

Verabschiedet in der Reaktor-Sicherheitskommission in ihrer 357. Sitzung am 05.12.2002 und von der Strahlenschutzkommission in ihrer 182. Sitzung am 04.-06.12.2002

Gemeinsame Stellungnahme der RSK und der SSK betreffend BMU-Fragen zur Fortschreibung der Endlager-Sicherheitskriterien

5./6. 12. 2002

1 Beratungsauftrag und Beratungshergang

RSK und SSK wurden mit Schreiben des BMU, RS III 2 (A) – 17015/1 vom 26.03.2002, darüber informiert, dass das BMU beabsichtigt, im Jahre 2003 aktualisierte Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk herauszugeben.

Das BMU hatte vor dem Hintergrund der international und in Deutschland weitergegangenen Entwicklung auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle und bei der Beurteilung der Endlagersicherheit die GRS beauftragt, Vorschläge zur Weiterentwicklung und Harmonisierung der deutschen Sicherheitskriterien von 1983 /BMI 83/ zu erarbeiten. Hierzu wurden RSK und SSK um Beratung gebeten.

Anhand von fünf Fragestellungen hat das BMU seinen Beratungsauftrag an RSK und SSK wie folgt präzisiert:

- 1. Entsprechen die von der GRS vorgeschlagenen Sicherheitskriterien sowie die diesbezüglichen Überlegungen und Erläuterungen unter Einbeziehung der internationalen Entwicklung dem Stand von Wissenschaft und Technik?*
- 2. Sind die vorgeschlagenen Sicherheitskriterien vollständig in dem Sinne, dass bei einem Endlagerprojekt, bei dem diese Sicherheitskriterien erfüllt sind, davon ausgegangen werden kann, dass – unbeschadet der Erfüllung anderer gesetzlicher Voraussetzungen – die Schadensvorsorge nach § 7 Abs. 2 Nr. 3 Atomgesetz als getroffen angesehen werden kann?*
- 3. Haben die Vorschläge einen fachlichen Tiefgang, der für die Bewertung der Sicherheit der Betriebs- und Nachbetriebsphase eines Endlagers für radioaktive Abfälle ausreichend ist?*
- 4. Wie wird die Einführung des Risikokriteriums im Rahmen einer Langzeitsicherheitsanalyse bewertet? Wird insbesondere die Bewertung der radiologischen Sicherheit über Wahrscheinlichkeiten für die Nachbetriebsphase als sachgerecht und als gangbarer Weg angesehen? Wie sind die im Rahmen der Modellierung zu ermittelnden Wahrscheinlichkeiten wissenschaftlich zu bewerten? Welche Folgerungen ergeben sich daraus für die Belastbarkeit des Nachweises und eine Festlegung der Vorgehensweise?*

5. Welche Auffassung vertreten Sie zu der vorgeschlagenen regulatorischen Behandlung von Szenarien, die unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in ein Endlager in der Nachbetriebsphase zum Gegenstand haben?

Zum Zwecke einer zügigen und intensiven Beratung haben die Kommissionen nach der Information durch das BMU (178. SSK-Sitzung am 11./12.04.2002; 350. und 351. RSK-Sitzung am 11.04.2002 bzw. 16.05.2002) beschlossen, eine gemeinsame Ad-hoc-Arbeitsgruppe zur Erarbeitung eines Stellungnahmeentwurfs einzurichten.

Die Ad-hoc-Arbeitsgruppe hat die o. g. Fragestellungen auf sechs Sitzungen (1. Sitzung: 21.05.2002; 2. Sitzung: 11.06.2002; 3. Sitzung: 03.07.2002; 4. Sitzung: 24.07.2002; 5. Sitzung: 17.09.2002; 6. Sitzung: 16.10.2002) erörtert und den im Folgenden aufgeführten Entwurf einer Stellungnahme verfasst.

2 Sachstand

Im Rahmen ihrer Beauftragung wurden der RSK/SSK-Ad-hoc-Arbeitsgruppe: SICHERHEITSKRITERIEN ENDLAGERUNG folgende Berichte¹⁾ zur Beratung vorgelegt:

1. Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk – Überarbeitete Diskussionsgrundlage -, GRS-A-2990, Januar 2002
2. Präzisierung und Weiterentwicklung der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk, Entwurf, Stand 12.03.02
3. Präzisierung und Weiterentwicklung der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (Synopsis), Entwurf, Stand 12.03.02

Der unter Ziffer 1 aufgeführte Bericht enthält in Teil A eine Begründung des Bedarfs an Sicherheitskriterien und deren rechtliche Einordnung im deutschen Regelwerk. Teil B beinhaltet Vorschläge und deren Begründung für die Weiterentwicklung der Sicherheitskriterien. In Teil C werden Vorschläge zur Nachweisführung für die Langzeitsicherheit dargelegt. Darüber hinaus wird die Vorgehensweise bei der Erstellung der Langzeitsicherheitsanalysen im Einzelnen erläutert und es werden Nachweismethoden zum Nachweis der Einhaltung der Schutzziele vorgeschlagen.

Der unter Ziffer 2 genannte Bericht enthält die Vorschläge der GRS zur Neuformulierung der deutschen Sicherheitskriterien. In dem unter Ziffer 3 genannten Bericht (Synopsis) sind die im Einzelnen vorgenommenen Veränderungen gegenüber den derzeit gültigen Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk des BMI aus dem Jahre 1983 dargestellt. Zusammenfassend ergeben sich im Wesentlichen folgende Änderungen bzw. Weiterentwicklungen:

¹⁾ Redaktionshinweis: Auf der RSK-Homepage sind diese Berichte am Ende der Gemeinsamen Stellungnahme der RSK und SSK angefügt

- Die Sicherheitskriterien sollen für das Planfeststellungsverfahren eines ausgewählten Standorts gelten. Das Standortauswahlverfahren wird vom BMU-Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) erarbeitet.
- Die Sicherheitskriterien beziehen sich ausschließlich auf die radiologischen Schutzziele und Anforderungen, die das in § 1 Nr. 2 und § 7 Abs. 2 Satz 1 Nr. 3 des Atomgesetzes enthaltene Gebot der atomrechtlichen Schadensvorsorge konkretisieren.
- Neu als eigenständige Punkte eingeführt wurden die Kapitel/Punkte: Definitionen, Sicherheitsprinzipien für die Endlagerung, Betriebsphase, Qualitätssicherung und Erstellung einer geotechnischen Langzeitprognose.
- Die Ergebnisse des RADWASS-Projekts der IAEA und die endlagerbezogenen Regelungen der ICRP sowie die Empfehlungen der OECD und die Normen der Europäischen Gemeinschaften werden einbezogen.
- Die radiologischen Schutzziele werden differenzierter definiert. Kriterium für das radiologische Schutzziel in der Betriebsphase und für die wahrscheinlichen Szenarien in der Nachbetriebsphase ist die effektive Dosis einer Person (Individualdosis). Für die Nachbetriebsphase wird für die weniger wahrscheinlichen Szenarien der Risikobegriff eingeführt.
- Zur Optimierung des Strahlenschutzes in der Betriebsphase bei sehr kleinen Dosisbeiträgen werden Richtgrößen angegeben, die sich am Konzept der trivialen Dosis bei der Freigabe von Stoffen aus dem atomrechtlich genehmigten Umgang orientieren.
- Dem Vorschlag der ICRP 81 /ICRP 98a/ zur angemessenen Berücksichtigung der Optimierung des Strahlenschutzes für die Nachbetriebsphase (constrained optimisation) wird gefolgt.
- Die technischen Anforderungen werden in einigen Punkten gekürzt, zusammengefasst oder ergänzt. Einige wenige grundsätzliche Anforderungen an die endzulagernden Abfälle kommen hinzu (Konsistenz mit internationalen Anforderungen).
- Anforderungen an den Nachweis der Sicherheit in der Nachbetriebsphase werden dargestellt. Der Nachweis der Langzeitsicherheit soll durch eine Unsicherheitsanalyse ergänzt werden.
- Beim Nachweis der Sicherheit in der Nachbetriebsphase wird beim Bewertungsmaßstab zwischen der natürlichen Entwicklung des Endlagers und menschlichen Eingriffen in der Nachbetriebsphase unterschieden.
- Der unbeabsichtigte Eingriff des Menschen in das Endlager soll in Form realistischer Referenzszenarien berücksichtigt werden.

- Das Problem der Zeitskala für die Sicherheitsanalyse in der Nachbetriebsphase wird auf die anwendbare Nachweismethode bezogen. Die radiologischen Schutzziele unterliegen keiner zeitlichen Limitierung. Die Nachweismethoden mit ihren Aussagen werden jedoch umso unschärfer, je länger die Zeiträume sind, auf die sie sich beziehen. Der Zeitraum, für den ein Langzeitsicherheitsnachweis zu führen ist, soll auf 1 Million Jahre begrenzt werden.

3 **Bewertungsmaßstäbe**

Im Zusammenhang mit der Entwicklung von Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle sind allgemein gültige ethische Grundsätze, die Prinzipien und Schutzziele des Strahlenschutzes sowie grundlegende technische Anforderungen zu beachten.

Ausgehend von der Erkenntnis, dass eine Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen nach dem Stand von Wissenschaft und Technik als die beste Lösung für die Isolation solcher Abfälle von der Biosphäre angesehen wird, wurden auf internationaler Ebene die Prinzipien formuliert, denen diese Endlagerung genügen muss /IAEA 95, OECD 85, OECD 95/. Als ethische Grundsätze enthalten diese Prinzipien der IAEA und der OECD insbesondere Gedanken zur Gerechtigkeit innerhalb einer Generation in verschiedenen Regionen der Erde (intragenerationelle Gerechtigkeit) und zwischen den aufeinander folgenden Generationen (intergenerationelle Gerechtigkeit), Gedanken, die bereits von der sogenannten Brundtland-Kommission und der Umwelt-Gipfelkonferenz 1992 in Rio de Janeiro in den Begriff der Nachhaltigkeit eingebracht wurden .

Die Bewertungsmaßstäbe für den Strahlenschutz in der Betriebsphase des Endlagers sind in der Strahlenschutzverordnung /STR 01/ festgelegt. Dabei sind die Prinzipien und Vorgaben der ICRP-Empfehlung aus dem Jahr 1991 /ICRP 91/, die Basic Safety Standards der IAEA /IAEA 94/ sowie die Ratsdirektive der Europäischen Union von 1996 /EU 96/ berücksichtigt. Radiologische Anforderungen für die Nachbetriebsphase des Endlagers sind in der Strahlenschutzverordnung explizit nicht enthalten. Als Maßstab für den Strahlenschutz in der Nachbetriebsphase werden zum Einen die Prinzipien der IAEA /IAEA 95/ zur Bewertung herangezogen. Zum Anderen hat die ICRP bereits 1985 /ICRP 85/ und erneut 1998 /ICRP 98a/ Empfehlungen für die Strahlenschutzanforderungen für die Endlagerung fester radioaktiver Abfälle ausgesprochen.

Die SSK hat 1985 /SSK 85/ für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen die Forderung aufgestellt, dass zukünftigen Generationen und ihrer Umwelt der gleiche Schutz zu gewährleisten ist, wie er aktuell in der Bundesrepublik Deutschland durch die Strahlenschutzverordnung für die Bevölkerung und Umwelt festgelegt ist.

Bezüglich der Nachweisführung der Sicherheit des Endlagers in der Nachbetriebsphase sind die Entwicklungen der Sicherheitsphilosophie in den letzten zehn Jahren zu beachten, wie sie sich in den

Ergebnissen der IAEA-Konferenz von 1998 /IAEA 98/ und in dem Bericht der OECD/NEA von 1999 /OECD 99/ widerspiegeln. Wesentliche Punkte sind in diesem Zusammenhang:

- Die Betrachtung langer Zeiträume über 10.000 Jahre kann nicht ignoriert werden. Allerdings ist ein abgestuftes Vorgehen bei der Sicherheitsbetrachtung des Endlagers für die ferne Zukunft und der zugehörigen Nachweisführung angemessen. Dieses widerspricht nicht dem ethischen Prinzip, wonach die gleiche Vorsorge für alle Generationen zu treffen ist.
- Ein schrittweises Vorgehen bei Planung, Genehmigung und Einrichtung des Endlagers mit angemessenen Haltepunkten für eine Überprüfung des Vorgehens und des Sicherheitskonzepts erscheint vorteilhaft. In diesem Zusammenhang kann auch der Aspekt der Rückholbarkeit der Abfälle gesehen und geprüft werden.
- Neben dem Schutzziel, den Menschen vor ionisierender Strahlung zu schützen, hat der Schutz der Umwelt den Charakter eines eigenständigen Schutzzieles erreicht. Dies spiegelt sich auch in der Strahlenschutzverordnung /STR 01/ und in der EU-Direktive /EU 96/ wider.
- Für die Sicherheitsbetrachtung des Endlagers in ferner Zukunft können in Ergänzung zu Dosis- oder Risikokriterien andere Sicherheitsindikatoren für den Sicherheitsnachweis bedeutsam werden.

Ausgangspunkt der Bewertung der grundlegenden technischen Anforderungen sind die geltenden Sicherheitskriterien der RSK/SSK aus dem Jahr 1983 /BMI 83/, soweit sie weiterhin dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen und nicht speziell auf eine bestimmte Wirtsformation oder Endlagerkonzeption bezogen sind. Ein fortgeschrittener Stand von Wissenschaft und Technik ergibt sich für einzelne Anforderungen aus /IAEA 89/ und dem gewachsenen internationalen Kenntnisstand zur Endlagerung, z. B. auf dem Gebiet der Gasbildung im Endlager, der Kritikalitätssicherheit, der Korrosionsprozesse im Nahfeld und in der Bedeutung der geochemischen Bedingungen /OECD 99/.

4 Bewertung (Fragen 1 bis 5 des BMU)

1 Entsprechen die vorgeschlagenen Sicherheitskriterien sowie die diesbezüglichen Überlegungen und Erläuterungen unter Einbeziehung der internationalen Entwicklung dem Stand von Wissenschaft und Technik?

Die Grundsätze und Anforderungen für die Beurteilung der Sicherheit von Endlagern haben sich in den vergangenen zwei Jahrzehnten seit Veröffentlichung der RSK/SSK-Sicherheitskriterien aus dem Jahre 1983 erheblich weiterentwickelt. Maßgeblich hierfür sind insbesondere Ergebnisse im Rahmen der IAEA (Radwast-Programm) und der OECD/NEA sowie die aus konkreten Endlagerprojekten gewonnenen Erfahrungen. Die RSK und SSK sind daher gemeinsam der Auffassung, dass die geltenden RSK/SSK-Sicherheitskriterien aus dem Jahr 1983 nicht mehr dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen und deshalb weiter entwickelt werden müssen.

Die Kommissionen folgen der in der Diskussionsgrundlage vorgenommenen klaren Abgrenzung von gesetzlichem und untergesetzlichem Regelwerk und der Beschränkung der vorgeschlagenen Sicherheitskriterien auf die Festlegung von Sicherheitsprinzipien, Schutzziele und auslegungsunabhängigen grundlegenden Anforderungen. Die Absicht, auslegungsbezogene technische Anforderungen in Form von Leitlinien zu formulieren (z. B. für die Betriebsphase und die Nachweisführung für die Langzeitsicherheit), wird unterstützt.

Die vorgeschlagenen Sicherheitskriterien beschränken sich auf radiologische Schutzziele und Anforderungen. Die Kommissionen weisen darauf hin, dass wesentliche Anforderungen auch aus anderen Rechtsgebieten (Bergrecht, Wasserhaushaltsgesetz, Bundesimmissionsschutzgesetz, Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz) bei der Endlagerung erfüllt werden müssen. Für eine endgültige Festlegung von Sicherheitskriterien müssen die Anforderungen aus den jeweiligen Rechtsgebieten aufeinander abgestimmt werden.

