicklungen von Biosphäre, Mensch und Gesellschaft über diese Zeiträume nicht prognostizieren lassen und demzufolge auch eine Nachweisführung mittels der Ableitung von Bewertungsgrößen für radiologische Konsequenzen (Dosis, Risiko) an Grenzen stößt.

(6.7) Das Endlagersystem muss robust sein im Hinblick auf seine zentrale Sicherheitsfunktion, d. h. die Sensitivität gegenüber Einfluss nehmenden Ereignissen und Prozessen sowie gegenüber Unsicherheiten muss klein sein.

(6.8) Das Endlagersystem muss die Sicherheit durch ein System gestaffelter Abwehrmaßnahmen mit ihren Sicherheitsfunktionen sowohl für die Betriebsphase als auch in der Phase nach dem Verschluss des Endlagers gewährleisten. Im Hinblick auf realistischere anzunehmende Veränderungen muss das System von Sicherheitsfunktionen insgesamt ausreichende Sicherheitsreserven aufweisen.

(6.9) Der Planung und Auslegung des Endlagers müssen Art, Menge und Eigenschaften der einzulagernden hochradioaktiven Abfälle zugrunde liegen. Es sind die sicherheitsrelevanten Eigenschaften, insbesondere die Aktivität sicherheitsrelevanter Radionuklide, festzulegen.

(6.10) Der Auslegung des Endlagersystems müssen standortspezifische Sicherheits- und Sensitivitätsanalysen zugrunde liegen. Mit Hilfe der Sicherheitsanalysen sollen Anforderungen an Komponenten und Teilsysteme erkannt und festgelegt werden.

(6.11) Im Sicherheitskonzept ist darzulegen und zu begründen, welche Betriebsstörungen und Störfälle im Endlager auftreten können. Die Entscheidung, welche Ereignisse als Auslegungsstörfälle im Sinne des § 49 StrlSchV zu bewerten sind, hat sich insbesondere an den Ergebnissen der Sicherheitsanalyse und an den Auswirkungen in der Umgebung des Endlagers zu orientieren. Es ist darzulegen gegen welche Störfälle das Endlagersystem ausgelegt ist. Menschliches Fehlverhalten ist bei der Analyse der Störfallmöglichkeiten zu berücksichtigen.

(6.12) Ereignisse, die wegen ihrer geringen Eintrittshäufigkeit nicht als Auslegungsstörfälle einzustufen sind, sind zu bewerten und gegebenenfalls Maßnahmen zur Verringerung ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit und der Auswirkungen vorzuschlagen.

(6.13) Komponenten, die eine Sicherheitsfunktion im Endlagersystem ausüben, für die jedoch keine anerkannten Regeln der Technik vorliegen, müssen erprobt werden. Sofern eine Erprobung nicht realisierbar ist, müssen die Tauglichkeit technisch wissenschaftlich begründet und entsprechende Sicherheitsreserven vorgesehen werden.

(6.14) Die dem Sicherheitskonzept zugrunde liegenden technischen Barrieren sind im Hinblick auf die an sie gestellten Anforderungen zu charakterisieren. Die Umsetzung der Anforderungen ist darzulegen.

(6.15) Die Sicherheitsfunktionen der technischen Barrieren sind in einer Langzeitprognose unter Berücksichtigung der in der geologischen Langzeitprognose (Kapitel 6.2) ermittelten möglichen Entwicklungen des geologischen Barrierensystems zu beschreiben und zu bewerten. Es ist darzulegen, dass die Sicherheitsfunktionen der technischen Barrieren über die jeweils geforderten Zeiträume wirksam sind.

(6.16) Die Unterkritikalität der eingelagerten hochradioaktiven Stoffe ist für alle Phasen der Endlagerentwicklung sicherzustellen.

(6.17) Maßnahmen zur Vermeidung menschlicher Tätigkeiten, die das Isolationsvermögen des Endlagersystems nachteilig beeinflussen können, oder zur Verminderung der Auswirkungen dieser Tätigkeiten müssen angemessen auch mit Blick auf den Ressourcenschutz berücksichtigt werden.

(6.18) Die Sicherheit des Endlagersystems in der Phase nach Verschluss des Endlagers darf sich nicht auf Wartungs- und/oder Instandhaltungsmaßnahmen nach dem Verschluss abstützen.

6.2 Anforderungen an den Standort

(6.19) Das Wirtsgestein muss Eigenschaften aufweisen, die das Auffahren eines Endlagerbergwerks erlauben und die sichere Nutzung von untertägigen Hohlräumen unter Berücksichtigung der besonderen Anforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle ermöglichen.

(6.20) Das Endlager soll zum Schutz vor den Auswirkungen zukünftiger Standortentwicklungen, wie etwa Eisüberfahrungen oder Hebungen mit Erosion, in einer ausreichenden Tiefe liegen, so dass die Sicherheitsfunktion des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Nachweiszeitraum nicht beeinträchtigt wird.

(6.21) Der Standort muss weit von den Bereichen starker tektonischer Aktivitäten bzw. ausgeprägter geothermischer Besonderheiten entfernt sein, so dass das Isolations-

vermögen des Endlagersystems nicht gefährdet wird. Die tektonischen Verhältnisse des Standortes und seiner Umgebung müssen so beschaffen sein, dass geodynamische Ereignisse wie Verwerfungen, Faltungen, seismische Aktivitäten und Vulkanismus entweder nicht mit einer Intensität zu erwarten sind, die das Isolationsvermögen des Endlagersystems gefährdet, oder eine vernachlässigbar geringe Eintrittswahrscheinlichkeit haben.