Die vorgeschlagenen Sicherheitskriterien beziehen sich nur auf die Beurteilung der Sicherheit eines in einem Planfeststellungsverfahren beantragten Endlagers an einem konkreten Standort, nicht jedoch auf die Auswahl von Standorten für Endlager. Einzelne Kriterien zur Standortauswahl sind gegebenenfalls auch in einem Planfeststellungsverfahren einzuhalten und somit auch als Sicherheitskriterien zu berücksichtigen.

Die in der Diskussionsgrundlage genannten Sicherheitsprinzipien für die Endlagerung fußen auf den Sicherheitsprinzipien der IAEA und entsprechen dem Stand von Wissenschaft und Technik. Insoweit sind die folgenden Prinzipien ausdrücklich zu befürworten:

- Die aus dem Endlager resultierende Strahlenexposition soll niedrig sein gegenüber der natürlichen Strahlung.
- Künftige Auswirkungen für Mensch und Umwelt sollen nicht größer sein als das Maß der heute akzeptierten Auswirkungen.
- Die Auswirkungen des Endlagers dürfen außerhalb Deutschlands nicht größer sein als die in Deutschland als zulässig geltenden Auswirkungen.
- Zur Gewährleistung der Sicherheit des Endlagers in der Nachbetriebsphase sollen keine aktiven Maßnahmen erforderlich sein.

Die radiologischen Schutzziele für die Betriebsphase ergeben sich aus der Strahlenschutzverordnung, sie entsprechen dem Stand von Wissenschaft und Technik. Zur Begrenzung der Optimierung des Strahlenschutzes bei sehr kleinen Dosisbeträgen wird in der Diskussionsgrundlage ein Abschneidekriterium von 0,03 mSv pro Kalenderjahr unter Hinweis auf das Konzept der trivialen Dosis vorgeschlagen. In Analogie zu den Freigaberegelungen wird empfohlen, diese Grenze auf 0,01 mSv/Jahr zu senken.

Die radiologischen Schutzziele für die Nachbetriebsphase des Endlagers werden in der Diskussionsgrundlage für wahrscheinliche Szenarien der langzeitigen Entwicklung des Endlagers als Grenzwert der jährlichen

Individualdosis und für weniger wahrscheinliche Szenarien als Risikokriterium definiert. In einer Szenarienanalyse sollen alle in den Grenzen der praktischen Vernunft denkbaren natürlichen Entwicklungen betrachtet und in die Klasse der wahrscheinlichen, der weniger wahrscheinlichen und der auf Grund ihrer sehr kleinen Eintrittswahrscheinlichkeit nicht weiter zu betrachtenden Szenarien eingeordnet werden.

Das für die wahrscheinlichen Szenarien vorgeschlagene Schutzziel einer Individualdosis von 0,3 mSv im Kalenderjahr entspricht der Anforderung in den bisher geltenden RSK/SSK-Sicherheitskriterien. Dieses Schutzziel steht im Einklang mit den Strahlenschutzanforderungen, die für heutige Generationen gelten, und liegt unterhalb der Schwankungsbreite der natürlichen Strahlung in Deutschland.

Ein Schutzziel in Form eines Grenzwerts der Individualdosis von 0,3 mSv im Kalenderjahr ist für die Betriebsphase eines Endlagers geeignet, da für diese die gleichen Grundsätze angewendet werden können, wie sie die Strahlenschutzverordnung für den Betrieb von Anlagen und Einrichtungen enthält. In Anbetracht der Unsicherheiten von Sicherheitsanalysen und der Berechnung von Dosiswerten über sehr lange Zeiträume erscheint den Kommissionen dagegen eine Festlegung in Form eines Dosisgrenzwerts für die Nachbetriebsphase nicht sinnvoll. Als geeignet wird dagegen ein Richtwert im Sinne eines radiologischen Sicherheitsindikators (constraint im Sinne der ICRP) angesehen. Als ein solcher Richtwert wird eine Individualdosis von 0,1 mSv pro Jahr vorgeschlagen. Dieser Wert liegt unterhalb des Grenzwertes von 1 mSv pro Jahr entsprechend der Strahlenschutzverordnung für die Strahlenexposition für die Bevölkerung.

In der Diskussionsgrundlage wird wie in den geltenden RSK/SSK-Sicherheitskriterien und im Einklang mit Anforderungen in anderen Ländern auf die Begrenzung einer Kollektivdosis als radiologisches Schutzziel verzichtet. Dies steht im Einklang mit der Empfehlung der SSK zu den Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung der Kollektivdosis (Bundesanzeiger Nr. 126a vom 12.07.1985) und den Anforderungen der Strahlenschutzverordnung.

Die Diskussionsgrundlage enthält explizit auch das Schutzziel Schutz der Umwelt, allerdings ohne dieses Schutzziel konkret zu definieren. Für den Schutz der Umwelt ist nach dem Stand von Wissenschaft und Technik ein konkretes Schutzziel derzeit nicht vorhanden. Daher sollte nach Ansicht der Kommissionen zunächst weiterhin davon ausgegangen werden, dass durch die Einhaltung der Schutzziele für den Menschen auch ein ausreichender Schutz der Umwelt sichergestellt wird.

Zur vorgeschlagenen Einführung eines Risikogrenzwertes wird in der Beantwortung von Frage 4 Stellung genommen.

Die in der Diskussionsgrundlage entwickelten Planungsgrundsätze sowie die Anforderungen zur Qualitätssicherung, Auslegung, Errichtung, Planung des Einlagerungsbetriebes, zum Überwachungsprogramm, zu den radioaktiven Abfällen sowie zur Stilllegung des Endlagers und zur Überwachung, Kennzeichnung und Dokumentation in der Nachbetriebsphase entsprechen dem Stand von Wissenschaft und Technik. Dies gilt auch für die Sicherheitsanforderungen in der Betriebsphase des Endlagers.

Zum Nachweis der Langzeitsicherheit ist ein konsistentes Begriffssystem mit eindeutigen Definitionen der Begriffe erforderlich. Ein solches konsistentes Begriffssystem liegt in der Diskussionsgrundlage noch nicht vor. Insbesondere sind der Bedarf und die Definitionen der Begriffe: Sicherheitsnachweis, Nachweiszeitraum, Prognose, Robustheit, Sicherheitsindikatoren, Isolationsvermögen und Isolationspotential zu überprüfen und gegebenenfalls zu ergänzen. Neben der Definition des Sicherheitsnachweises sind auch dessen Elemente eindeutig zu definieren.

In einem Planfeststellungsverfahren hat der Antragsteller nachzuweisen, dass die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage getroffen ist. Dies schließt die Nachbetriebsphase des Endlagers ein. Für den Langzeitsicherheitsnachweis wird in der Diskussionsgrundlage unabhängig von der Art des Endlagers und der geologischen Gesamtsituation, in der sich das Endlager befindet, und in Analogie zu einer Festlegung des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte für den Isolationszeitraum der gesuchten Endlagerstandorte (AkEnd, 2. Zwischenbericht, August 2001, S. 22) ein Zeitraum von einer Million Jahren vorgeschlagen.

Die Festlegung eines Nachweiszeitraumes als Zeitraum, über den sich die geforderte Langzeitsicherheitsanalyse erstrecken soll, bedarf einer weiteren Betrachtung. Die RSK/SSK-Empfehlung aus dem Jahre 1988 hatte einen Nachweiszeitraum von 10.000 Jahren vorgeschlagen. Diese Position entspricht nicht mehr dem Stand von Wissenschaft und Technik, die Kommissionen halten demgegenüber einen Nachweiszeitraum von deutlich mehr als 10.000 Jahren für erforderlich. Die in der Diskussionsgrundlage enthaltene Begründung für die Begrenzung des Nachweiszeitraums durch Festlegung eines Zeitraums, für den keine wissenschaftlich fundierte Aussage über die geologische Stabilität der Standortregion mehr gemacht werden kann, erscheint nicht ausreichend. Nach Meinung der Kommissionen sollten fachliche, insbesondere radiologische und weitere geologische Argumente für die Eingrenzung und Begründung des Nachweiszeitraumes herangezogen werden. Dabei ist zu beachten, dass insbesondere für die sehr langen Zeiträume der Nachbetriebsphase der Nachweis der Sicherheit nicht einfach durch Vergleich von Dosis- oder Risikowerten mit vorgegebenen Grenzwerten geführt werden kann, sondern alle ermittelbaren sicherheitsbezogenen Kenngrößen den Charakter von Sicherheitsindikatoren haben. Erst durch eine Gesamtbetrachtung dieser Indikatoren kann ein Sicherheitsnachweis geführt werden.

Die als Kriterien für den Nachweis der Sicherheit in der Nachbetriebsphase vorgeschlagene Festlegung einer Dosis-, bzw. Risikobegrenzung entspricht der internationalen Vorgehensweise und ist Stand von Wissenschaft und Technik. Die Kommissionen halten es jedoch auch für den Stand von Wissenschaft und Technik, den Sicherheitsnachweis durch weitere Argumentationsketten zu unterstützen. Hierzu sollen neben den Sicherheitsindikationen Dosis oder Risiko weitere Sicherheitsindikatoren verwendet werden. Diese befinden sich derzeit in der Entwicklung. In den Sicherheitskriterien sollten daher weitere Sicherheitsindikatoren angemessen berücksichtigt werden. Durch die Berücksichtigung zusätzlicher Sicherheitsindikatoren, für die Analoga oder Vergleichsmöglichkeiten mit natürlichen Verhältnissen vorliegen, können Unsicherheiten des Sicherheitsnachweises weiter reduziert werden.

Die Nachweisführung über Dosis- oder Risikobegrenzungen ist mit umso größeren Unsicherheiten behaftet, je größer die betrachteten Zeiträume werden. Die verschiedenen Elemente eines Sicherheitsnachweises sollten daher im gesamten Nachweiszeitraum nicht mit gleicher Gewichtung angewendet werden, da ihre Aussagekraft in den betrachteten Zeiträumen unterschiedlich ist. Die internationale Entwicklung geht dahin, diese Unsicherheiten im Sicherheitsnachweis differenziert bzw. zeitraumbezogen zu berücksichtigen. Der vorgeschlagene Ansatz über Konfidenzgrößen und Quantile wird vom Grundsatz her befürwortet. Vor einer endgültigen Festlegung sollten die vorgeschlagenen Konfidenzgrößen und Quantile noch einmal überprüft werden.

International wird heute ein schrittweises Vorgehen bei der Entwicklung eines Endlagersystems mit entsprechenden Stufen, mit deren Abschluss jeweils auch eine Analyse der Langzeitsicherheit einher geht, für günstig gehalten. Ein ebenfalls in Stufen gegliedertes Genehmigungsverfahren könnte Vorteile auch in sicherheitsmäßiger Hinsicht haben, z. B. durch Erhöhung der Aussagesicherheit und der Einbeziehung des sich weiterentwickelnden Standes von Wissenschaft und Technik.

2 Sind die vorgeschlagenen Sicherheitskriterien vollständig in dem Sinne, dass bei einem Endlagerprojekt, bei dem diese Kriterien erfüllt sind, davon ausgegangen werden kann, dass -unbeschadet der Erfüllung anderer gesetzlicher Voraussetzungen – die Schadensvorsorge nach § 7 Abs. 2 Nr.3 Atomgesetz als getroffen angesehen werden kann?

Die Vollständigkeit der in der Diskussionsgrundlage vorgeschlagenen Sicherheitskriterien wird von RSK und SSK nach dem fachlichen Stand von Wissenschaft und Technik bewertet.

Die in der Diskussionsgrundlage vorgeschlagenen Sicherheitskriterien beziehen sich ausschließlich auf den Bereich der atomrechtlichen Schadensvorsorge und innerhalb dieses Bereiches nicht auf die Auswahl eines Endlagerstandortes. Aus diesen Einschränkungen folgt, dass Anforderungen aus anderen Rechtsgebieten, wie insbesondere aus der Reinhaltung des Grundwassers nach dem Wasserhaushaltsgesetz, nicht enthalten sind. Die Kommissionen weisen darauf hin, dass eine Abstimmung der Forderungen aus atomrechtlicher Sicht und aus Sicht des Wasserhaushaltsgesetzes von großer Bedeutung ist. Weitere wesentliche Anforderungen folgen aus dem Bergrecht. Von den Kriterien zur Standortauswahl werden gegebenenfalls einzelne Anforderungen auch in einem Planfeststellungsverfahren für einen beantragten Endlagerstandort als Sicherheitskriterien zu berücksichtigen sein.

Die Sicherheitsprinzipien, auf denen die vorgeschlagenen Sicherheitskriterien basieren, enthalten alle grundlegenden Anforderungen der IAEA und sind somit vollständig. Auch die radiologischen Sicherheitskriterien, die in der Diskussionsgrundlage vorgeschlagen werden, sind vollständig. Für die Betriebsphase des Endlagers gelten die Anforderungen der Strahlenschutzverordnung wie bei anderen kerntechnischen Anlagen. Eine nähere Präzisierung der Sicherheitsanforderungen für die Betriebsphase, wie sie in der Diskussionsgrundlage vorgeschlagen wird, ist insbesondere für eine Festlegung der in einem Planfeststellungsverfahren zu unterstellenden auslegungsbestimmenden Störfälle und Lastfälle bei Einwirkungen von außen bedeutsam.

Für die Nachbetriebsphase hat die SSK in ihrer Empfehlung, „Strahlenschutzaspekte bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen“ vom 28. Juni 1985 bereits den Grundsatz aufgestellt, wonach zukünftigen Generationen und ihrer Umwelt der gleiche Schutz zu gewährleisten ist, wie er heute in der Bundesrepublik Deutschland durch die Strahlenschutzverordnung für die Bevölkerung und Umwelt festgelegt ist. Die in der Diskussionsgrundlage enthaltenen radiologischen Kriterien entsprechen diesem Grundsatz. Neben der als Schutzziel vorgeschlagenen Begrenzung der Individualdosis ist eine Vorgabe und eine Berechnung von Organdosen nicht erforderlich, da die Individualdosis als Summe der gewichteten Äquivalentdosis in allen Organen ein umfassendes Kriterium für den Strahlenschutz der Bevölkerung darstellt. Im Hinblick auf die radiologische Nachweisführung für die Nachbetriebsphase erscheint die Erstellung einer eigenen Leitlinie zweckmäßig, da sich die bestehende Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 45 StrlSchV (alt) auf Auslegung und Betrieb von Anlagen oder Einrichtungen bezieht, nicht jedoch auf die Nachbetriebsphase eines Endlagers. Diese Leitlinie sollte unter Berücksichtigung des Charakters des Langzeitsicherheitsnachweises auf die für das Endlager relevanten Belastungspfade begrenzt werden.

Für die Betriebsphase sind entsprechend der Strahlenschutzverordnung § 47 (5) Ableitungen aus dem Betrieb anderer Anlagen oder Einrichtungen oder früheren Tätigkeiten beim Nachweis der Einhaltung der Grenzwerte zu berücksichtigen. Für die Nachbetriebsphase ist eine Berücksichtigung anderer Emittenten in ferner Zukunft nicht möglich und angemessen, da das einzuhaltende Schutzziel den Charakter eines Sicherheitsindikators, nicht den eines für die Betriebsphase nach Strahlenschutzverordnung geltenden Grenzwertes hat.

Die Kollektivdosis von Personen der Bevölkerung wird durch die Strahlenschutzverordnung nicht begrenzt. Ermittlungen der Kollektivdosis sind dort relevant, wo sie als Hilfsmittel zur Optimierung des Strahlenschutzes im Sinne des Kapitels 1 der Strahlenschutzverordnung und zum Vergleich von Schutzvorkehrungen dienen können. Dies ist insbesondere der Fall bei der Planung von Arbeiten mit beruflicher Strahlenexposition und sofern im Rahmen der Prüfung der Rechtfertigung Nutzen und Risiken abgewogen werden sollen (siehe auch Empfehlung der SSK „Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung der Kollektivdosis“ vom 08.11.1984, Bundesanzeiger Nr. 126a vom 12.07.1985). Die Kollektivdosis stellt im Sinne dieser SSK-Empfehlung keine geeignete Grundlage für die Beurteilung der Sicherheit eines Endlagers aus radiologischer Sicht dar.

Im Einklang mit der Definition der Endlagerung in Artikel 2 des Übereinkommens über die nukleare Entsorgung basieren die in der Diskussionsgrundlage enthaltenen Sicherheitskriterien auf dem Konzept der endgültigen Einlagerung von Abfällen in das Endlager ohne Rückholung. Von verschiedener Seite wird dieses Konzept wegen seiner Endgültigkeit infrage gestellt und ein stufenweises Vorgehen mit der Möglichkeit von Haltepunkten zur Überprüfung des Vorgehens mit Korrekturmöglichkeiten bis hin zu einer Einplanung der Rückholbarkeit der Abfälle empfohlen. Eine Berücksichtigung der Rückholbarkeit über lange Zeiträume hätte erheblichen Einfluss auf die Endlagerkonzeption und möglicherweise die Sicherheitskriterien; der Übergang von einer Endlagerung zu einer untertägigen Langzeitlagerung würde damit fließend.

Die Kommissionen vertreten die Auffassung, dass sich während der Betriebsphase des Endlagers, die sich über mehrere Jahrzehnte erstrecken wird, Möglichkeiten zu einer zusätzlichen Überprüfung des Vorgehens und Korrekturmöglichkeiten ergeben, die je nach Gegebenheiten und Art der endzulagernden Abfälle zur

Absicherung und Vertrauensbildung genutzt werden können. Die Kommissionen befürworten daher entsprechende Kontrollmöglichkeiten insbesondere bei hochradioaktiven Abfällen und bestrahlten Brennelementen während der Betriebsphase. Wegen der Beeinträchtigung der Rückhalteeigenschaften des Endlagers in der Nachbetriebsphase wird eine Auslegung des Endlagers zur Rückholbarkeit der Abfälle nach der Betriebsphase jedoch nicht empfohlen.

RSK und SSK halten es außerdem für zweckmäßig, bei der endgültigen Formulierung der Sicherheitskriterien auf die Bedeutung der Safeguards-Verpflichtungen hinzuweisen, die einem Endlagerbetreiber gegenüber EURATOM und IAEA obliegen.

Unter Berücksichtigung der vorstehenden Ausführungen halten die Kommissionen die in der Diskussionsgrundlage enthaltenen Kriterien für vollständig.

3 Haben die Vorschläge einen fachlichen Tiefgang, der für die Bewertung der Sicherheit der Betriebs- und Nachbetriebsphase eines Endlagers für radioaktive Abfälle ausreichend ist?

Die vorgeschlagenen Sicherheitskriterien stehen in der Hierarchie der Anforderungen unterhalb des Bereichs der Rechtsnormen an der Spitze des untergesetzlichen Regelwerkes. Die wesentliche Funktion der Sicherheitskriterien besteht darin, die Sicherheitsprinzipien und Schutzziele zu konkretisieren, ohne allerdings ausführungsbezogene Anforderungen an die Auslegung, Errichtung und den Betrieb des Endlagers zu formulieren. Die Sicherheitskriterien sollen für jede Art von Endlager in unterschiedlichen tiefen geologischen Formationen und für die Endlagerung aller Arten von radioaktiven Abfällen gelten. Aus dieser Zielsetzung heraus folgt, dass die Sicherheitskriterien unter Beachtung des gesetzlichen Regelwerks ausführungsunabhängige Konkretisierungen darstellen, die für die Anwendung in einem konkreten Planfeststellungsverfahren durch ausführungsbezogene, für den konkreten Fall geltende Anforderungen technischer Art und hinsichtlich der Nachweisführung zu ergänzen sind. Somit ist festzustellen, dass der fachliche Tiefgang der vorgeschlagenen Sicherheitskriterien allein nicht ausreicht, die Sicherheit der Betriebs- und Nachbetriebsphase eines Endlagers zu bewerten.

In der Diskussionsgrundlage wird deshalb vorgeschlagen, ausführungsbezogene Anforderungen und Anforderungen an die Nachweisführung in Form von Leitlinien, insbesondere zur Sicherheit in der Betriebsphase und für die Führung des Sicherheitsnachweises für die Nachbetriebsphase zu entwickeln. Dieser Vorschlag wird von den Kommissionen unterstützt. Es erscheint zwar möglich, ausführungsbezogene Anforderungen erst in einem konkreten Planfeststellungsverfahren unter Berücksichtigung der dann vorliegenden Randbedingungen, wie Art und Konditionierung der Abfälle, Konzept und Auslegung des Endlagerbergwerkes und konkrete geologische Gesamtsituation zu entwickeln; es ist jedoch vorteilhafter und transparenter, wesentliche technische und methodische Anforderungen bezogen auf den Typ des Endlagers und seine geologische Formation vor einem Planfeststellungsverfahren in Form von Leitlinien festzulegen.

Im Übrigen sind weitere technische Regeln, z. B. des KTA und des DIN zu beachten, soweit sie auf die Endlagerung anwendbar und übertragbar sind.

4 Wie wird die Einführung eines Risikokriteriums im Rahmen einer Langzeitsicherheitsanalyse gesehen? Wird insbesondere die Bewertung der radiologischen Sicherheit über Wahrscheinlichkeiten für die Nachbetriebsphase als sachgerecht und gangbarer Weg angesehen? Wie sind die im Rahmen der Modellierung zu ermittelnden Wahrscheinlichkeiten wissenschaftlich zu bewerten? Welche Folgerungen ergeben sich daraus für die Belastbarkeit des Nachweises und eine Festlegung der Wahrscheinlichkeiten?

Die Verwendung von Risikokriterien bei der Bewertung komplexer Anlagen ist Stand von Wissenschaft und Technik. Auch für den Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern sind in einzelnen Ländern Risikokriterien eingeführt worden. Für die verschiedenen Szenarien eines Endlagers sind die Eintrittswahrscheinlichkeiten neben den radiologischen Konsequenzen ein wesentliche Bewertungsgröße. Daher ist die Einführung von Risikokriterien grundsätzlich zu befürworten.

Unter der Annahme einer linearen Dosis-Wirkungsbeziehung kann das für wahrscheinliche Szenarien vorgeschlagene Schutzziel einer Individualdosis auch als Risikowert ausgedrückt werden. Umgekehrt können aus Risikowerten auch Dosiswerte abgeleitet werden.

Die schwierige Vermittelbarkeit des Risikoansatzes und die Schwierigkeit der Quantifizierung von Eintrittswahrscheinlichkeiten schränken die Verwendung von Risikokriterien jedoch ein. Für die Praxis des Sicherheitsnachweises erscheint es einfacher, für die vorgeschlagenen Szenariengruppen mit Dosiswerten als Schutzziel zu arbeiten.

Unter Beibehaltung des Schutzzieles für wahrscheinliche Szenarien in der Nachbetriebsphase, ausgedrückt durch den Richtwert von 0,1 mSv/Jahr, kann dann für die Gruppe der weniger wahrscheinlichen Szenarien unter Berücksichtigung einer Eintrittswahrscheinlichkeit von kleiner 10 % (über den gesamten Betrachtungszeitraum) ein zehnfach höherer Referenzwert zugelassen werden.

Die Einführung von qualitativen Szenariengruppen mit unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten wird begrüßt. Der Kenntnisstand zur Eingruppierung der Szenarien ist im allgemeinen vorhanden oder kann erarbeitet werden. Dies kann auf einer qualitativen Basis erfolgen, da auch die Szenariengruppen im Hinblick auf ihre Eintrittswahrscheinlichkeiten qualitativ charakterisiert sind.

Dies wird als vorteilhaft angesehen, da die Quantifizierung von Wahrscheinlichkeiten auf Grund der oftmals geringen Kenntnisse nicht zu belastbareren Aussagen führt. Auch Spekulationen bei der Quantifizierung von Eintrittswahrscheinlichkeiten werden hierdurch vermieden. Die Bewertung der radiologischen Sicherheit über quantitative Eintrittswahrscheinlichkeiten von Szenarien wird somit nicht als sachgerechter Weg angesehen.

Bei dem in der Diskussionsgrundlage vorgeschlagenen Ansatz mit einem Risikogrenzwert für eine Szenariengruppe und einem Dosisgrenzwert für die andere Szenariengruppe werden die unterschiedlichen Einheiten der Grenzwerte für die beiden Szenariengruppen als schwer vermittelbar angesehen. Darüber

hinaus wird ein Risikowert selbst als schwer vermittelbar angesehen. Bei der Einführung eines Risikokriteriums würden begleitende Maßnahmen zur Akzeptanz in der Öffentlichkeit für erforderlich gehalten.

5 Welche Auffassung vertreten Sie zu der vorgeschlagenen regulatorischen Behandlung von Szenarien, die unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in ein Endlager in der Nachbetriebsphase zum Gegenstand haben?

In der Diskussionsgrundlage wird gefordert, bei Planung und Auslegung eines Endlagers künftig die Möglichkeit von unbeabsichtigten menschlichen Aktivitäten, die die Funktion des Endlagers beeinträchtigen könnten, zu berücksichtigen. Dabei wird zwischen dem direkten Eindringen in das Endlager und der Beeinträchtigung der Funktionstüchtigkeit der Barrieren des Endlagers unterschieden. Beim direkten Eindringen in das Endlager können sich unmittelbar Auswirkungen auf die handelnden Personen ergeben. Im Allgemeinen sind nur wenige Personen und diese möglicherweise nur während der Zeit des aktiven Handelns betroffen. Die Beeinträchtigung der Funktionstüchtigkeit des Endlagers durch menschliche Aktivitäten kann indirekte Auswirkungen in einen größeren Bereich und über lange Zeiträume zur Folge haben. Sie wird in der Diskussionsgrundlage den natürlichen Entwicklungen zugeordnet. Beabsichtigte Aktivitäten sowie kriegerische Einwirkungen bleiben außer Betracht und werden in die Verantwortung der jeweils handelnden Gesellschaft gestellt.

Es wird davon ausgegangen, dass das Wissen über das Endlager für mindestens 500 Jahre erhalten bleibt. Eingriffe vor Ablauf dieses Zeitraums brauchen daher nicht betrachtet zu werden. Um das Wissen über die Existenz eines Endlagers und seine Berücksichtigung bei Aktivitäten am Standort für diesen Zeitraum sicher zu stellen, werden geeignete Maßnahmen gefordert.

Zur Behandlung des direkten Eindringens in das Endlager in Langzeitsicherheitsanalysen sollen nur ausgewählte Szenarien (Referenzszenarien) herangezogen werden. Konkrete Hinweise zum Vorgehen bei der Auswahl dieser Szenarien enthält die Diskussionsgrundlage nicht. Gefordert werden allerdings die transparente und nachvollziehbare Dokumentation der Szenarienanalyse, die Begründung ihrer Einzelschritte und die nachvollziehbare Darstellung der wesentlichen Entscheidungen.

Die für die ausgewählten Szenarien ermittelten potenziellen radiologischen Auswirkungen des direkten unbeabsichtigten Eindringens sollen anhand der ICRP 81 /ICRP 98a/ bewertet werden. Danach werden bei einer resultierenden potenziellen Belastung von größer als 100 mSv pro Jahr Maßnahmen zur Reduzierung der Auswirkungen empfohlen. Für Belastungen unterhalb 10 mSv pro Jahr sind Maßnahmen nicht vorgesehen. Im Bereich zwischen 10 und 100 mSv pro Jahr ist die Notwendigkeit von Maßnahmen unter Berücksichtigung der Anzahl betroffener Personen, des möglichen Ausmaßes einer Kontamination sowie der Möglichkeit zur Begrenzung der Auswirkungen und von Gegenmaßnahmen zu erwägen. Dieser Bewertungsansatz wird gegenwärtig international diskutiert (z. B. /COOPER 02/), ist aber nicht gängige Praxis.

Nach Meinung der Kommissionen entspricht die Berücksichtigung von unbeabsichtigten menschlichen Aktivitäten, die die Funktion des Endlagers beeinträchtigen könnten, dem internationalen Stand von Wissenschaft und Technik. Hierbei ist wie vorgeschlagen zwischen dem direkten Eindringen und der Beeinträchtigung der Funktionstüchtigkeit der Barrieren des Endlagers zu unterscheiden. Menschliche Aktivitäten, die zur Beeinträchtigung der Funktionstüchtigkeit der Barrieren des Endlagers führen, sollten anhand derselben Kriterien beurteilt werden, die für die natürliche Entwicklung des Endlagers gelten.

Die Beurteilung des direkten Eindringens sollte, wie vorgeschlagen, auf Referenzszenarien eingeschränkt werden. Zur Bewertung solcher Szenarien sind nach Ansicht der Kommissionen andere Kriterien erforderlich. Diese sind unter Berücksichtigung der zu betrachtenden Szenarien und der Vorgehensweise entsprechend ICRP 81 noch zu entwickeln.

Die Kommissionen empfehlen, die Vorgehensweise beim Sicherheitsnachweis zu künftigen menschlichen Aktivitäten mit unbeabsichtigte Auswirkungen und insbesondere bei der Entwicklung von Referenzszenarien in einer Leitlinie festzulegen.

Literatur

- /AECB 85/ Atomic Energy Control Board (1985): AECB Regulatory Document R-71: Regulatory Policy Statement. Deep Geological Disposal of Nuclear Fuel Waste: Background Information and Regulatory Requirements Regarding the Concept Assessment Phase.
- /AECB 87a/ Atomic Energy Control Board (1987a): AECB Regulatory Document R-72: Regulatory Policy Statement. Regulatory Guide. Geological Considerations in Siting a Repository for Underground Disposal of High-Level Radioactive Waste.
- /AECB 87b/ Atomic Energy Control Board (1987b): AECB Regulatory Document R-104: Regulatory Policy Statement. Regulatory Objectives, Requirements and Guidelines for the Disposal of Radioactive Wastes - Long-Term Aspects
- /AKE 01/ Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd)
2. Zwischenbericht: Stand der Diskussion
August 2001
- /BMI 83/ Bundesministerium des Innern (BMI)
Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk
GMBI. 1983, S. 220
- /BOR 97/ Bork, M.
Internationale und nationale Regelungen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle, Teilaspekte Sicherheit in der Vorbetriebs- und Betriebsphase von Endlagern
GRS - A - 2459, Köln, 1997¹⁾
- /BOR 98/ Bork, M.
Bewertungsmaßstäbe für die Betriebs- und Langzeitsicherheit von geologischen Endlagern
GRS - A - 2643, Köln, 1998¹⁾

¹⁾ Die gekennzeichneten Literaturstellen sind im Auftrag des BMU erstellte GRS-A-Berichte bzw. Statusberichte. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere dürfen solche Berichte nur mit seiner Zustimmung zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt werden bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

- /COOPER 02/ Cooper, J. R. (2002): Human intrusion: New ideas? In: IAEA – International Atomic energy Agency: Issues relating to safety standards on the geological disposal of radioactive waste. Proceedings of a socialists meeting held in Vienna, 18-22 June 2001. IAEA-TECDOC-1282, S. 163-168, Wien
- /DSIN 91/ Direction de la Sûreté des Installations Nucléaires (1991): Determination of the Objectives to be Adopted in the Design and Construction Phase of the Creation of a Deep Geological Formation Radioactive Waste Repository to Ensure Safety after the Repository has been Closed. Fundamental Safety Rule No. III.2.f..
- /EU 96/ European Union Council Directive 96/29/EURATOM, 13. May 1996
- /GNE 98/ Gesetz zu dem Gemeinsamen Übereinkommen vom 5. September 1997 über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle (Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung) BGBl Teil II, Nr. 31,S. 1752, 1998
- /GOV 99/ Government Decision of the Council of State on the Safety of Disposal of Spent Nuclear Fuel
Helsinki, 25 March 1999/478
- /HSK 93/ Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Eidg. Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA)
Richtlinie für schweizerische Kernanlagen
Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle
HSK-R-21/d, November 1993
- /IAEA 89/ International Atomic Energy Agency (IAEA)
Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High Level Radioactive Wastes
Safety Series No. 99, Vienna 1989
- /IAEA 94/ International Atomic Energy Agency (IAEA)
Safety indicators in different time frames for the safety assessment of underground radioactive waste repositories
IAEA-TECDOC - 767, October 1994