(6.22) Der Standort muss eine gute Prognostizierbarkeit der langfristigen Entwicklung der Standortverhältnisse und Standorteigenschaften erlauben. Die Dynamik der geologischen Prozesse, denen der Standort heute unterliegt und in der Vergangenheit unterlegen hat, muss soweit überschaubar sein, dass daraus eine geowissenschaftliche Langzeitprognose für den Standort und insbesondere für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Hinblick auf seine Sicherheitsfunktion für den geforderten Nachweiszeitraum von 1 Million Jahren (Kapitel 7.3.1) abgeleitet werden kann. Dabei muss die geowissenschaftliche Langzeitprognose die möglichen zukünftigen Entwicklungen des geologischen Barrierensystems und seiner Sicherheitsfunktionen aufgrund von inneren und äußeren Ursachen identifizieren, beschreiben und im Hinblick auf die Sicherheit bewerten. Die Beeinflussung des geologischen Barrierensystems und seiner Sicherheitsfunktionen durch die Errichtung des Endlagerbergwerkes sowie durch die Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen muss in die Betrachtung mit einbezogen werden.

(6.23) Die geochemischen Verhältnisse im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollen dazu beitragen, die potenzielle Freisetzung von Schadstoffen aus dem Endlager zu begrenzen. Mögliche Mineralreaktionen unter dem Einfluss der vorgesehenen Abfallgebinde sowie der weiteren eingebrachten Stoffe sind dabei zu berücksichtigen.

6.3 Anforderungen an die Abfälle und Behälter

(6.24) Hochradioaktive Abfälle sind in fester oder verfestigter Form einzulagern.

(6.25) Die sicherheitsanalytisch abgeleiteten Temperaturbegrenzungen, resultierend aus den Auslegungsanforderungen an das Endlagerbergwerk und das Wirtsgestein, müssen eingehalten werden. Hierzu sind im Hinblick auf die Zerfallswärme entweder die Konzentration von Radionukliden im Abfallprodukt zu begrenzen oder die Anordnung der Abfallgebinde im Endlagerbergwerk entsprechend zu planen.

(6.26) Für die hochradioaktiven Abfälle ist ein Behälterkonzept zu realisieren, dass im Verbund mit den einschlusswirksamen Eigenschaften des Wirtsgesteins den hermetischen Einschluss dieser Abfälle am Einlagerungsort für den Zeitraum von 1000 Jahren sicherstellt.

6.4 Anforderungen an die Errichtung des Endlagerbergwerkes

(6.27) Den sicherheitstechnischen Anforderungen eines Endlagerbergwerks entsprechend sind folgende zusätzliche über die Belange eines konventionellen Bergwerks hinausgehende Gesichtspunkte zu beachten.

(6.28) Die Schachtansatzpunkte sind unter Beachtung der geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten sowie der gebirgsmechanischen Eigenschaften des Deckgebirges/Nebengesteins und der Endlagerformation festzulegen. Hierbei sind die Anforderungen, die an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich gestellt werden, zu berücksichtigen. Der Schachtausbau hat sicherzustellen, dass ein unbeherrschbarer Wassereintrich durch den Schacht in der Zeit bis zu seinem Verschluss ausgeschlossen werden kann.

(6.29) Alle offenen Grubenbaue müssen so hergestellt werden, dass ihre Standsicherheit und das Isolationsvermögen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gewährleistet ist. Über die bergrechtlichen Anforderungen hinaus müssen bei der Bemessung der Grubenbaue und Sicherheitsfesten die Anforderungen der Endlagerung berücksichtigt werden.

(6.30) Als Folge der Einlagerung hochradioaktiver Abfälle, z. B. Gas- und Wärmeentwicklung, darf die Standsicherheit der Grubenbaue und das Isolationsvermögen des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches auch nach Verfüllung und Verschluss nicht beeinträchtigt werden.

6.5 Anforderungen an den Endlagerbetrieb

(6.31) Über die Anforderungen aus Bergrecht, Strahlenschutz und konventioneller Sicherheit an die Betriebsphase hinaus gelten die im Folgenden aufgeführten Anforderungen.

6.5.1 Anforderungen an die Planung des Einlagerungsbetriebes

(6.32) Es sind nur solche hochradioaktiven Abfälle zur Endlagerung anzunehmen, welche den Endlagerungsbedingungen genügen. Der Nachweis über die Einhaltung der Endlagerungsbedingungen erfolgt in der Produktkontrolle.

(6.33) Das Endlager muss über einen Brandschutz in der Betriebsphase verfügen. Dieser ist sinngemäß nach dem kerntechnischen Regelwerk der Reihe KTA 2101 zu gestalten.

(6.34) Das Endlager ist so auszulegen, dass Explosionen ausgeschlossen sind.

(6.35) Einlagerungsbetrieb und Auffahrtbetrieb müssen zeitlich oder räumlich getrennt erfolgen. Eine sicherheitsrelevante Beeinträchtigung des Einlagerungsbetriebes durch sonstige Betriebsvorgänge muss ausgeschlossen werden.

(6.36) Das Endlagerbergwerk ist in Einlagerungsfelder mit einzelnen Einlagerungsbereichen zu untergliedern. Die Anforderungen an die Einlagerungsfelder sind derart, dass sie unabhängig von der Nutzung nach den Vorgaben des Verfüll- und Verschlusskonzeptes sicher gegen das Grubengebäude verschlossen werden können. Vor Nutzung sind die Felder umfassend zu erkunden. Die Nutzung darf nur erfolgen, wenn die Befunde aus der Erkundung den Anforderungen an die Sicherheit in der Betriebsphase und in der Phase nach Verschluss des Endlagers nicht entgegenstehen. Nach Nutzung oder im Falle der Nichtnutzung sind die Felder gegen das offene Bergwerk hin sicher abzuschließen. Die Einlagerungsfelder sind so zu verfüllen und zu verschließen, dass jederzeit die Stilllegungsphase für das gesamte Endlager eingeleitet werden kann und die Langzeitsicherheit gegeben ist.

(6.37) Die Anzahl der offenen Einlagerungsbereiche (Strecken, Kammern, Bohrlöcher) ist unter Beachtung einer betrieblich erforderlichen Vorhaltung und sicherheitstechnischen Vorgaben zu minimieren. Die Einlagerungsbereiche sind so kurzzeitig wie möglich offen zu halten und nach beendeter Nutzung nach den Vorgaben aus dem Verfüll- und Verschlusskonzept zu verschließen.