- /IAEA 95/ International Atomic Energy Agency (IAEA)
The Principles of Radioactive Waste Management
Safety Series No. 111 - F, IAEA, Vienna, 1995
- /IAEA 95a/ International Atomic Energy Agency (IAEA)
Requirements for the safe management of radioactive waste
Proceedings of a seminar held in Vienna, 28 - 31 August 1995
IAEA-TECDOC – 853
- /IAEA 98/ International Atomic Energy Agency (IAEA)
Topical issues in nuclear radiation and radioactive waste safety, Topical issue 5: Radiation
safety in the distant future: The issue of the disposal of long-lived waste
Proceedings of an international conference 31.8. - 4.9.1998, Vienna
- /IAEA 02/ International Atomic Energy Agency (IAEA)
IAEA-TECDOC-1282, June 2002
Issues relating to safety standards on the geological disposal of radioactive waste
Proceedings of a specialists meeting held in Vienna, 18 – 22 June 2001)
- /ICRP 85/ International Commission of Radiological Protection (ICRP)
Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste
ICRP-Publication 46, July 1985
- /ICRP 91/ International Commission of Radiological Protection (ICRP)
Recommendations of the ICRP
Publication 60, 1991
- /ICRP 98/ International Commission of Radiological Protection (ICRP)
Recommendations of the ICRP
Publication 77, 1998
- /ICRP 98a/ International Commission of Radiological Protection (ICRP)
Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid
Radioactive Waste
Publication 81
Annals of the ICRP, Vol. 28, No 4 1998

- /JEN 93/ Jensen, M.: Conservation and Retrieval of Information
Final Report of the Nordic Nuclear Safety Research Project KAN - 1.3
August 1993
- /JNC 99/ Japan Nuclear Cycle Development Institute (1999): H 12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan. Supporting Report 3 Safety Assessment of the Geological Disposal System
- /KEG 96/ Kommission der Europäischen Gemeinschaften
Richtlinie 96/29/EURATOM des Rates vom 13. Mai 1996 zur Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlen
Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 159, 29. Juni 1996
- /KSA 92/ Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA)
Sicherheitsprinzipien für die Entsorgung radioaktiver Abfälle
Tagungsbericht Klausurtagung, Dezember 1992
- /NAS 95/ National Academy of Sciences
Technical Bases for Yucca Mountain Standards
National Academy Press, Washington D. C. 1995
- /NIREX 95/ United Kingdom Nirex Limited (1995): Post-Closure Performance Assessment: Human Intrusion and Natural Disruptive Events.- Nirex Report No. S/95/004
- /NRC 00/ US Nuclear Regulatory Commission (NRC)
Disposal of high-level radioactive wastes in geologic repositories
10 CFR Part 60, Federal Register 2000
- /NRP 92/ National Radiological Protection Board
Radiological Protection Objectives for the Land-based Disposal of Solid Radioactive Wastes
Documents of the NRPB, Febr. 1992
- /OECD 85/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA)
Technical appraisal of the Current Situation in the Field of Radioactive Waste Management. A Collective Opinion by the Radioactive Waste Management Committee: Paris 1985

- /OECD 91/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA)
Disposal of High-Level Radioactive Wastes
Radiation Protection and Safety Criteria
Proceedings of an NEA Workshop, Paris, 5 - 7 November 1991
- /OECD 95/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA)
Steering Committee for Nuclear Energy:
Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal
A Collective Opinion of the Radioactive Waste Management Committee OECD,
Paris April 1995
- /OECD 95a/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA)
Bedeutung und Anwendung des Konzepts der potenziellen Exposition
Bericht der CRPPH / CSNI / CNRA / RWMC-Expertengruppe, Dez. 1995
- /OECD 95b/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA)
Future Human Action at Disposal Sites
OECD, Paris 1995
- /OECD 99/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA)
Geological Disposal of Radioactive Waste
Review of Developments in the Last Decade
OECD, Paris 1999
- /OECD 99a/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA)
Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories
Its Development and Communication
OECD, Paris 1999
- /RFS 91/ Règle Fondamentale de Sûreté (RFS) No III.2.f
Stockage définitive de déchets radioactifs en formation géologique profonde.
Englische Fassung: Basic Safety Rules, Determination of the objectives to be adopted in the
design and construction phases of the creation of a deep geological formation radioactive
waste repository to ensure safety after the repository has been closed, Rule No.III.2.f,1991
- /RPNSA 93/ The Radiation Protection and Nuclear Safety Authorities in Denmark, Finland, Iceland and
Sweden (1993): Disposal of High Level Radioactive Waste: Consideration on Some Basic
Criteria.

- /SKB 95/ Svensk Kärnbränslehantering (1995): Template for Safety Reports with Descriptive Example.- SKB Technical Report 96-05
- /SKI 99/ Statens Kärnkraftinspektion (1999): Elements of a Regulatory Strategy for the Consideration of Future Human Actions in Safety Assessments.- SKI Report 99:46
- /SSI 98/ Statens strålskyddsinstitut/Swedish Radiation Protection Institute: The Swedish Radiation Protection Institute's Regulation Concerning the Protection of Human Health and Environment in Connection with the Final Management of Spent Nuclear Fuel or Nuclear Waste
Stockholm, September 28, 1998
- /SSK 85/ Strahlenschutzaspekte bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen
(Als Empfehlung auf der 60. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 28.06.1985 verabschiedet)
- /SST 01/ Sächsisches Staatsarchiv
Oberbergamt Freiberg
Schneeberger Bergbuch
pers. Mitteilung, Dezember 2001
- /STR 01/ Strahlenschutzverordnung
20. Juli 2001, BGBl. I. S. 1714
- /STU 01/ Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK)
Long-term safety of disposal of spent nuclear fuel
Guide YVL 8.4, Helsinki, 23 May 2001
- /WIL 99/ Wilmot, R.D., S.M. Wickham, D.A. Galson
Elements of a Regulatory Strategy for the Consideration of Future Human Actions in Safety Assessments
SKI Report 99:46
September 1999



Sicherheitskriterien
für die Endlagerung
radioaktiver Abfälle
in einem Bergwerk

- Überarbeitete
Diskussionsgrundlage -

Januar 2002

Auftrags-Nr.: 854751

Anmerkung:

Dieser Bericht ist von der GRS im Auftrag des BMU im Rahmen des Vorhabens SR 2362 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 Bundesminister des Inneren (BMI) hat im Jahr 1983 nach Beratung durch die Reaktor-Sicherheitskommission und die Strahlenschutzkommission Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk im Bundesanzeiger veröffentlicht. Eine ergänzende Stellungnahme zum Zeitrahmen für die Beurteilung der Langzeitsicherheit eines Endlagers haben Reaktor-Sicherheitskommission und Strahlenschutzkommission im Jahr 1988 abgegeben. Seither haben sich international und in Deutschland wichtige Entwicklungen auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle und bei der Beurteilung der Sicherheit eines Endlagers ergeben.

Der vorliegende Bericht enthält die Einordnung und Abgrenzung der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle im deutschen Regelwerk. Es wird ein Vorschlag zur Fortentwicklung eines Systems von Sicherheitskriterien und Leitlinien zum Betrieb und zum Nachbetrieb eines Endlagers begründet.

Es werden Präzisierungen zur Weiterentwicklung der deutschen Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk vorgenommen:

- Das radiologische Schutzziel wird differenzierter definiert. Dabei wird beim Bewertungsmaßstab zwischen der natürlichen Entwicklung des Endlagers und menschlichen Eingriffen in der Nachbetriebsphase unterschieden.
- Der unbeabsichtigte Eingriff des Menschen in das Endlager soll in Form glaubhafter Referenzszenarien berücksichtigt werden. Schutzziel ist hier eine Begrenzung der Auswirkungen.
- Die Ergebnisse des RADWASS-Projekts der IAEA und die endlagerbezogenen Regelungen der ICRP sowie die Empfehlungen der OECD und die Normen der Europäischen Gemeinschaften werden einbezogen.
- Das Problem der Zeitskala für die Sicherheitsanalyse in der Nachbetriebsphase wird deutlich auf die anwendbare Nachweismethode bezogen. Die radiologischen Schutzziele unterliegen keiner zeitlichen Limitierung. Die Anwendbarkeit der Nachweismethoden und die Zuverlässigkeit ihrer Aussagen sind jedoch zeitlich

begrenzt.

- Zur Optimierung des Strahlenschutzes bei sehr kleinen Dosisbeiträgen werden Richtgrößen angegeben, die sich am Konzept der trivialen Dosis bei der Freigabe von Stoffen aus atomrechtlich genehmigtem Umgang orientieren.
Dem Vorschlag der ICRP zur Optimierung des Strahlenschutzes in der Nachbetriebsphase (constraint optimisation) wird gefolgt.
- Die technischen Anforderungen werden in einigen Punkten gekürzt, zusammengefasst oder ergänzt. Einige wenige grundsätzliche Anforderungen an die endzulagernden Abfälle kommen hinzu (Konsistenz mit internationalen Anforderungen).
- Anforderungen an den Nachweis der Langzeitsicherheit werden dargestellt. Der Nachweis der Langzeitsicherheit soll durch eine Unsicherheitsanalyse ergänzt werden.
- Es wird auf eine Verwendung der Kollektivdosis verzichtet.

Die Sicherheitskriterien beziehen sich ausschließlich auf die radiologischen Schutzziele und Anforderungen, die das in § 1 Nr. 2 und § 7 Abs. 2 Satz 1 Nr. 3 des Atomgesetzes enthaltene Gebot der atomrechtlichen Schadensvorsorge konkretisieren. Die Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) und der OECD, Nuclear Energy Agency, die Normen der Europäischen Gemeinschaften und die Sicherheitsprinzipien der Internationalen Atomenergieagentur (IAEA) sowie die Kriterienentwicklung in anderen Ländern werden berücksichtigt.

Abstract

In 1983, following consultations with the Reactor Safety Commission and the Commission on Radiological Protection, the Federal Minister of the Interior (BMI) drew up safety criteria for the final storage of radioactive waste in a mine. These criteria were published in the Federal Bulletin. In 1988, the Reactor Safety Commission and the Commission on Radiological Protection issued a supplementary statement on the time frame for the assessment of the long-term performance of a repository. Since then, there have been important developments in Germany and abroad in the fields of final radioactive waste disposal and repository performance assessment.

The report in hand deals with the classification and delimitation of the safety criteria for the final storage of radioactive waste within the context of the German regulations. It provides the justification of a proposal for the further development of a system of safety criteria and guidelines for the operational and post-operational phase of a repository.

More precise details are provided concerning the further development of the German safety criteria for the final storage of radioactive waste in a mine:

- The radiological protection goal is defined in a more differentiated manner. Concerning the assessment standard, a distinction is made between the natural evolution of the repository and human intrusion during the post-operational phase.
- Inadvertent human intrusion into the repository has to be considered in the form of plausible reference scenarios. Here, the protection goal is to limit the consequences.
- The results of the RADWASS project of the IAEA and the repository-related ICRP regulations as well as the OECD recommendations and norms of the European Communities are taken into account.
- The problem of the time-scale for the performance assessment of the post-operational phase is clearly linked to the applicable demonstration method. The radiological protection goals are not subject to any time limit. The applicability of the demonstration methods and the reliability of their results are, however, temporally

limited.

- To optimise radiation protection in connection with very low doses, reference parameters are indicated which are oriented on the trivial dose concept applied in the context of the release of materials from the licensed handling of radioactive materials.

The ICRP proposal regarding optimisation of radiation protection during the post-operational phase (constraint optimisation) is heeded.

- The technical requirements are in some points abridged, summarised or supplemented. Some few fundamental requirements for the waste to be disposed of in a repository are added (consistence with international requirements).
- Requirements for the long-term safety demonstration are presented. The long-term safety demonstration has to be supplemented by an uncertainty analysis.
- The use of a collective dose is dispensed with.

The safety criteria exclusively relate to the radiological protection goals and requirements that cast the imperative of nuclear damage prevention contained in Section 1 No. 2 and Section 7 para. 2 clause 1 No. 3 of the Atomic Energy Act in concrete terms. The recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP) and the OECD, Nuclear Energy Agency, the norms of the European Communities and the Safety Principles of the International Atomic Energy Agency (IAEA) as well as the criteria developed in other countries are taken into consideration.

Inhaltsverzeichnis

TEIL A

A.1	Vorbemerkung.....	1
A.2	Einleitung und Aufgabenstellung	1
A.3	Bedarf für Sicherheitskriterien	3
A.4	Einordnung der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in das deutsche Regelwerk	4
A.4.1	Bestehende Regelungen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle	4
A.4.1.1	Rechtsnormen.....	4
A.4.1.2	Untergesetzliche Regelungen.....	5
A.4.2	Fortentwicklung der untergesetzlichen Regelungen für die Endlagerung	7

TEIL B

B	Vorschläge für eine Präzisierung und Weiterentwicklung der Sicherheitskriterien	10
B.1	Einführung	10
B.2	Anwendungsbereich der Sicherheitskriterien	13
B.3	Definitionen	14
B.4	Aufgabe der Endlagerung	15
B.5	Sicherheitsprinzipien für die Endlagerung.....	15
B.6	Radiologische Schutzziele	16
B.6.1	Betriebsphase des Endlagers.....	17
B.6.1.1	Schutz des Menschen und der Umwelt.....	17
B.6.1.2	Optimierung des Strahlenschutzes.....	18
B.6.2	Nachbetriebsphase.....	19
B.6.2.1	Schutz des Menschen.....	19
B.6.2.2	Schutz der Umwelt.....	19
B.6.2.3	Optimierung des Strahlenschutzes.....	20

B.7	Standort.....	20
B.8	Planung und Errichtung	21
B.8.1	Planungsgrundsätze.....	21
B.8.2	Qualitätssicherung	23
B.8.3	Auslegung	23
B.8.4	Errichtung des Endlagerbergwerkes	24
B.8.4.1	Schächte	24
B.8.4.2	Grubenbaue	24
B.8.5	Planung des Einlagerungsbetriebs	24
B.8.6	Überwachungsprogramm	25
B.8.7	Radioaktive Abfälle	26
B.8.8	Stilllegung.....	26
B.8.9	Planung der Nachbetriebsphase	27
B.9	Betriebsphase.....	27
B.9.1	Einschluss radioaktiver Stoffe.....	27
B.9.2	Kritikalitätssicherheit	28
B.9.3	Wärmeabfuhr	28
B.9.4	Strahlenschutz	28
B.9.5	Ableitungen radioaktiver Stoffe.....	28
B.9.6	Brand- und Explosionsschutz	29
B.9.7	Einwirkungen von innen.....	29
B.9.8	Einwirkungen von außen	29
B.9.9	Qualitätssicherung	30
B.9.10	Betriebsführung.....	30
B.10	Nachbetriebsphase.....	31
B.10.1	Zeitraum für den Langzeitsicherheitsnachweis	32
B.10.2	Langzeitsicherheitsanalysen.....	32
B.10.2.1	Szenarienanalyse	32
B.10.2.2	Konsequenzenanalysen	34
B.10.2.3	Datenerhebung	34
B.10.2.4	Nachweisführung der Einhaltung des Schutzzieles	34

Verwendete Unterlagen.....	36
-----------------------------------	-----------

TEIL C

Anhang.....	41
--------------------	-----------

C1	Zeiträume.....	41
----	----------------	----

C2	Langzeitsicherheitsanalysen.....	46
----	----------------------------------	----

C3	Erhalt von Wissen.....	55
----	------------------------	----

Teil A

A.1 Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht befasst sich ausschließlich mit radiologischen Schutzziele und Anforderungen, die das in § 1 Nr. 2 und § 7 Abs. 2 Satz 1 Nr. 3 des Atomgesetzes enthaltene Gebot der atomrechtlichen Schadensvorsorge konkretisieren. Nichtradiologische Anforderungen sind nicht Gegenstand dieses Berichtes. Der Bericht wurde von der GRS unter fachlicher Beteiligung von Experten aus Deutschland und der Schweiz erarbeitet. Zur inhaltlichen Abstimmung wurden regelmäßig Fachgespräche durchgeführt.

Der vorliegende Bericht stellt keinen abgeschlossenen Satz neu gefasster Sicherheitskriterien dar, sondern ist als Diskussionsgrundlage gedacht für weitere Beratungen in der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK), der Strahlenschutzkommission (SSK) und dem Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd).

A.2 Einleitung und Aufgabenstellung

Atomrechtliche Regelungen zur Entsorgung und Endlagerung radioaktiver Abfälle wurden in Deutschland im Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz, AtG) /ATG 00/, in dem Gesetz zu dem Gemeinsamen Übereinkommen vom 5. September 1997 über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle (Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung) /GNE 98/ und in der Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlung (Strahlenschutzverordnung, StrlSchV) /STR 01/ festgelegt. Außerdem sind bei der Errichtung und beim Betrieb eines Endlagers weitere Gesetze und Regelungen zu beachten. Besonderes Gewicht kommt dabei den Vorschriften des Bergrechts und dem Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung zu.

Der Bundesminister des Inneren (BMI) hat im Jahr 1983 /BMI 83/ nach Beratung durch die Reaktor-Sicherheitskommission und die Strahlenschutzkommission Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk im Bundesanzeiger veröffentlicht und die zuständigen Behörden der Länder gebeten, diese Kriterien bei Planfeststellungsverfahren für Endlager anzuwenden. Eine ergänzende Stellungnahme

zum Zeitrahmen für die Beurteilung der Langzeitsicherheit eines Endlagers haben Reaktor-Sicherheitskommission und Strahlenschutzkommission im Jahr 1988 /RSK 88/ abgegeben. Seither haben sich international und in Deutschland wichtige Entwicklungen auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle und bei der Beurteilung der Sicherheit eines Endlagers ergeben /OEC 99/.

Im internationalen Bereich führte die intensive Bearbeitung der Fragen der Endlagerung dazu, dass in vielen Ländern Grundsätze und Kriterien für eine Beurteilung von Standorten und der Sicherheit von Endlagern entwickelt wurden /BOR 97, 98/. Wichtige Beispiele sind die Länder Schweiz /KSA 92, HSK 93/, USA (für Yucca Mountain) /NAS 95, NRC 00/, Großbritannien /NRP 92/, Finnland /GOV 99, STU 01/, Schweden /SSI 98/ und die nordischen Länder /NOR 89/. Von besonderer Bedeutung sind das Übereinkommen über nukleare Entsorgung und die Aktivitäten der Internationalen Atomenergieagentur (IAEA) im Rahmen des RADWASS-Programms. Die IAEA hat u.a. Kriterien und Prinzipien für die Beurteilung der Sicherheit von Endlagern veröffentlicht /IAE 89, 95, 98/ und Sicherheitsindikatoren für verschiedene Zeitphasen bei der Bewertung der Langzeitsicherheit /IAE 94, 95a/ vorgeschlagen. Auch die Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) aus den Jahren 1985 /ICR 85/, 1991 /ICR 91/ und 1998 /ICR 98/ und die Stellungnahmen der OECD, Nuclear Energy Agency /OEC 91, 95, 95a/ sowie die Normen der Europäischen Gemeinschaften /KEG 96/ sind zu berücksichtigen.

In Deutschland sind in den vergangenen Jahren umfangreiche Erfahrungen mit der Fortentwicklung der Konzepte der Endlagerung gewonnen worden. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Erfahrungen aus dem Planfeststellungsverfahren für das Endlager Konrad. Zur Langzeitsicherheit und zu den Methoden der Nachweisführung haben die Arbeiten in den internationalen Programmen SPA, EVEREST, INTRAVAL, PAGIS und PACOMA wesentliche Erkenntnisse beigetragen.

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) hat die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH beauftragt, die sich fortentwickelnden internationalen Kriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle und die Bewertung im Hinblick auf die deutschen Kriterien zu verfolgen, Vorschläge zur Weiterentwicklung und Harmonisierung der deutschen Sicherheitskriterien zu erarbeiten und das BMU in seinen Aktivitäten bei der Fortentwicklung des untergesetzlichen Regelwerkes für die Endlagerung zu unterstützen. Auch sollen die Erfahrungen aus dem

Planfeststellungsverfahren für das Endlager Konrad in die Bewertung einbezogen werden. Ziel der Arbeiten ist es, den internationalen Stand von Wissenschaft und Technik der Sicherheitskriterien für die Endlagerung zu ermitteln und auf dieser Basis die deutschen Kriterien weiterzuentwickeln. Dabei ist darauf zu achten, dass die Vorschläge für die Neubewertung der Sicherheitskriterien soweit wie möglich im Einklang mit der internationalen Entwicklung stehen.

Der vorliegende Bericht enthält eine Darlegung zum Bedarf für Sicherheitskriterien und eine Einordnung der Sicherheitskriterien in das deutsche Regelwerk sowie Vorschläge für die Präzisierung und Weiterentwicklung der deutschen Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk. Der internationale Stand von Wissenschaft und Technik im Bereich der Regeln und Richtlinien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle wurde in gesonderten Berichten /BOR 97, 98/ dargestellt. Die daraus folgenden Erkenntnisse werden im vorliegenden Bericht im Hinblick auf die Weiterentwicklung der Sicherheitskriterien berücksichtigt.

Im Einklang mit Art. 2 lit. i) des Übereinkommens über nukleare Entsorgung wird die Rückholbarkeit der radioaktiven Abfälle nicht berücksichtigt.

A.3 Bedarf für Sicherheitskriterien

Die Errichtung und der Betrieb eines Endlagers bedürfen nach § 9b AtG der Planfeststellung. Hinsichtlich der Sicherheit einer solchen Anlage ist die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Schadensvorsorge zu gewährleisten. Die Sicherheitskriterien legen die zu fordernden Sicherheitsprinzipien und Schutzziele der Endlagerung und die daraus folgenden grundlegenden Anforderungen an ein Endlager fest. Sie stellen somit eine Konkretisierung der Schadensvorsorge dar.

Der Forderung nach Sicherheitskriterien kann zunächst aus der nach § 7 Abs. 2 Satz 1 Nr. 3 i. V. m. § 9b Abs. 3 Satz 1 AtG vorgesehenen Schadensvorsorge abgeleitet werden. In Verbindung mit den grundrechtlich verankerten Schutzpflichten des Staates, die ihren Niederschlag in der Zweckbestimmung des § 1 Nr. 2 AtG gefunden haben, ergibt sich aus dieser Regelung auch das Gebot der Langzeitsicherheit.

Artikel 15 des Gesetzes zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung fordert im Ergebnis ebenfalls die Festlegung von Sicherheitskriterien. Danach ist jede Vertrags-

partei dazu verpflichtet, die geeigneten Maßnahmen zu treffen, um sicherzustellen, dass vor dem Bau eines Endlagers für die Zeit nach dem Verschluss eine systematische Sicherheitsbewertung und eine Bewertung der Auswirkungen auf die Umwelt vorgenommen und die Ergebnisse anhand der von staatlicher Stelle festgelegten Kriterien bewertet werden.

Gebraucht werden die Sicherheitskriterien bei Planfeststellungsverfahren für Endlager. Sie dienen der Rechtssicherheit für Antragsteller, Genehmigungsbehörde und Bundesaufsicht sowohl im Verwaltungsverfahren als auch in sich ggf. anschließenden gerichtlichen Auseinandersetzungen. Außerhalb von Planfeststellungsverfahren können sie zur Beurteilung der Endlagersicherheit herangezogen werden.

Darüber hinaus bilden die Sicherheitskriterien im Dialog mit der Öffentlichkeit über die Anforderungen an die Sicherheit von Endlagern und bei der Suche neuer Endlagerstandorte eine Grundlage, die die Transparenz erhöht und damit zur Akzeptanz beiträgt.

A.4 Einordnung der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in das deutsche Regelwerk

A.4.1 Bestehende Regelungen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle

In Deutschland wird die Endlagerung radioaktiver Abfälle durch Rechtsnormen und untergesetzliche Regelungen geregelt.

A.4.1.1 Rechtsnormen

Rechtsnormen sind generell abstrakte Regelungen, die Pflichten und Rechte für den Bürger oder sonstige selbstständige Rechtspersonen begründen, ändern oder aufheben. Hierzu zählen formelle Gesetze des Parlaments als Gesetzgebungskörperschaft, darauf basierende Rechtsverordnungen und Satzungen (Gesetze im materiellen Sinn). Die für die Endlagerung radioaktiver Abfälle wesentlichen Gesetze und Verordnungen sind das Atomgesetz (AtG) nebst Strahlenschutzverordnung (StrlSchV), das Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung, das Bundesberggesetz (BBergG) und das Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG). Zudem sind das Wasser-

haushaltsgesetz (WHG), das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) und das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) zu nennen. Die Auflistung macht deutlich, dass für die Endlagerung auch eine Reihe von Gesetzen und Verordnungen aus dem nichtnuklearen Bereich einschlägig sind.

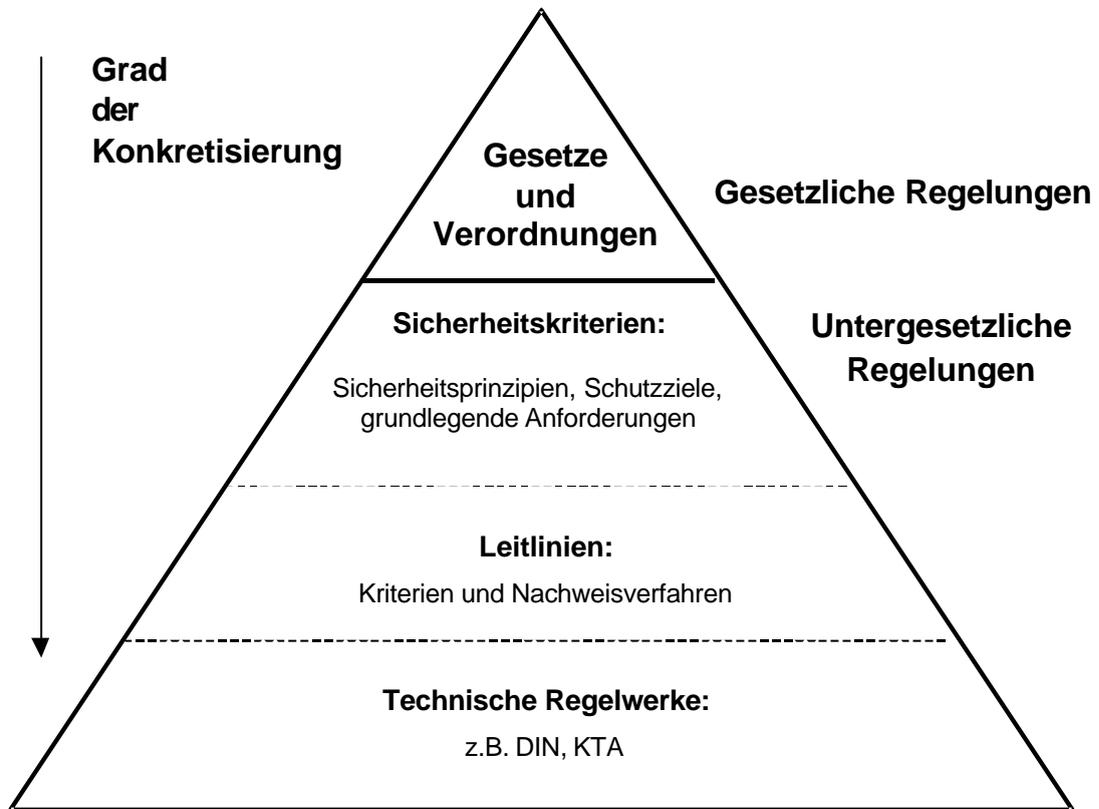
Die Rechtsnormen, die die Beseitigung radioaktiver Abfälle regeln, enthalten in der Regel Sicherheitsanforderungen in allgemeiner Form wie z.B. Genehmigungsbedürftigkeit für bestimmte Betätigungen mit radioaktiven Stoffen, Vorsorge und Prüfung nach dem Stand von Wissenschaft und Technik. Außerdem sind in diesen Rechtsnormen die Zuständigkeiten geregelt. Der Grad der Konkretisierung der rechtlichen Anforderungen innerhalb der genannten Rechtsnormen ist sehr unterschiedlich. Das Atomgesetz enthält die Anforderungen als unbestimmte Rechtsbegriffe, wie z.B. die Forderung nach der Schadensvorsorge entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik gemäß § 7 Abs. 2 Satz 1 Nr. 3 AtG. Mit der Strahlenschutzverordnung werden konkrete Anforderungen bis hin zu Grenzwerten, z.B. die zulässige Strahlendosis, festgelegt.

In den Rechtsnormen ist für die Nachbetriebsphase nicht geregelt, welche konkreten Anforderungen zur erforderlichen Schadensvorsorge für die Endlagerung radioaktiver Abfälle erfüllt werden müssen.

A.4.1.2 Untergesetzliche Regelungen

Untergesetzliche Regelungen sind solche ohne originäre Rechtsnormqualität. Im Gegensatz zu den Gesetzen im materiellen Sinn besitzen die Vorschriften grundsätzlich nicht den Charakter allgemein verbindlicher Regelungen. Zu dieser Kategorie gehören Sicherheitskriterien, Leitlinien, technische Regelwerke und bergbauliche Vorschriften. Die Ausfüllung unbestimmter Rechtsbegriffe, wie dem Stand von Wissenschaft und Technik i. S. d. § 7 Abs. 2 Satz 1 Nr. 3 AtG, kann jedoch auch durch sog. normkonkretisierende Verwaltungsvorschriften erfolgen, die nur einer begrenzten gerichtlichen Überprüfung unterliegen und insofern eine (begrenzte) Außenwirkung haben. Zudem kommt Regelwerken nichtstaatlicher Gremien, wie etwa den RSK-Leitlinien und -Empfehlungen, den SSK-Empfehlungen und den KTA-Regeln eine indizielle Bedeutung hinsichtlich des Inhalts des in Bezug genommenen gesetzlichen Anknüpfungspunktes zu. Die jeweils anwendende Behörde bzw. das prüfende Gericht müssen sich die Gewissheit darüber verschaffen, ob und in welchem Umfang das Regelwerk zur

Konkretisierung des unbestimmten Rechtsbegriffs geeignet ist. Wird dieser Umstand bejaht, so dürfen sich die Behörden und Gerichte nur aus besonderen Gründen von den Inhalten der untergesetzlichen Regelungen distanzieren.



Die Sicherheitskriterien konkretisieren die Sicherheitsprinzipien und Schutzziele sowie Anforderungen an die Endlagerung.

Die Leitlinien enthalten Kriterien und Nachweisverfahren, anhand derer die Erfüllung der Anforderungen aus den Sicherheitskriterien im konkreten Fall nachgewiesen werden kann.

In den bereits bestehenden Technischen Regelwerken sind die sicherheitstechnischen Anforderungen, z.B. zur Auslegung und Ausführung von Anlagenteilen enthalten. Sie repräsentieren in der Regel den anerkannten Stand der Technik.