(6.38) Einrichtungen für Handhabung, Transport und Einlagerung der Abfallgebände sind so auszulegen, dass die Strahlenexposition des Betriebspersonals, der Bevölkerung und der Umwelt möglichst gering bleibt. Bei Störungen an diesen Einrichtungen

müssen die Abfallgebinde intakt bleiben. Bei Störfällen muss die Möglichkeit bestehen, deren Auswirkungen zu begegnen.

(6.39) Für Handhabung, Transport und Einlagerung ist die Isolation der Radionuklide durch die Abfallform und den Abfallbehälter zu gewährleisten. Sofern flüchtige Radionuklide unvermeidlich aus den Abfallgebänden austreten, sind entsprechende Strahlenschutzmaßnahmen zum Schutz des Betriebspersonals, der Bevölkerung und der Umwelt vorzusehen.

6.5.2 Anforderungen an die Überwachung der Auslegungsparameter

(6.40) In der Betriebsphase wird ein Überwachungsprogramm zur Verifizierung der Werte der Auslegungsparameter, die in die Sicherheitsanalyse eingeflossen sind, durchgeführt. Insbesondere sind die thermomechanischen Reaktionen des Gebirges auf das Einbringen hochradioaktiver Abfälle oder auf geotechnische Maßnahmen sowie auf die gebirgsmechanischen Vorgänge zu verfolgen.

(6.41) Werden signifikante Abweichungen von den Auslegungsdaten bzw. prognostizierten Zuständen festgestellt, ist die Einlagerung zu unterbrechen. Ihre Auswirkungen auf die Sicherheit des Endlagerbergwerkes sind zu analysieren. Im Rahmen der Optimierung ist ggf. eine Modifizierung des Endlagerkonzeptes bzw. des weiteren Betriebes vorzusehen. Die Sachverhalte sind der zuständigen Behörde vorzulegen.

(6.42) Zur Verfolgung und Überprüfung der Entwicklung der Einlagerungsbereiche nach Einlagerung der hochradioaktiven Abfälle sind während der Betriebsphase in den jeweiligen Endlagerungsfeldern an ausgewählten Orten repräsentative Messprogramme vorzusehen und Auswertzeitpunkte festzulegen. Zur Bestätigung der in den Sicherheitsanalysen zur Anwendung gelangten Modellvoraussetzungen sind so weit als möglich gezielte Beobachtungen vorzunehmen.

(6.43) Ergebnisse aus dem Überwachungsprogramm sind im Hinblick auf die Optimierung des Sicherheitskonzeptes zu bewerten.

6.6 Anforderungen an Stilllegung und Verschluss des Endlagers

(6.44) Das Endlagerbergwerk ist nach Beendigung des Einlagerungsbetriebs stillzulegen. Die Stilllegungsmaßnahmen müssen zusammen mit den Verschlussmaßnahmen den zum Stilllegungszeitpunkt nach Stand von Wissenschaft und Technik erforderlichen Schutz vor Schäden erfüllen.

7 Nachweis der Sicherheit

7.1 Sicherheitsmanagement

(7.1) Antragsteller und zuständige Behörde haben darzulegen, dass sie die Anforderungen an das Sicherheitsmanagement erfüllen. Der Antragssteller führt dies im Rahmen des schrittweise zu entwickelnden Sicherheitsnachweises aus.

7.2 Sicherheit in der Betriebsphase

(7.2) Der Antragsteller hat zu den jeweilig festgelegten Prozessschritten den Nachweis der Sicherheit für die Betriebsphase des Endlagers in einem umfassenden Sicherheitsnachweis zu führen. Dieser Sicherheitsnachweis muss insbesondere die Umsetzung der Anforderungen zum Sicherheitsmanagement und Sicherheitskonzept darstellen und belegen.

7.3 Sicherheit in der Phase nach Verschluss des Endlagers

(7.3) Der Antragsteller hat zu den jeweilig festgelegten Prozessschritten den Nachweis der Langzeitsicherheit des Endlagers zu führen. Der Nachweis muss zu jedem Prozessschritt umfassend, transparent und nachvollziehbar geführt werden.

(7.4) Der Nachweis der Sicherheit in der Phase nach Verschluss des Endlagers kann nicht im streng wissenschaftlichen Sinn geführt werden, da sich die potenziellen Konsequenzen aus der Implementierung des Endlagers einer messtechnischen Überprüfung oder Verifizierung aufgrund der langen zu betrachtenden Zeiträume entziehen. Der Langzeitsicherheitsnachweis kann jedoch durch die Zusammenführung aller Argumente und Analysen zur Begründung der Sicherheit des Endlagersystems sowie zum Vertrauen in die Sicherheitsaussage (siehe Anhang) erbracht werden.

7.3.1 Elemente des Langzeitsicherheitsnachweises

(7.5) Im Langzeitsicherheitsnachweis muss dargelegt werden, dass die zu seiner Führung erforderlichen wissenschaftlichen und technischen Kenntnisse vorliegen. In ihm sind die Argumente und Analysen aus der Planung und Auslegung sowie aus den Einzelbewertungen zur Begründung der Sicherheit des Endlagersystems sowie zum Vertrauen in den Nachweis zusammenzuführen. Insbesondere sind dies die geowissenschaftlichen, geotechnischen, hydrogeologischen, radiologischen, umweltchemischen und technischen Argumente und Analysen und ggf. Einzelnachweise. Basis des Sicherheitsnachweises sind die Erkenntnisse aus der Standortcharakterisierung, der geowissenschaftlichen Langzeitprognose, der Prognose für technische Komponenten sowie den Langzeitsicherheitsanalysen. Die Ergebnisse der Langzeitsicherheitsanalysen werden zum Nachweis der Einhaltung der in Kapitel 4 enthaltenen Sicherheitsprinzipien und Schutzziele herangezogen.