Abbildung 1: System rechtlicher Regelungen für kerntechnische Anlagen

Eine untergesetzliche Regelung stellen auch die vom BMI 1983 veröffentlichten Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk dar /BMI 83/. Diese Sicherheitskriterien konkretisieren die atomrechtlich geforderte Schadensvorsorge und enthalten

- Schutzziele für die Endlagerung mit Festlegung eines Grenzwertes für die Individualdosis in der Nachbetriebsphase entsprechend § 45 der StrlSchV /STR 94/
- Anforderungen an die Maßnahmen zur Verwirklichung der Schutzziele
- Anforderungen an den Standort des Endlagers
- Voraussetzungen für Errichtung und Betrieb eines Endlagers
- Anforderungen an die Standorterkundung
- Anforderungen für Errichtung und Betrieb eines Endlagerbergwerkes
- Anforderungen an die endzulagernden Abfälle
- Anforderungen für die Stilllegung des Endlagers nach seiner Betriebsphase
- Anforderungen an die Überwachung, Dokumentation und Kennzeichnung für die Nachbetriebsphase.

Die oben genannten Sicherheitskriterien enthalten somit nicht nur grundlegende Sicherheitsprinzipien und Schutzziele, sondern auch technische Anforderungen und Vorgehensweisen zur Erfüllung dieser Schutzziele, wie sie in anderen Bereichen der Kerntechnik in Leitlinien geregelt sind.

Das kerntechnische Regelwerk wurde in erster Linie für Kernkraftwerke entwickelt; es ist daher nicht unmittelbar auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk anwendbar. Teile dieses Regelwerkes sind jedoch auf die Auslegung und den Betrieb eines Endlagers übertragbar. Die bergbaulichen Vorschriften und technischen Regeln sowie Unfallverhütungsvorschriften stellen in der Regel den anerkannten Stand der Technik in ihren Geltungsbereichen dar.

A.4.2 Fortentwicklung der untergesetzlichen Regelungen für die Endlagerung

Das System und der Inhalt der untergesetzlichen Regelungen für die Endlagerung sollten zur Einhaltung des Standes von Wissenschaft und Technik in zweierlei Hinsicht weiter entwickelt werden.

1. Die Sicherheitskriterien aus dem Jahr 1983 sind inhaltlich in einigen Punkten zu präzisieren oder zu überarbeiten. Insbesondere sind die international entwickelten und in den Publikationen der IAEA enthaltenden Sicherheitsprinzipien zu berücksichtigen. Außerdem ist die Weiterentwicklung auf dem Gebiet der Strahlenschutzanforderungen, wie sie sich in den ICRP- Empfehlungen 60 /ICR 91/, in den EU- Grundnormen /KEG 96/ und der neuen Strahlenschutzverordnung /STR 01/ wider spiegeln, einzubeziehen.

Die Grundlage der Sicherheitskriterien 1983 war die Endlagerung von radioaktiven Abfällen, wie sie bei einem geschlossenen Kernbrennstoffkreislauf mit Wiederaufarbeitung anfallen (sog. Integriertes Entsorgungskonzept). Mit der rechtlichen Gleichstellung der direkten Endlagerung bestrahlter Brennelemente im Jahr 1994 und der Beschränkung der Entsorgung der Kernkraftwerke ab dem 1. Juli 2005 auf den Weg der direkten Endlagerung der bestrahlten Brennelemente liegen veränderte sachliche Voraussetzungen für die Endlagerung vor. Außerdem hat die praktische Anwendung der Sicherheitskriterien im Planfeststellungsverfahren zum Projekt Konrad verschiedentlich Hinweise für Verbesserungsmöglichkeiten und erforderliche Präzisierungen ergeben.

2. Es scheint zweckmäßig, die Sicherheitskriterien auf die Festlegung der Sicherheitsprinzipien, Schutzziele und grundlegenden Anforderungen, die für den Nachweis der Betriebs- und Langzeitsicherheit von Endlagern gelten, zu beschränken. Die Anforderungen, die für die Auswahl des Standortes eines Endlagers gelten, werden eigenständig im Rahmen der Entwicklung und Festlegung eines Auswahlverfahrens definiert werden (Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd)).

Technische Anforderungen an die radioaktiven Abfälle sowie Anforderungen an die Auslegung, Errichtung und den Betrieb des Endlagers können – wie in anderen Bereichen der Kerntechnik – in Form von Leitlinien festgelegt werden. Leitlinien können einen wesentlichen Beitrag zur Planungssicherheit für den Antragsteller leisten und als Maßstab der Prüfung durch die Genehmigungsbehörden und ihre Gutachter dienen.

Es erscheint zweckmäßig, je eine Leitlinie für die Betriebsphase und für die Nachbetriebsphase eines Endlagers zu erstellen. Die Leitlinie zum Betrieb soll den bestimmungsgemäßen Betrieb und eine Berechnungsgrundlage für Störfälle beinhalten. Die

Leitlinie zur Nachbetriebsphase soll den Nachweis der Langzeitsicherheit, einschließlich der Szenarienanalysen sowie die Berechnung der Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase umfassen.

Wenn Bedarf besteht, können in Zukunft weitere Leitlinien entwickelt werden.

Teil B

B Vorschläge für eine Präzisierung und Weiterentwicklung der Sicherheitskriterien

Nachstehend werden Vorschläge zur Präzisierung und Weiterentwicklung der deutschen Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk vorgelegt.

Die im Folgenden kursiv geschriebenen Textpassagen sollen Bestandteil künftiger Sicherheitskriterien sein, während die anderen der Erläuterung dienen.

B.1 Einführung

In Deutschland sollen radioaktive Abfälle durch Endlagerung in einem Bergwerk entsorgt werden. Art und Menge der radioaktiven Abfälle sowie der Nachweis der langzeitigen Sicherheit des Endlagers am Standort sind wesentliche Voraussetzungen für die Entwicklung eines Endlagerkonzeptes und Grundlage für die Genehmigung eines Endlagers.

Radioaktive Abfälle

In Kernkraftwerken, in den Anlagen der Kernbrennstoffversorgung und -entsorgung, in Forschungseinrichtungen, in der Industrie und in der Medizin fallen radioaktive Abfälle an, die sich nach ihrem Volumen, ihrem physikalisch-chemischen Zustand, ihrer stofflichen Zusammensetzung, ihrem Gehalt an radioaktiven Stoffen und damit der Radiotoxizität unterscheiden. Es handelt sich dabei um Rohabfälle, die entsprechend der Klassifizierung der IAEA /IAE 94a/ in schwach- und mittelradioaktive - je nach Halbwertszeit unterteilt in kurzlebige und langlebige - Abfälle bzw. in hochradioaktive Abfälle eingeteilt werden können. In Deutschland gilt im Hinblick auf die Endlagerung zudem eine Einteilung in radioaktive Abfälle mit Wärmeentwicklung und in radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung. Rückstände aus der Urangewinnung werden grundsätzlich für eine Wiederverwertung vorgesehen und stellen somit derzeit keine Abfälle dar. Scheidet die Verwertung des abgereicherten Urans objektiv aus, oder wird

sie von den entsorgungspflichtigen Inhabern der Stoffe nicht weiter betrieben, werden auch die Rückstände aus der Urangewinnung von der Kategorie der radioaktiven Abfälle erfasst.

Die radioaktiven Abfälle aus Kernkraftwerken und anderen kerntechnischen Anlagen stellen nach Aktivitätsinventar und Volumen bei weitem den größten Anteil der zu entsorgenden radioaktiven Abfälle dar. Bei einer Stromerzeugung von 1 Gwa in einem Leichtwasserreaktor fallen etwa 25 t bestrahlte Brennelemente an. Die Betriebsabfälle in einem Kernkraftwerk belaufen sich auf etwa 75 m³ pro Jahr. Nach Zwischenlagerung mit Abklingen der Wärmeleistung und Zerfall der kurzlebigen radioaktiven Stoffe können die bestrahlten Brennelemente endlagergerecht verpackt der Endlagerung zugeführt werden. Ein noch bis zum Jahre 2005 zugelassener zweiter Entsorgungsweg führt über die Wiederaufarbeitung der bestrahlten Brennelemente mit Abtrennung der wiederverwendbaren Kernbrennstoffe und Verglasung der verbleibenden unbrauchbaren Spaltprodukte und Actiniden. Die Glaskokillen stellen hochradioaktive Abfälle dar. Für eine Stromerzeugung von 1 Gwa fallen etwa 3 m³ verglaste hochradioaktive Abfälle an sowie weitere wärmeentwickelnde und gering wärmeentwickelnde Abfälle.

Radioaktive Abfälle können eine Gefährdung für Mensch und Umwelt darstellen. Ihr radiologisches Gefährdungspotenzial und seine zeitliche Entwicklung hängt vom Aktivitätsinventar, von der Art und Strahlung, der Radiotoxizität und der Halbwertszeit der in den Abfällen enthaltenen Radionuklide ab. Zum Schutz von Mensch und Umwelt müssen die Abfälle von der Biosphäre so isoliert werden, dass von ihnen keine Gefährdung ausgeht. Die erforderliche Isolation bestimmt sich aus den Halbwertszeiten und der Aktivität der Radionuklide. Viele Radionuklide zerfallen rasch, so dass sie nicht lange von der Biosphäre isoliert werden müssen, andere Radionuklide haben z.T. sehr lange Halbwertszeiten. Daraus leiten sich bei entsprechend großem Aktivitätsinventar hohe Anforderungen für eine Isolation dieser Radionuklide ab.

Endlagerung

Die Endlagerung soll für alle radioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Formationen an einem Standort mit einer günstigen geologischen Gesamtsituation erfolgen. Ein oberflächennaher Verbleib ist bei Abfällen mit rasch abklingender Radioaktivität (Abklingabfälle) zulässig /SSK 98/.

Die Endlagerung verfolgt das Prinzip des Konzentrierens und Isolierens in einer günstigen geologischen Gesamtsituation nach dem Mehrbarrierenkonzept von ineinandergreifenden, sich unterstützenden Barrieren. Die fundamentale Sicherheitsfunktion bei der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ist die Isolation. Für den Fall eines Austritts von Radionukliden aus dem Endlager soll das Endlagersystem günstige Rückhalte- und Verzögerungseigenschaften aufweisen, so dass die Radionuklidkonzentration auf ein unbedenkliches Maß reduziert wird.

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

Prognosezeitraum

Im Standortauswahlverfahren /AKE 01/ werden Standorte mit einer günstigen geologischen Gesamtsituation ausgewiesen, deren Entwicklungsgeschichte sich über geologische Zeiträume zurückverfolgen lässt. Für diese Standorte lassen sich in diesen Zeiträumen stabile Verhältnisse mit einer wissenschaftlich fassbaren Bandbreite ihrer für die Endlagerung wesentlichen Eigenschaften nachweisen. Die geowissenschaftlichen Kenntnisse über einen so ausgewählten, durch standortspezifische Untersuchungen charakterisierten und als geeignet befundenen Standort lassen eine wissenschaftlich begründete Prognose über die zukünftige Entwicklung der geologischen Gesamtsituation in der Größenordnung von einer Million Jahre zu. Jenseits dieses Prognosezeitraumes ist eine wissenschaftlich begründete geologische Langzeitprognose in der Regel nicht mehr möglich.

Sicherheitskonzept

Basis der Planung und Auslegung eines Endlagers ist ein Sicherheitskonzept, das sich auf geologische Standortgegebenheiten und technische/geotechnische Maßnahmen abstützt. Aufgrund Jahrhunderte langer Erfahrungen mit dem Bergbau wird die Endla-

gerung in einem Bergwerk favorisiert, die eine Erkundung wesentlicher Parameter der geologischen Gesamtsituation von unter Tage und eine auf die Gegebenheiten optimierte Planung und Einlagerung erlaubt. Zur Gewährleistung eines sicheren Betriebes werden geeignete Einlagerungs- und Handhabungstechniken sowie betriebliche Sicherheitsmaßnahmen realisiert. Entscheidend für die Langzeitsicherheit eines Endlagers sind das Isolationspotenzial des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sowie das darauf abgestimmte Mehrbarrierensystem. Anforderungen an die Abfälle leiten sich aus den Sicherheitsanforderungen an den Betrieb und Nachbetrieb ab. Dem Antragsteller obliegt es, die Endlagerungs- und Einlagerungsbedingungen im Einzelfall festzulegen und diese behördlich genehmigen zu lassen.

Nachweis der Sicherheit

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

B.2 Anwendungsbereich der Sicherheitskriterien

Die vorliegenden Sicherheitskriterien beziehen sich ausschließlich auf radiologische Schutzziele und Anforderungen, die das in § 1 Nr. 2 und § 7 Abs. 2 Satz 1 Nr. 3 des Atomgesetzes enthaltene Gebot der atomrechtlichen Schadensvorsorge konkretisieren. Nichtradiologische Anforderungen und Anforderungen zum Schutz gegen Einwirkung Dritter sind nicht Gegenstand dieser Sicherheitskriterien. Im Einklang mit Art. 2 lit. i) des Übereinkommens über nukleare Entsorgung wird die Rückholbarkeit der radioaktiven Abfälle nicht berücksichtigt.

Die Sicherheitskriterien gelten für das nach § 9b Abs. 1 AtG durchzuführende Planfeststellungsverfahren für ein zur Endlagerung radioaktiver Abfälle vorgesehenes Bergwerk an einem ausgewählten Standort.

B.3 Definitionen

Biosphäre ist generell definiert als die Gesamtheit der mit lebenden Organismen besiedelten Bereiche der Erde. Für die Zwecke dieses Berichtes wird diese Definition eingeschränkt auf die Bereiche der Erde, in oder aus denen Radionuklide über Luft, Grundwasser und Boden durch Inhalation oder Ingestion in den menschlichen Organismus aufgenommen oder durch die Haut absorbiert werden können.

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

Endlagersystem ist die geologische Gesamtsituation des Standortes und das Endlagerbergwerk mit seinen Komponenten wie Bergwerk, Abfallbinde, Versatz und Dichtelemente.

Geologisches Barrierensystem ist die Gesamtheit der geologischen Einheiten zwischen Einlagerungsbereich und Biosphäre, die eine Schadstoffausbreitung ver- oder behindern.

Günstige geologische Gesamtsituation ist die Gesamtheit der Standorteigenschaften, die mit hoher Wahrscheinlichkeit die Anforderungen an die Endlagerung erfüllen. Die günstige geologische Gesamtsituation wird charakterisiert durch Eigenschaften wie stabiler geologisch-tektonischer Bau, kein tief reichender Grundwasserleiter mit meteorischem Wasser, geringe rezente Tektonik, geringe Gesteinspermeabilität, gute Rückhalteeigenschaften der Gesteine für Radionuklide, günstige gebirgsmechanische Eigenschaften der Einlagerungsformation.

Kritikalität ist der Zustand einer sich selbst erhaltenden Kettenreaktion, d.h. die Neutronenproduktionsrate ist gleich oder größer als die Neutronenverlustrate.

Mehrbarrierensystem ist die Gesamtheit der ineinandergreifenden, sich unterstützenden geologischen, geotechnischen und technischen Barrieren (gestaffelte Sicherheitsbarrieren).

Nachbetriebsphase ist die Zeitphase der Endlagerung nach Beendigung des Einlagebetriebs und dem ordnungsgemäßen Verschluss des Endlagers.

Robustheit des Endlagersystems ist die Unempfindlichkeit der Barrierenwirksamkeit des Endlagersystems gegenüber inneren und äußeren Einflüssen (einschließlich Störungen).

Wirtsgestein ist das Gestein, in das die Abfälle eingelagert werden.

B.4 Aufgabe der Endlagerung

Die Aufgabe der Endlagerung wird wie folgt definiert (nach /IAE 95, GNE 98/):

Die Endlagerung radioaktiver Abfälle hat

- *den langzeitigen Schutz von Mensch und Umwelt vor den potenziell schädlichen Auswirkungen der eingelagerten radioaktiven Abfälle zu gewährleisten und*
- *Sorge dafür zu tragen, dass zukünftigen Generationen keine unzumutbaren Lasten und Verpflichtungen auferlegt werden.*

B.5 Sicherheitsprinzipien für die Endlagerung

Ausgehend von den fundamentalen Sicherheitsprinzipien der IAEA sowie des Gesetzes zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung /IAE 95, GNE 98/ für den sicheren Umgang mit radioaktiven Abfällen werden folgende Sicherheitsprinzipien für die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen formuliert:

- *Die aus der Endlagerung resultierende Strahlenexposition für Mensch und Umwelt soll niedrig sein gegenüber der natürlichen Strahlung.*
- *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 radioaktiver Stoffe in Deutschland dürfen außerhalb der Grenzen Deutschlands nicht größer sein als innerhalb zulässig.*

- *Für die Betriebs-, Stilllegungs- und Nachbetriebsphase des Endlagers ist die Sicherheit nachzuweisen. Bestandteil dieser Nachweise sind standortspezifische Sicherheitsanalysen nach dem Stand von Wissenschaft und Technik.*
- *Standortauswahl und Endlagerauslegung müssen die langzeitige Sicherheit gewährleisten. Der Nachweis der Sicherheit in der Nachbetriebsphase des Endlagers muss über einen Zeitraum von einer Million Jahre geführt werden können.*
- *Die Sicherheit des Endlagers in der Nachbetriebsphase darf sich nicht auf aktive Maßnahmen nach dem Verschluss abstützen.*

B.6 Radiologische Schutzziele

Die radiologischen Schutzziele, die für die Endlagerung radioaktiver Stoffe gelten, ergeben sich aus dem Atomgesetz, der Strahlenschutzverordnung und aus dem Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung.

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.

Die Errichtung und der Betrieb eines Endlagers für radioaktive Abfälle bedürfen einer Planfeststellung nach § 9b AtG. Dabei müssen die nach § 7 Abs. 2 Nr. 1, 2, 3 und 5 AtG genannten Voraussetzungen erfüllt und die Umweltverträglichkeit festgestellt sein. 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.

Gemäß § 5 StrlSchV dürfen bei Tätigkeiten die zugelassenen Dosisgrenzwerte nicht überschritten werden. Nach § 6 StrlSchV ist jede unnötige Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt zu vermeiden. Auch unterhalb der 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.

Das Gesetz zu dem Übereinkommen über die nukleare Entsorgung enthält in Artikel 24 Anforderungen zum Strahlenschutz während des Betriebes sowie weitere Anforderun-

gen, insbesondere in den Artikeln 11, 13, 14, 15 und 16, die die Sicherheit eines Endlagers betreffen.

B.6.1 Betriebsphase des Endlagers

B.6.1.1 Schutz des Menschen und der Umwelt

Bei Errichtung, Betrieb und Verschluss des Endlagers sind die nach Strahlenschutzverordnung geltenden Anforderungen für den Schutz der Beschäftigten, der Bevölkerung und der Umwelt einzuhalten.

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

Insbesondere sind folgende Bestimmungen der Strahlenschutzverordnung einschlägig:

§ 46: Begrenzung der Strahlenexposition der Bevölkerung

(1) Für Einzelpersonen der Bevölkerung beträgt der Grenzwert der effektiven Dosis durch Strahlenexpositionen aus Tätigkeiten nach § 2 Abs. 1 Nr. 1 ein Millisievert im Kalenderjahr.

(2) Unbeschadet des Absatzes 1 beträgt der Grenzwert der Organdosis für die Augenlinse 15 Millisievert im Kalenderjahr und der Grenzwert der Organdosis für die Haut 50 Millisievert im Kalenderjahr.

(3) Bei Anlagen oder Einrichtungen gilt außerhalb des Betriebsgeländes der Grenzwert für die effektive Dosis nach Absatz 1 für die Summe der Strahlenexposition aus Direktstrahlung und der Strahlenexposition aus Ableitungen. Die für die Strahlenexposition aus Direktstrahlung maßgebenden Aufenthaltszeiten richten sich nach den räumlichen Gegebenheiten der Anlage oder Einrichtung oder des Standortes; liegen keine begründeten Angaben für die Aufenthaltszeiten vor, ist Daueraufenthalt anzunehmen.

§ 47: Begrenzung der Ableitung radioaktiver Stoffe

Der Grenzwert für die effektive Dosis der durch Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft oder Wasser aus dem Endlager während der Betriebsphase jeweils bedingten Strahlenexposition beträgt 0,3 mSv im Kalenderjahr für Einzelpersonen der Bevölkerung.

§ 49: Sicherheitstechnische Auslegung für den Betrieb von Kernkraftwerken, für die standortnahe Aufbewahrung bestrahlter Brennelemente und für Anlagen des Bundes zur Sicherstellung und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle

Bei der Planung baulicher und sonstiger technischer Schutzmaßnahmen gegen Störfälle darf im ungünstigsten Störfall durch Freisetzung radioaktiver Stoffe in der Umgebung der Anlage höchstens eine effektive Dosis von 50 mSv zugrunde gelegt werden. Maßgebend für eine ausreichende Vorsorge gegen Störfälle ist dabei der Stand von Wissenschaft und Technik.

§ 55: Schutz bei beruflicher Strahlenexposition

Für beruflich strahlenexponierte Personen beträgt der Grenzwert der effektiven Dosis 20 mSv im Kalenderjahr. Außerdem sind Grenzwerte für die Organdosis einzuhalten.

B.6.1.2 Optimierung des Strahlenschutzes

Jede Strahlenexposition und Kontamination von Mensch und Umwelt ist unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls auch unterhalb der Grenzwerte so gering wie möglich zu halten (§ 6 StrlSchV).

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

Bei sehr kleinen Dosisbeiträgen von etwa 0,03 mSv pro Kalenderjahr oder kleiner ist eine Optimierung nicht mehr erforderlich (Konzept der trivialen Dosis).

B.6.2 Nachbetriebsphase

B.6.2.1 Schutz des Menschen

Radiologisches Schutzziel für die Nachbetriebsphase ist die Begrenzung des Risikos eines Individuums, einen schweren gesundheitlichen Schaden aus der Strahlenexposition (Individualdosis) zu erleiden. Die Individualdosis bezieht sich auf den Menschen mit seinen heute geltenden Verhaltensweisen.

Das Schutzziel gilt zeitlich unbegrenzt.

Für den Sicherheitsnachweis des Endlagers sind die potenziellen natürlichen Entwicklungen des Endlagersystems, die aufgrund innerer oder äußerer Ursache ausgelöst werden können, unter Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeit der jeweiligen Entwicklung zugrunde zu legen. Außerdem sind Einflüsse, die durch unbeabsichtigte Eingriffe des Menschen ausgelöst werden, zu berücksichtigen.

B.6.2.2 Schutz der Umwelt

Ein Austritt von Radionukliden aus dem verschlossenen Endlager muss so eingeschränkt sein, dass ein angemessener Schutz der Umwelt sichergestellt ist.

Der Schutz umfasst die natürlichen Lebensgrundlagen des Menschen sowie Flora und Fauna. Für den Schutz der Umwelt kann ein eigenständiges Schutzziel heute noch nicht entwickelt und definiert werden. Bei der Bewertung von Maßnahmen zum Schutz der Umwelt ist von einer qualitativen Betrachtung des heute vorhandenen Ökosystems auszugehen.

Zur Bewertung von Radionuklidfreisetzungen können in der Natur vorkommende Radionuklide mit den Gegebenheiten am Standort und in seiner Umgebung verglichen werden. Für nicht in der Natur auftretende Radionuklide liegen keine direkt anwendbaren Bewertungsmaßstäbe vor. Für diese Radionuklide sollte der Schutz der Umwelt bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle an Hand der Dosis und der chemisch-physikalischen Stoffeigenschaften bewertet werden, wobei der Stand vergleichbarer industrieller Tätigkeit berücksichtigt werden sollte.

B.6.2.3 Optimierung des Strahlenschutzes

Analog zu den Anforderungen der StrlSchV ist auch in der Nachbetriebsphase das Optimierungsgebot zu erfüllen (siehe auch /GNE 98/).

Die Optimierung des Strahlenschutzes unter Gesichtspunkten der Langzeitsicherheit ist ein Abwägungsprozess der radiologischen Sicherheit eines Endlagers unter Berücksichtigung ökonomischer und soziologischer Faktoren. Ziel ist es sicherzustellen, dass angemessene Maßnahmen zur Reduzierung zukünftiger potenzieller radiologischer Belastungen getroffen wurden. Der Optimierung wird durch einen schrittweise und iterativ geführten Prozess bei der Endlagergestaltung Rechnung getragen, d.h. durch Standortauswahl, Standortcharakterisierung, Eignungsnachweis, Endlagerplanung und -auslegung. Die Standortauswahl, die Entwicklung eines Endlagerkonzeptes sowie die Auslegung des Endlagers erfolgen im Hinblick auf die Reduzierung von Eintrittswahrscheinlichkeiten potenzieller ungünstiger Ereignisse und Entwicklungen des Endlagersystems - sowohl bezogen auf die natürlichen Entwicklungen als auch das unbeabsichtigte menschliche Eindringen - sowie deren Auswirkungen. Weitere Maßnahmen zur Optimierung sind die Gestaltung eines robusten Endlagersystems, die Durchführung von Sicherheitsnachweisen in jedem Prozessschritt, der Einsatz von Techniken nach Stand von Wissenschaft und Technik, die Anwendung qualifizierter Verfahren, Qualitätssicherungsmaßnahmen sowie der Einsatz von qualifiziertem Personal /ICR 98a/.

Das Ziel der Optimierung des Strahlenschutzes in der Nachbetriebsphase ist erreicht, wenn der Nachweis der Einhaltung des Schutzzieles geführt ist, die Endlagerauslegung nach Stand von Wissenschaft und Technik erfolgt ist, und der Antragsteller nachgewiesen hat, dass die Planungsgrundsätze (Kap. B.8.1) eingehalten wurden.

B.7 Standort

Die Auswahl eines potenziellen Endlagerstandortes erfolgt unter Anwendung des qualifizierten Standortauswahlverfahrens /AKE 01/.

Standorterkundung

Die Standorteigenschaften müssen in einem Erkundungsprogramm nach qualifizierten Methoden erhoben und bewertet werden, um ausreichende Kenntnis der Standortcharakteristika hinsichtlich der Eignung des Standorts und der Bewertung der Sicherheit zu erhalten. Die Erkundungsarbeiten müssen sowohl von über Tage als auch von unter Tage durchgeführt werden. Sie müssen derart ausgeführt werden, dass das Isolationsvermögen des Standortes so wenig wie möglich beeinträchtigt wird. Auf der Basis der Erkundungsergebnisse müssen die sicherheitsrelevanten Standorteigenschaften dargelegt werden. In situ - Messungen sind vorzusehen. In einem Testplan ist darzulegen, welche zusätzlichen Untersuchungen zu wesentlichen Auslegungsparametern geotechnischer und technischer Komponenten (z.B. Verschlussmaßnahmen) sowie deren Wechselwirkung mit dem Wirtsgestein und den natürlichen Gegebenheiten durchgeführt werden müssen.

Standortcharakterisierung

Der Antragsteller hat die Ergebnisse der Standorterkundung und eine Standortcharakterisierung sowohl im Hinblick auf die betriebliche Sicherheit als auch auf die Langzeitsicherheit darzulegen.

Geowissenschaftliche Langzeitprognose

Der Antragsteller hat die aufgrund von inneren und äußeren Ursachen möglichen zukünftigen Entwicklungen des geologischen Barrierensystems in einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose zu beschreiben. Dabei muss die anthropogene Beeinflussung des geologischen Barrierensystems durch die Errichtung des Endlagerbergwerkes sowie durch die Einlagerung von radioaktiven Abfällen in die Betrachtung mit einbezogen werden.

B.8 Planung und Errichtung

B.8.1 Planungsgrundsätze

Der Planung des Endlagersystems sind folgende Planungsgrundsätze (z.B. /GNE 98, ICR 98a/) zugrunde zu legen:

- *Es ist ein Sicherheitskonzept zu erstellen, in dem darzulegen ist, mit welchen Maßnahmen die Sicherheit während des Betriebes, bei der Stilllegung sowie in der Nachbetriebsphase erreicht werden soll. Das Sicherheitskonzept sowie die technische Auslegung des Endlagers sind durch den Antragsteller darzulegen. Insbesondere sind Angaben vorzulegen zu Art und Menge der endzulagernden Abfallgebinde, zum Aktivitätsinventar und zu den Radionukliden in den einzulagernden Abfällen sowie ihren physikalisch-chemischen Stoffeigenschaften.*
- *Es ist ein robustes Endlagersystem anzustreben.*
- *Das Endlager soll als Bergwerk errichtet werden. Das Bergwerk soll nach dem Stand der Technik errichtet und betrieben werden.*
- *Zur Minimierung der Einflüsse auf das Endlager aufgrund übertägiger Ereignisse soll das Einlagerungsniveau in mindestens einigen hundert Metern Tiefe liegen.*
- *Durch ein Mehrbarrierensystem muss sichergestellt sein, dass aus dem Endlager kein unzulässiger Austritt radioaktiver Stoffe in die Biosphäre erfolgt. Im Hinblick auf mögliche Schwächungen einzelner Barrieren sowie realistischerweise anzunehmende Veränderungen ihrer Wirksamkeit muss das Mehrbarrierensystem insgesamt ausreichende Sicherheitsreserven aufweisen.*
- *Die Wirksamkeit der Barrieren darf nicht von einer Instandsetzung oder von Kontrollen bzw. Instandhaltungsmaßnahmen in der Nachbetriebsphase abhängen.*
- *Komponenten, die entscheidend für die Sicherheit des Endlagers sind, für die jedoch keine anerkannten Regeln der Technik vorliegen, müssen erprobt werden.*
- *Es sind Maßnahmen zur Vermeidung menschlicher Aktivitäten, die das Isolationsvermögen des Endlagers nachteilig beeinflussen können, vorzusehen.*
- *Es sollen angemessene Managementprinzipien zur Anwendung gelangen wie Qualitätssicherungsmaßnahmen, Einsatz qualifizierter Rechenverfahren, Einsatz qualifizierten Personals, Durchführung von adäquaten Messprogrammen während der Betriebsphase zur Überwachung der Auslegungsgrundlagen.*

B.8.2 Qualitätssicherung

Es ist ein umfassendes Qualitätssicherungsprogramm zu erstellen und einzuhalten, welches alle Phasen der Endlagerung abdeckt.

B.8.3 Auslegung

Die Darstellung der Endlagerauslegung muss die Anforderungen an die Auslegung und die Auslegungsparameter enthalten. Dazu gehören die geotechnische und bergmännische Auslegung wie die Einlagerungstechnik (z.B. Streckenlagerung, Bohrlochlagerung), die Verfüllung und der Schachtverschluss. Außerdem ist die Beherrschung der Gas- und Wärmeentwicklung, die Abschirmung der Strahlung der Abfallbinde bei der Zwischen- und Einlagerung und - bei spaltstoffhaltigen Abfällen - die Einhaltung der Kritikalitätssicherheit darzulegen. Überwachungsmaßnahmen und Beweissicherungsmessungen nach Verschluss des Endlagers sind vorzusehen.

Der Auslegung des Endlagers müssen standortspezifische Sicherheitsanalysen zugrunde liegen. Mit Hilfe der Sicherheitsanalysen sollen Anforderungen an Komponenten und Teilsysteme erkannt und festgelegt werden. Im Sicherheitskonzept ist darzulegen, welche Sicherheitsanalysen für den bestimmungsgemäßen Betrieb, die Stilllegung und die Nachbetriebsphase der Auslegung zu Grunde liegen. Es ist darzulegen, gegen welche Störfälle das Endlager ausgelegt ist.

Geotechnische Langzeitprognose

Der Antragsteller hat die Barrierenwirksamkeit der technischen Barrieren in einer geotechnischen Langzeitprognose unter Berücksichtigung der in der geologischen Langzeitprognose ermittelten Entwicklung des geologischen Barrierensystems zu beschreiben.

B.8.4 Errichtung des Endlagerbergwerkes

Den besonderen sicherheitstechnischen Anforderungen eines Endlagers entsprechend sind über die Belange eines konventionellen Bergwerkes hinausgehende folgende zusätzliche Gesichtspunkte zu beachten.