(7.6) Die Argumente und Analysen resultieren insbesondere aus der Darstellung und Begründung des Sicherheitskonzeptes und seiner Realisierung im Endlagersystem sowie der Umsetzung der Anforderungen an das Sicherheitsmanagement mit Schwerpunkten auf:

- (7.7) der Standortcharakterisierung
- (7.8) der geowissenschaftlichen Langzeitprognose, in der die zeitliche Entwicklung des Endlagersystems und insbesondere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Hinblick auf seine langzeitige Isolation untersucht und analysiert wird
- (7.9) der Charakterisierung der technischen Barrieren und ihrer Langzeitprognose
- (7.10) dem Nachweis der Gewährleistung der Unterkritikalität
- (7.11) der Darstellung und Analyse des langfristigen Verhaltens des Endlagersystems sowie seiner Teilsysteme und der jeweiligen Sicherheitsfunktionen zur Bestätigung des Sicherheitskonzeptes (quantitative Systemanalyse)
- (7.12) dem Nachweis der Einhaltung der Sicherheitsprinzipien und Grundsätze für die Endlagerung und der Schutzziele für die Phase nach Verschluss mit Hilfe von Langzeitsicherheitsanalysen für den geforderten Nachweiszeitraum auf der Basis der postulierten Entwicklungen des Endlagersystems aus inneren oder äußeren Ursachen, unter Berücksichtigung der bestehenden jeweiligen Unsicherheiten wie

den Szenarien-, Daten- und Modellunsicherheiten sowie unter Darstellung der Robustheit und des Isolationsvermögens des Endlagersystems

- (7.13) der Bewertung der Sicherheit des Endlagersystems, des Isolationsvermögens des Endlagersystems sowie der Bewertung von Systemeigenschaften durch Verwendung von Indikatoren

7.3.2 Zeitraum für den Langzeitsicherheitsnachweis

(7.14) Der Langzeitsicherheitsnachweis ist für den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren zu führen.

7.3.3 Langzeitsicherheitsanalysen

(7.15) Die Langzeitsicherheitsanalyse muss die Szenarientwicklung und die Konsequenzenanalyse zum Nachweis der Einhaltung der Schutzziele umfassen. Der Konsequenzenanalyse sind Szenarien aus der Szenarientwicklung zugrunde zu legen. Strategie und Methodik der Analysen sind darzulegen.

Szenarientwicklung

(7.16) Es ist eine Szenarientwicklung für das Endlagersystem durchzuführen. Hierbei sind die nach naturwissenschaftlichen Erkenntnissen möglichen Entwicklungen des Endlagersystems, welche ihre Ursache in endogenen und exogenen Prozessen haben, zu betrachten und die für den Langzeitsicherheitsnachweis relevanten Szenarien - mit Ausnahme menschlichen Eindringens in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich - zu identifizieren.

(7.17) Die Szenarientwicklung muss transparent und nachvollziehbar dokumentiert werden. Die Einzelschritte müssen dabei begründet und wesentliche Entscheidungen nachvollziehbar dargestellt werden.

(7.18) In Kenntnis um das verschlossene Endlager erfolgte menschliche Tätigkeiten bleiben bei der Szenarientwicklung außer Betracht. Diese werden in die Verantwortung der jeweils handelnden Gesellschaft gestellt.

(7.19) Zur Bewertung der Langzeitsicherheit sind die Szenarien folgenden Szenarienklassen zuzuordnen und die Zuordnung zu begründen:

- (7.20) wahrscheinliche Szenarien: Szenarien, deren Eintreten im Nachweiszeitraum von 1 Million Jahren eine hohe Wahrscheinlichkeit zuzuordnen ist,
- (7.21) weniger wahrscheinliche Szenarien: Szenarien, deren Eintreten im Nachweiszeitraum von 1 Million Jahren eine wesentlich geringere Eintrittswahrscheinlichkeit zuzuordnen ist als den wahrscheinlichen Szenarien,
- (7.22) nicht weiter zu betrachtende Szenarien: Szenarien, deren Eintreten eine sehr kleine Eintrittswahrscheinlichkeit zuzuordnen ist oder bei denen die primären Auswirkungen des auslösenden Ereignisses die Sekundärfolgen durch das Endlager bei weitem übersteigen, wie etwa der Einschlag eines großen Meteoriten.

(7.23) Szenarien mit ähnlich ablaufenden Entwicklungen dürfen zu Szenariengruppen zusammengefasst und durch ein repräsentatives Szenarium abgebildet werden. Voraussetzung hierfür ist, dass die Auswirkungen aus dem repräsentativen Szenarium auf die Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems abdeckend für die Gruppe sind. Wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Szenarien dürfen nicht in einer Gruppe zusammengefasst werden.

(7.24) Szenarien, die der Klasse der 'nicht weiter zu betrachtenden Szenarien' zuzuordnen sind, brauchen nicht weiter behandelt zu werden.

Konsequenzenanalysen

(7.25) Die Ermittlung der Konsequenzen aus der Einlagerung hochradioaktiver Abfälle, d. h. die potenzielle Freisetzung und Migration von Schadstoffen im Endlagersystem, muss für alle repräsentativen Szenarien erfolgen.

(7.26) Die Konsequenzenanalyse muss auf der Basis naturwissenschaftlicher Methoden durchgeführt werden. Es sind konzeptionelle Modelle zu entwickeln und soweit möglich in mathematische Rechenverfahren umzusetzen. Es ist darzulegen, dass die in der Konsequenzenanalyse angewendeten Methoden und Rechenprogramme sowohl die konzeptionellen Modelle als auch das Endlagersystem und seine Teilsysteme adäquat beschreiben. Die Qualifizierung für den Anwendungsbereich ist nachzuweisen.

Zur Behandlung der wesentlichen Datenunsicherheiten sind Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen durchzuführen.

Daten

(7.27) Die zum Nachweis der Langzeitsicherheit benötigten Daten müssen grundsätzlich standortspezifisch sein. Bei Daten, die nicht am Standort erhoben wurden, ist der Standortbezug zu belegen.

7.3.4 Einhaltung der Schutzziele

Wahrscheinliche Szenarien

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

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

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

- (7.33) Radiotoxizität der aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzten Radionuklide
- (7.34) Veränderung der Aktivitätskonzentration von Radionukliden im oberflächennahen Grundwasser
- (7.35) Effektive Individualdosis

(Nachweisstrategie, Kriterien und Bewertungsmaßstäbe, die in einer Leitlinie konkretisiert werden müssen, sind im Anhang dargestellt)

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

Weniger wahrscheinliche Szenarien

(7.37) In der Konsequenzenanalyse für die weniger wahrscheinlichen Szenarien werden die Konsequenzen - aufgrund migrierter Radionuklide - in den jeweiligen Teilsystemen ermittelt. Als Bewertungsmaßstab werden die Bedingungen und Konsequenzen herangezogen, die sich aufgrund natürlicher, vom Endlager nicht beeinflusster Verhältnisse ermitteln lassen. Die Anforderungen an die Isolation gelten als erfüllt, wenn die ermittelten Konsequenzen aufgrund der aus dem Endlager freigesetzten Radionuklide nicht größer sind als diejenigen, welche sich aufgrund natürlicher, vom Endlager nicht beeinflusster Bedingungen ergeben (siehe Anhang).

Unsicherheitsanalysen

Für die Kriterien in beiden Szenarienklassen gilt darüber hinaus:

(7.38) Sowohl für die wahrscheinlichen als auch für die weniger wahrscheinlichen Szenarien werden die Konsequenzen unter expliziter Berücksichtigung von Datenunsicherheiten ermittelt. Bei Verwendung von stochastischen Methoden ist das mit einem Konfidenzintervall von 95 % ermittelte 95-Perzentil des Indikators für die Bewertung der Ergebnisse heranzuziehen.

(7.39) Die Unsicherheitsanalysen sollen nicht auf die bei der Indikatorberechnung verwendeten standardisierten Modelle (siehe Anhang) angewendet werden.

Weitere Indikatoren und Analoga

(7.40) Zur Bewertung und Untermauerung der Langzeitsicherheit eines Endlagersystems sollen weitere Indikatoren herangezogen werden. Insbesondere sind Funktionsindikatoren zur Beurteilung von Teilsystemen standort- und endlagerkonzeptspezifisch zu entwickeln, Kriterien für ihre Bewertung abzuleiten und zur Anwendung zu bringen.

(7.41) Durch Vergleich mit analogen Größen in der Natur, am Standort selbst oder in ähnlichen geologischen Verhältnissen sollen Aussagen hinsichtlich der Robustheit des Endlagersystems sowie des Isolationsvermögens der betrachteten Teilsysteme ermöglicht werden. Werden aus der Betrachtung eines anderen Standortes Schlüsse auf bestimmte Eigenschaften oder Prozesse am Endlagerstandort gezogen, so muss im Langzeitsicherheitsnachweis die Analogie der beiden Standorte ausführlich diskutiert und belegt werden.

7.3.5 Unbeabsichtigtes menschliches Eindringen

(7.42) Ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Endlagersystem ist nach Verlust der Information über das Endlager in der ferneren Zukunft nicht ganz auszuschließen. Durch das Konzept des Konzentrierens und des Isolierens der hochradioaktiven Abfälle besteht im Falle menschlichen Eindringens das Risiko einer Strahlenexposition, das nur bedingt reduziert werden kann.

(7.43) Menschliches Eindringen in das Endlagersystem ist bei der Auswahl des Standortes und zur Erfüllung der Anforderungen im Sicherheitskonzept im Hinblick auf die Optimierung der Sicherheit zu behandeln.

- (7.44) Es wird ausschließlich das unbeabsichtigte menschliche Eindringen betrachtet.
- (7.45) Szenarien, die das beabsichtigte Eindringen des Menschen in das Barriersystem beschreiben, bleiben außer Betracht. Diese Eingriffe werden in die Verantwortung der jeweils handelnden Gesellschaft gestellt.

(7.46) Zur Bewertung des unbeabsichtigten Eindringens sind Referenzszenarien heranzuziehen. Die Referenzszenarien sind unter Berücksichtigung der Standortverhältnisse, der heutigen gesellschaftlichen Bedingungen in Deutschland sowie des heutigen

Standes von Wissenschaft und Technik zu analysieren und zu bewerten. In diese Bewertung sind die Anzahl der betroffenen Personen, das räumliche und zeitliche Ausmaß einer möglichen Kontamination und die Möglichkeit der Reduzierung der Auswirkungen durch planerische Gegenmaßnahmen einzubeziehen.

(7.47) Es muss gezeigt werden, dass bei der Planung und Auslegung alle praktikablen Gegenmaßnahmen getroffen worden sind.

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

7.3.6 Dokumentation des Langzeitsicherheitsnachweises

(7.49) Die Dokumentation des Langzeitsicherheitsnachweises muss umfassend, transparent und nachvollziehbar die Zusammenführung der Argumente und Analysen zur Begründung der Sicherheit des Endlagersystems sowie zum Vertrauen in die Sicherheitsaussage des Nachweises enthalten.

Anhang

Der Nachweis der Sicherheit in der Phase nach Verschluss des Endlagers kann nicht im streng wissenschaftlichen Sinn geführt werden, da sich die potenziellen Konsequenzen aus der Implementierung des Endlagers einer messtechnischen Überprüfung oder Verifizierung aufgrund der langen zu betrachtenden Zeiträume entziehen. Der Langzeitsicherheitsnachweis kann jedoch durch die Zusammenführung aller Argumente und Analysen zur Begründung der Sicherheit des Endlagersystems sowie zum Vertrauen in die Sicherheitsaussage (Safety Case) erbracht werden. Der Langzeitsicherheitsnachweis muss deshalb auf der genauen und richtigen Erfassung aller sicherheitstechnisch relevanten Eigenschaften des Endlagersystems, der umfassenden Kenntnis über die zukünftig möglicherweise ablaufenden relevanten Prozesse und Ereignisse, dem umfassenden Verständnis dieser Prozesse und Ereignisse, deren Umsetzung in adäquate Modelle, der korrekten Wiedergabe der Modelle durch Rechenprogramme und einer methodisch aussagekräftigen Bewertung der berechneten Konsequenzen erfolgen. Die Bewertungsmethodik muss die Unsicherheit in den Daten, Prozessen, Modellen und Rechenprogrammen sowie die Robustheit und Sicherheitsreserven des Endlagersystems berücksichtigen.

Aus diesem Grunde sind die „Sicherheitsanforderungen“ formuliert worden. Insbesondere gelten an die Langzeitsicherheitsanalysen hohe Anforderungen wie

- die Erhebung der Daten (Standorterkundung, Experimente, Forschung und Entwicklung),
- die Gewährleistung der Anforderungen an technische und geotechnische Barrieren,
- die Ermittlung der sicherheitsrelevanten Prozesse und Ereignisse – Szenarientwicklung (natürliche und technische Analoga, standort- und anlagenspezifische Forschung),
- die naturwissenschaftliche Beschreibung dieser Prozesse und Ereignisse (Grundlagenforschung, natürliche Analoga, Experimente, in situ-Versuche),
- die Umsetzung in adäquate Modelle,
- die Qualifizierung der Modelle (natürliche Analoga, Experimente, in situ-Versuche, Reviews) und der zugehörigen Rechenprogramme,
- die qualifizierte Behandlung des Problems sowie der Bewertung durch Argumente und Analysen

zu stellen.

Die Bewertung der potenziellen Konsequenzen bedarf einer Methodik, die auf unterschiedlichen und voneinander unabhängigen Indikatoren und entsprechenden Kriterien beruht, wie etwa der Indikatoren zur Bewertung des Endlagersystems als auch der Funktionsindikatoren für die Teilsysteme und deren Funktionen. Sie muss die Fehlerträchtigkeiten des Endlagersystems in den Phasen der Erkundung, der Errichtung und des Betriebs sowie die Unsicherheiten in Daten, Prozessen und Modellen berücksichtigen. Weiterhin sind die Sicherheitsreserven des Endlagersystems in die Bewertung einzubeziehen.

Strategie zum Nachweis der Isolation

Ausgehend von der Definition der Isolation ist zur Demonstration der sicheren Einhaltung der Schutzziele der Nachweis zu führen, dass die Isolation im Nachweiszeitraum gewährleistet werden kann. Dieser Nachweis muss umfassend im Langzeitsicherheitsnachweis (Safety Case) geführt werden. Die Konsequenzenanalyse erstreckt sich über den gesamten Nachweiszeitraum. In diesem kann das Endlagersystem vielfältigen Umwälzungen unterworfen sein.

Wissenschaftlich fundierte Prognosen über die Entwicklung und das Verhalten der jeweiligen Teilsysteme Endlager, Geosphäre und Biosphäre sind mit zunehmender Betrachtungszeit zunehmenden Unsicherheiten unterworfen. Eine wesentliche Anforderung an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ist, dass eine Prognose über seine Entwicklung und seine Eigenschaften, insbesondere sein Isolationsvermögen, über den gesamten Nachweiszeitraum möglich sein muss. Prognosen über die Entwicklung der Hydrosphäre und der Biosphäre sind nur für vergleichsweise kurze Zeiträume belastbar möglich. Insbesondere sind Prognosen über die Entwicklung des Menschen und der menschlichen Gesellschaft zeitlich stark begrenzt. Die Entwicklungen der oberflächennahen Teilsysteme des Endlagersystems sind zwar über viele tausende von Jahren prognostizierbar, der Prognosezeitraum ist jedoch auch hier deutlich kürzer als der Nachweiszeitraum. Die hydrogeologischen Verhältnisse im Deckgebirge des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs können aufgrund klimatischer Entwicklungen großen Umwälzungen unterliegen, so dass die Prognose jenseits eines Zeithorizonts von ca. 10^5 Jahren mit so großen Unsicherheiten behaftet ist, dass eine wissenschaftlich fundierte Charakterisierung dieses Teilsystems nicht mehr möglich ist. Hieraus folgt,

dass auch die Analyseergebnisse der Konsequenzenanalysen jenseits dieser Zeitmarken in den entsprechenden Teilsystemen mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind.

Unter Würdigung der Unsicherheit und unter Berücksichtigung der Anforderung an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ist es nahe liegend, das Endlagersystem zur Nachweisführung in die Teilsysteme Endlagerbergwerk, einschlusswirksamer Gebirgsbereich, Deck- und Nebengebirge, oberflächennahe Grundwassersysteme und Biosphäre zu gliedern und die in diesen Teilsystemen ermittelten charakteristischen Größen als Indikatoren für die Isolation heranzuziehen. Insbesondere muss bei der Entwicklung eines Bewertungssystems der Schwerpunkt auf die sicherheitsrelevanten Teilsysteme und deren charakteristische Größen gelegt werden, deren Entwicklungen sich über den gesamten Nachweiszeitraum prognostizieren lassen. Dagegen sind Indikatoren, die aus den Schutzziele in der Biosphäre abgeleitet werden, in Zeiträumen jenseits einiger hundert Jahre mit zu großen Unsicherheiten behaftet, um zu einer Sicherheitsbewertung herangezogen werden zu können.

Das bedeutet, dass auf Indikatoren zurückgegriffen werden muss, die eine Bewertung von Sachverhalten mit hoher Zuverlässigkeit erlauben. Daher wird der Nachweis geführt, dass die Isolation der Schadstoffe im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vollständig und zuverlässig gewährleistet ist, wodurch inhärent auch die Einhaltung der Sicherheitsprinzipien und Schutzziele garantiert werden kann.

Die Isolation ist dann gegeben, wenn die aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzten Schadstoffe die natürlich vorliegende Situation im Umfeld des Endlagers nicht wesentlich verändern. Zur Bewertung der Isolation werden Bewertungsmaßstäbe für die Indikatoren aus den natürlich vorliegenden Bedingungen in den Teilsystemen abgeleitet. Die Kriterien zur Bewertung der Isolation formulieren für jeden Indikator den jeweils zulässigen Beitrag zur natürlich vorhandenen Situation.

Eine mögliche Freisetzung künstlicher, also nicht in der Natur vorkommender Radionuklide kann jedoch nicht durch einen direkten Vergleich mit in der Umgebung des Endlagers vorkommenden Nukliden bewertet werden. Für diese Bewertung werden die Leistungsdichte und die Radiotoxizität des Radionuklidstroms als indirekte Bewertungsgrößen und Bewertungsmaßstäbe herangezogen.

Darüber hinaus werden im Folgenden weitere Indikatoren „Veränderung der Aktivitätskonzentration von Radionukliden im oberflächennahen Grundwasser“ und „effektive

Individualdosis“ formuliert, die aber hinsichtlich ihrer Belastbarkeit mit zunehmender Betrachtungszeit mit großen Unsicherheiten behaftet sind.

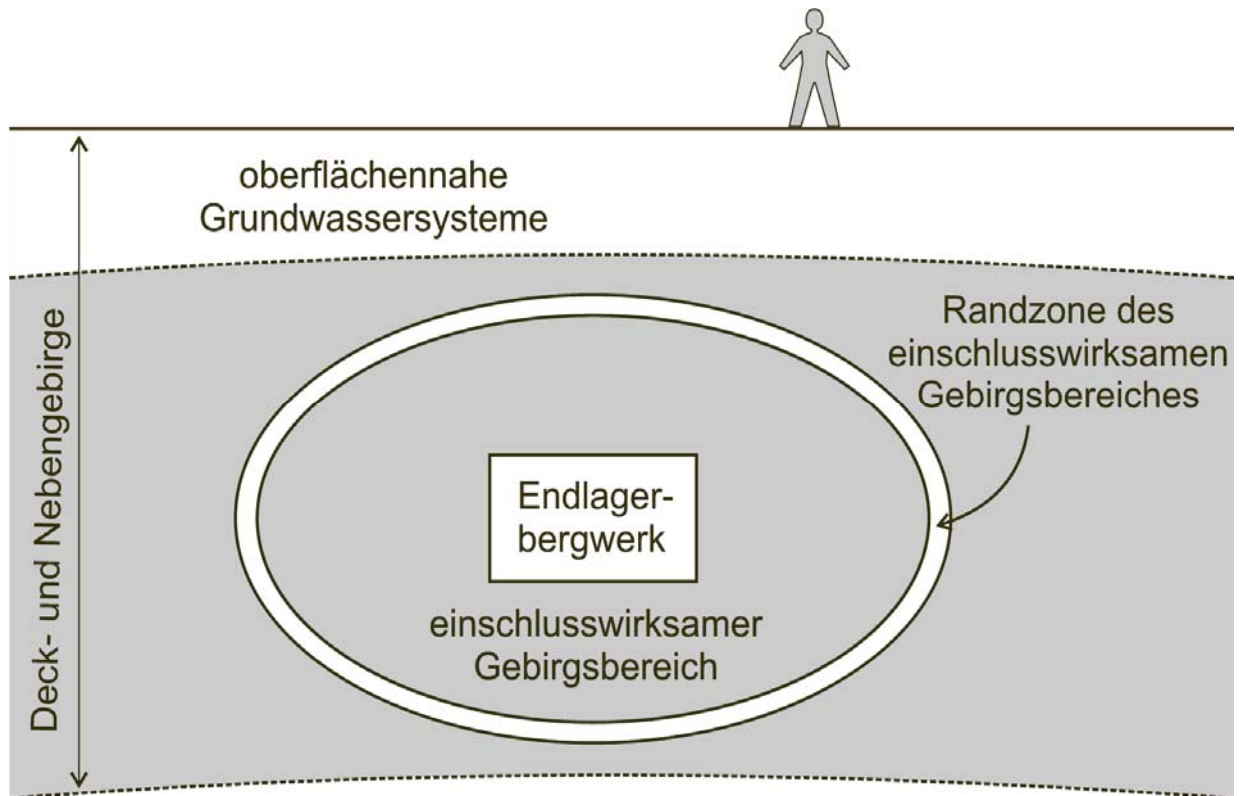


Bild 1: Prinzipbild des Endlagersystems mit Teilsystemen

Vorgehensweise:

Die nachfolgenden Indikatoren und Kriterien sollen zur Anwendung gelangen.

a) Wahrscheinliche Szenarien

Für wahrscheinliche Entwicklungen (Szenarien) des Endlagersystems dürfen allenfalls geringfügige Mengen an Schadstoffen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzt werden, so dass es zu keiner nachteiligen Veränderung von Boden und Wasser und damit zu keinen relevanten Risiken für Mensch und Umwelt kommt.

Indikator Rückhaltung von Schadstoffen im Endlager

Dieser Indikator gibt Aufschluss über die Isolationswirkung des Endlagers (Endlagerbergwerk plus einschlusswirksamer Gebirgsbereich), indem dargestellt wird, dass lediglich ein Bruchteil der eingelagerten Radionuklidmenge den einschlusswirksamen Gebirgsbereich verlässt und das Endlager seiner Aufgabe gerecht wird. Als ein Maß für die Isolation des Endlagers wird der im Nachweiszeitraum aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzte Anteil der eingelagerten Radionuklide bezogen auf die gesamt eingelagerte Radionuklidmenge herangezogen.

⇒ *Die im Nachweiszeitraum im einschlusswirksamen Gebirgsbereich zurückgehaltene Schadstoffmenge bezogen auf die eingelagerte Schadstoffmenge muss größer als 99,99 mol-% sein.*

Indikator Veränderung der Konzentration der Elemente Uran und Thorium in der Randzone des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Die Sicherheitsfunktion des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs als einem Teilsystem des Endlagers besteht in der Radionuklidrückhaltung. Wird der einschlusswirksame Gebirgsbereich durch poröse Gesteine gebildet, welche die Migration von Radionukliden erlauben, so lassen sich aus der Konzentration der migrierten Radionuklide der Elemente Uran und Thorium vom Ort der Einlagerung bis hin in den Randbereich, der den Übergang vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich in das Deck- und Nebengebirge markiert, Schlüsse auf das Isolationsvermögen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ziehen. Als Bewertungsmaßstab wird die mittlere in tiefen Grundwässern gemessene Konzentration der Elemente Uran und Thorium herangezogen.

⇒ *Zur Bewertung der Isolation der Schadstoffe im einschlusswirksamen Gebirgsbereich wird die Veränderung der Konzentration der Elemente Uran und Thorium in der Randzone des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs herangezogen. Isolation ist gewährleistet, wenn im Laufe des Nachweiszeitraums der Beitrag der migrierten Elemente Uran und Thorium aus dem Endlager in die Randzone des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs lediglich zu einer Erhöhung der Konzentration im Porenwasser um 1 µg/l für U-gesamt und 0,1 µg/l für Th-gesamt führt.*

Indikator Beitrag zur Leistungsdichte aufgrund radioaktiver Strahlung im Porenwasser der Randzone des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch aus dem Endlagerbergwerk freigesetzte Radionuklide

Zur Bewertung der Belastung des Umweltmediums Grundwasser aufgrund der Freisetzung von Radionukliden aus dem Endlager werden die in der Randzone des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eingetragenen Radionuklide hinsichtlich ihres Beitrags zur natürlich vorliegenden Leistungsdichte bilanziert. Als Bewertungsmaßstab wird die natürlich vorhandene Leistungsdichte herangezogen, welche sich durch die natürliche Strahlung aufgrund des radioaktiven Zerfalls der Radionuklide in der Gesteinsmatrix und im Porenwasser ergibt. Die natürliche Leistungsdichte für ein Tonsteinsystem wurde mit 1,0 MeV/l Porenwasser abgeschätzt.

⇒ *Der Beitrag zur Leistungsdichte im Porenwasser der Randzone des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs aufgrund der aus dem Endlager migrierten Radionuklide darf maximal 0,1 MeV/l Porenwasser betragen.*

Indikator Radiotoxizität der aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzten Radionuklide

Zur Bewertung der Isolation des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wird der Indikator Radiotoxizität der aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich in das Deck- und Nebengestein freigesetzten Radionuklide herangezogen. Hierbei wird von den Effekten des Deck- und Nebengebirges sowie der Grundwasserleiter (z. B. Rückhaltung) kein Kredit genommen. Zur Ermittlung der Radiotoxizität des Radionuklidstroms wird der Radionuklidstrom aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich in das Deck- und Nebengebirge mit Hilfe der Rechenvorschrift zur Ermittlung des Indikators effektive Individualdosis errechnet.

⇒ *Die Radiotoxizität bestimmt sich aus der Division der berechneten Radionuklidströme (Bq/a) aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich in die Deckgebirgsschichten durch den jährlichen Wasserbedarf der kritischen Gruppe und Multiplikation mit den Dosiskonversionsfaktoren aus den Analysen zum „Indikator effektive Individualdosis“. Die so nach der Rechenvorschrift zur Ermittlung einer jährlichen Individualdosis errechnete Radiotoxizität muss für die Gruppe der wahrscheinlichen Szenarien einen Wert kleiner als 0,1 mSv/a aufweisen.*

Indikator Veränderung der Aktivitätskonzentration von Radionukliden im oberflächennahen Grundwasser

Für Radionuklide, die auch im vom Endlager unbeeinflussten Grundwasser anzutreffen sind, gilt: Eine Konzentrationserhöhung dieser Gruppe von Radionukliden aufgrund der Freisetzung aus dem Endlager in das oberflächennahe Grundwasser darf zu keiner wesentlichen Belastung für Mensch und Umwelt führen. Der Bewertungsmaßstab orientiert sich an der Schwankungsbreite der in Deutschland großräumig anzutreffenden Gegebenheiten.

Aufgrund beschränkter Prognostizierbarkeit der hydrogeologischen Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge nach eiszeitlicher Umgestaltung des Standortes müssen für die Zeiträume nach diesen Ereignissen die heutigen hydrogeologischen Verhältnisse unterstellt oder andere plausible Annahmen zur Hydrogeologie getroffen werden.

⇒ *Der rechnerisch ermittelte Eintrag an Radionukliden in das oberflächennahe Grundwasser darf für die im Folgenden aufgeführten Radionuklide nicht zu Aktivitätskonzentrationen führen, die größer sind als ein Zehntel der Mittelwerte für Trinkwasser in Deutschland.*

Radionuklid	mBq/l
• U 238	1,58
• U 234	1,83
• Ra 226	0,48
• Pb 210	0,57
• U 235	0,1
• Th 228	0,01
• Th 230	0,2
• Th 232	0,05

Indikator effektive Individualdosis

Aufgrund beschränkter Prognostizierbarkeit der hydrogeologischen Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge nach eiszeitlicher Umgestaltung des Standortes müssen für

die Zeiträume nach diesen Ereignissen die heutigen hydrogeologischen Verhältnisse unterstellt oder andere plausible Annahmen zur Hydrogeologie getroffen werden.

Den Konsequenzenanalysen wird ein Kollektiv an Menschen mit standardisierten Annahmen zu Lebensbedingungen und Lebensgewohnheiten zugrunde gelegt.

Den Konsequenzenanalysen wird ein standardisiertes Biosphärenmodell zugrunde gelegt.

Die kritische Gruppe besteht aus einem Kollektiv von 30 Menschen.

⇒ *Auf dieser Grundlage sind die in der Konsequenzenanalyse eines jeden repräsentativen Szenariums ermittelten Radionuklidkonzentrationen in der vom Menschen genutzten Biosphäre zur Bewertung heranzuziehen. Es ist zu zeigen, dass für jedes repräsentative Szenarium aus der Gruppe der wahrscheinlichen Szenarien die in der Konsequenzenanalyse errechnete mittlere Strahlenexposition für die Individuen der kritischen Gruppe unterhalb des Richtwertes von 0,1 mSv/a verbleibt.*

b) Weniger wahrscheinliche Szenarien

⇒ *Andere Szenarien, die nicht (z. B. aufgrund ihrer extrem geringen Eintrittswahrscheinlichkeit) von der Bewertung auszuschließen sind, dürfen Freisetzungen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufweisen, die allenfalls zu einem geringfügigen zusätzlichen Risiko für Mensch und Umwelt führen.*

Die Indikatoren und Kriterien sollen entsprechend zur Anwendung gelangen. Insbesondere für die Indikatoren „Radiotoxizität“ und „effektive Individualdosis“ gilt ein Richtwert von 1 mSv/a.