B.8.4.1 Schächte

Die Schachtansatzpunkte sind unter Beachtung der geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten sowie der gebirgsmechanischen Eigenschaften des Deckgebirges/ Nebengesteins und der Endlagerformation festzulegen. Durch einen geeigneten Schachtausbau ist sicherzustellen, dass ein unbeherrschbarer Wassereinbruch durch den Schacht während des Betriebs praktisch ausgeschlossen werden kann.

B.8.4.2 Grubenbaue

Alle Grubenbaue sind so herzustellen, dass ihre Standsicherheit bis zu ihrer planmäßigen Verfüllung erhalten werden kann. Hierzu sind u.a. zwischen den Einlagerungsräumen ausreichend bemessene Sicherheitsfesten zu belassen.

Durch die Anordnung der Einlagerungsräume ist sicherzustellen, dass - unter Berücksichtigung der Gas- und Wärmeentwicklung als Folge der Endlagerung radioaktiver Abfälle - die Standsicherheit nicht unzulässig beeinflusst wird und die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches auch nach der Verfüllung nicht beeinträchtigt wird.

B.8.5 Planung des Einlagerungsbetriebs

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

Die Anzahl der offenen Einlagerungsbereiche (Strecken, Kammern, Bohrlöcher) ist unter Beachtung einer betrieblich erforderlichen Vorhaltung zu minimieren. Durch ein

entsprechendes Einlagerungskonzept sind die Einlagerungsräume so kurzzeitig wie möglich offen zu halten und nach beendeter Nutzung zu verschließen.

Das Endlagerbergwerk ist in Einlagerungsfelder mit einzelnen Einlagerungsbereichen zu untergliedern. Sind Teile dieser Felder für die Einlagerung genutzt, werden diese Teile abgeworfen. Nach Nutzung sind die Felder gegen das offene Bergwerk hin abzuschließen.

Handhabungs- und Transportvorgänge im Endlager bedürfen der besonderen Beachtung, da hierbei mit den höchsten Strahlenbelastungen des Personals zu rechnen ist. Transporteinrichtungen für die Einlagerung sind daher so auszulegen, dass die Strahlenexposition von Personen bei der Handhabung und dem Transport von Abfällen möglichst gering bleibt, Schäden an den Einlagerungsbehältern auch bei Störungen an den Transporteinrichtungen vermieden und Störfallmöglichkeiten reduziert werden können.

Verschiedene Einlagerungsfelder und Transportstrecken sollten möglichst in selbstständige voneinander abtrennbare Wetterabteilungen eingeordnet werden, um bei Auftreten einer Kontamination deren Ausbreitung in nicht betroffene Bereiche zu vermeiden. Es ist eine zuverlässige Trennung zwischen Frisch- und Abwetterbereichen vorzunehmen.

B.8.6 Überwachungsprogramm

Neben den routinemäßigen Betriebs- und Strahlenschutzüberwachungsmaßnahmen ist ein Überwachungsprogramm für das in Betrieb befindliche Endlager zu planen. Dieses Überwachungsprogramm dient der Bestätigung der betrieblichen Auslegungsparameter, die in die Sicherheitsanalyse eingeflossen sind.

Insbesondere sind die thermomechanischen Reaktionen des Gebirges auf das Einbringen radioaktiver Abfälle sowie die gebirgsmechanischen Vorgänge zu verfolgen. Werden signifikante Abweichungen von den Auslegungsdaten bzw. prognostizierten Zuständen festgestellt, sind ihre Auswirkungen auf die Sicherheit des Endlagerbergwerkes zu analysieren und gegebenenfalls durch eine Modifizierung des Endlagers bzw. des weiteren Betriebes zu berücksichtigen.

Zur Verfolgung und Überprüfung der Entwicklung der Einlagerungsorte nach Einlagerung der radioaktiven Abfälle sollen während der Betriebsphase in den jeweiligen Endlagerabschnitten an ausgewählten Einlagerungsorten für den Einlagerungsabschnitt repräsentative Messprogramme vorgesehen werden. Zur Bestätigung der zur Anwendung gelangten Modelle sind gezielte Beobachtungen erforderlich.

B.8.7 Radioaktive Abfälle

Der Antragsteller muss eine Zusammenstellung der einzulagernden Abfälle nach ihrer Art, Menge und Eigenschaften vorlegen. Es müssen Angaben zur insgesamt eingelagerten Aktivität unter Angabe der Antragswerte gemacht werden. Aufbauend auf den Ergebnissen der Sicherheitsanalysen für das Endlagersystem sind Anforderungen an die jeweiligen zur Endlagerung vorgesehenen radioaktiven Abfälle festzulegen. Sie müssen Anforderungen an das Aktivitätsinventar sowie die Abfallformen, die Behälter und Verpackungen enthalten. Darüber hinaus müssen sie den betrieblichen Belangen Rechnung tragen und so festgelegt werden, dass sie durch eine Produktkontrolle überprüfbar sind.

Abfälle sollen in fester oder verfestigter Form endgelagert werden. Es dürfen nur nicht-brennbare und nicht explosionsfähige Abfallgebinde eingelagert werden. Das Einlagerungskonzept und der zulässige Anteil an Spaltstoffen in den Abfällen sind so festzulegen, dass die Abfallgebinde unterkritisch bleiben. Bei Abfallgebinden ist entweder die Konzentration von Radionukliden im Abfallgebinde so zu begrenzen oder die Einlagerungsdichte der Abfallgebinde so anzupassen, dass unter Berücksichtigung der geplanten Anordnung im Endlager die Temperaturgrenzwerte, resultierend aus den Auslegungsanforderungen an das Endlager und das Wirtsgestein, eingehalten werden.

B.8.8 Stilllegung

Das Endlager ist am Ende der Betriebsphase stillzulegen. Es ist ein Verfüll- und Verschlusskonzept zu erstellen, das die Anforderungen, die sich aus der Standsicherheit und der Langzeitsicherheit ergeben, erfüllt.

B.8.9 Planung der Nachbetriebsphase

Überwachung

Errichtung, Betrieb und Stilllegung des Endlagerbergwerks werden so durchgeführt und überwacht, dass in der Nachbetriebsphase ein Kontroll- und Überwachungsprogramm zusätzlich zu den Umweltschutzmessungen und Geländevermessungen aus Sicherheitsgründen nicht erforderlich ist. Die Safeguards - Anforderungen von IAEA und EURATOM bleiben unberührt.

Dokumentation und Kennzeichnung

Die markscheiderischen Daten des Endlagers, die Charakterisierung der eingelagerten Abfälle, die umweltrelevanten Daten zu Beginn der Nachbetriebsphase sowie die wesentlichen technischen Maßnahmen bei Errichtung, Betrieb und Stilllegung des Endlagerbergwerkes sind zu dokumentieren. Vollständige Dokumentensätze sind räumlich getrennt an geeigneten Orten so aufzubewahren, dass die Informationen über die Existenz des Endlagers für einen Zeitraum von 500 Jahren sicher erhalten bleiben.

Es muss dafür Sorge getragen werden, dass die Dokumentation bei beabsichtigten Aktivitäten am Standort zur Kenntnis gelangt.

B.9 Betriebsphase¹

Die sicherheitstechnischen Anforderungen für die Betriebsphase des Endlagers sollen in einer Leitlinie festgelegt werden. Es gelten die folgenden Sicherheitskriterien und grundlegenden Anforderungen.

B.9.1 Einschluss radioaktiver Stoffe

Der sichere Einschluss radioaktiver Stoffe ist durch die Abfallmatrix, die Behälter, bzw. bei aktivierten Stoffen durch das Material selbst zu gewährleisten. Sofern unvermeidlich flüchtige Radionuklide aus den Abfallgebinden austreten, sind entsprechende

¹ Dieses Kapitel wird in einer Leitlinie konkretisiert.

Strahlenschutzmaßnahmen zum Schutz des Betriebspersonals und der Bevölkerung zu treffen (siehe Kap. B.9.5).

B.9.2 Kritikalitätssicherheit

Die Handhabung, Lagerung und Einlagerung von spaltstoffhaltigen radioaktiven Abfällen ist so vorzunehmen, dass sie im bestimmungsgemäßen Betrieb, bei Störfällen sowie bei Einwirkungen von außen stets unterkritisch bleiben.

B.9.3 Wärmeabfuhr

Die Abfuhr der Zerfallswärme aus den Abfallgebinden muss soweit durch passive Kühlung (Naturkonvektion) sichergestellt werden, dass an den Abfallgebinden, an sicherheitstechnisch wesentlichen Komponenten und in den Bauwerken des Endlagers keine unzulässigen Temperaturen auftreten.

B.9.4 Strahlenschutz

Durch die Abfallgebinde, ihre Anordnung sowie durch bauliche Strukturen und bewegliche Abschirmungen ist zum Schutz des Betriebspersonals und der Bevölkerung eine den Anforderungen der Strahlenschutzverordnung entsprechende Abschirmung ionisierender Strahlung vorzusehen.

Bei der Anlieferung sind alle eingehenden Abfallgebinde auf Einhaltung der für das Endlager geltenden radiologischen Grenzwerte durch Messung zu überprüfen. Nach § 34 StrlSchV ist eine Strahlenschutzanweisung zu erstellen, zu beachten und ggf. geänderten Randbedingungen anzupassen. Das Endlager ist in Strahlenschutzbereiche einzuteilen, in denen an repräsentativen Stellen die Ortsdosisleistung, getrennt nach Gamma- und Neutronendosis, zu messen ist. Die Raumluft in Arbeitsbereichen, in denen Kontaminationen auftreten können, ist zu Kontrollzwecken zu überwachen.

B.9.5 Ableitungen radioaktiver Stoffe

Die beantragten Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Fortluft und Abwasser sind vollständig und durch ihre wesentlichen Radionuklide zu spezifizieren.

Bezüglich der Begrenzung der Strahlenexposition der Bevölkerung und der Ableitung radioaktiver Stoffe gelten die Anforderungen von § 46 und 47 StrlSchV. Für die Emissions- und Immissionsüberwachung gelten die Anforderungen von § 48 StrlSchV.

B.9.6 Brand- und Explosionsschutz

Der Brandschutz des Endlagers ist nach dem kerntechnischen Regelwerk der Reihe KTA 2101 zu gestalten, sofern das konventionelle Regelwerk nicht bereits weitergehende Anforderungen stellt.

Das Endlager ist so auszulegen, dass Explosionen praktisch ausgeschlossen werden können.

B.9.7 Einwirkungen von innen

In einer Störfallanalyse ist zu untersuchen, welche Betriebsstörungen und Störfälle in der Betriebsphase des Endlagers auftreten können. Aus dieser Analyse sind auslegungsbestimmende Störfälle abzuleiten und gegenüber den Betriebsstörungen abzugrenzen. Menschliches Fehlverhalten ist bei der Analyse der Störfallmöglichkeiten zu berücksichtigen.

Für auslegungsbestimmende Störfälle ist die Einhaltung der Anforderungen von § 49 StrlSchV nachzuweisen.

B.9.8 Einwirkungen von außen

Naturbedingte Einwirkungen von außen, wie Sturm, Regen, Schneefall, Frost, Blitzschlag, Hochwasser, Erdbeben und Erdbeben sind als betriebliche Lasten oder als Auslegungsstörfälle zu berücksichtigen.

Im Rahmen einer Sicherheitsanalyse ist darzulegen, welche Auswirkungen durch zivilisatorisch bedingte äußere Einwirkungen zu erwarten sind. Die Entscheidung, welche Ereignisse als Auslegungsstörfälle im Sinne des § 49 StrlSchV zu bewerten sind und ob und welche Schutzmaßnahmen unter dem Gesichtspunkt der Reduzierung der Schadensauswirkung bei Ereignissen erforderlich sind, die wegen ihrer geringen Ein-

trittshäufigkeit nicht als Auslegungsstörfälle einzustufen sind, hat sich insbesondere an den Ergebnissen der Sicherheitsanalyse und an den Auswirkungen in der Umgebung des Endlagers zu orientieren.

B.9.9 Qualitätssicherung

Bereits bei Planung und Auslegung des Endlagers ist ein nach Sicherheitserfordernissen abgestuftes Konzept zur Qualitätssicherung für die Errichtung und den Betrieb des Endlagers auszuarbeiten und beim Betrieb des Endlagers einzuhalten.

B.9.10 Betriebsführung

Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten der Betriebsführung sind klar festzulegen. Der Betrieb ist geeignet zu strukturieren, es sind die erforderlichen personellen, organisatorischen, die Sicherheit betreffenden Voraussetzungen zu schaffen und nachzuweisen.

In einem Betriebshandbuch sind eindeutige technische Sicherheitsspezifikationen und Arbeitsanweisungen für alle Betriebsvorgänge, für die Beherrschung von Störfällen und die Beseitigung von Störfallfolgen festzulegen und im Betrieb einzuhalten.

Die Inbetriebnahme des Endlagers ist in einem Inbetriebsetzungs-Programm festzulegen, das die Schritte der Inbetriebnahme, durchzuführende Inbetriebsetzungs-Prüfungen und erforderliche Tests und Kalterprobungen definiert. Erforderliche wiederkehrende Prüfungen sind in einem Prüfhandbuch festzulegen.

Der Betrieb des Endlagers ist dahingehend zu überwachen, dass sicherheitstechnisch bedeutsame Störungen des Betriebes und Störfälle zuverlässig erkannt und die im Betriebshandbuch niedergelegten Gegenmaßnahmen ergriffen werden können. Störungsmeldungen sind zentral zu erfassen und zu dokumentieren. Über sicherheitstechnisch bedeutsame Ereignisse ist Buch zu führen. Sicherheitsrelevante Erkenntnisse aus Inbetriebnahme, bestimmungsgemäßem Betrieb (insbesondere bei Reparatur) und wiederkehrenden Prüfungen sind zu dokumentieren.

Betriebserfahrungen des Endlagers sind systematisch auszuwerten und bei der weiteren Betriebsführung zu berücksichtigen.

Für Notfälle ist ein Notfallschutzplan auszuarbeiten und an einer ständig besetzten Stelle im Betrieb verfügbar zu halten.

B.10 Nachbetriebsphase²

Der Nachweis der Sicherheit in der Nachbetriebsphase muss als umfassende Sicherheitsbewertung des Endlagersystems geführt werden und daher geologische, geotechnische, hydrogeologische, radiologische, chemotoxische und technische Aspekte und ggf. Einzelnachweise umfassen. Der Sicherheitsbewertung für die Nachbetriebsphase ist eine wissenschaftlich fundierte Prognose der zeitlichen Entwicklung des Endlagersystems in Bezug auf seine langzeitige Barrierenfunktion zugrunde zu legen. Basis der Sicherheitsbewertung sind die Erkenntnisse der Standortcharakterisierung, die geowissenschaftliche Langzeitprognose sowie Langzeitsicherheitsanalysen. Die Ergebnisse der Langzeitsicherheitsanalysen werden anhand des in Kap. B.6.2.1 enthaltenen Schutzzieles bewertet. Unterstützend sollen Indikatoren zur Bewertung des Isolationsvermögens des Endlagersystems sowie zur Bewertung von Systemeigenschaften herangezogen werden.

Der Nachweis der Langzeitsicherheit muss durch eine umfassende standortspezifische Sicherheitsbewertung erbracht werden. Der Langzeitsicherheitsnachweis stützt sich auf

- *die Standortcharakterisierung und eine geowissenschaftliche Langzeitprognose,*
- *die Charakterisierung der technischen Barrieren und die geotechnische Langzeitprognose,*
- *die Umsetzung des Sicherheitskonzeptes und die Beachtung der Planungsgrundsätze (Kap. B.8.1),*
- *die Gewährleistung der Kritikalitätssicherheit,*

² Dieses Kapitel wird in einer Leitlinie konkretisiert.

- die Darstellung und Analyse des langfristigen Verhaltens des Endlagersystems und seiner Teilsysteme zur Bestätigung des Sicherheitskonzeptes mit Hilfe der Methode der Langzeitsicherheitsanalyse sowie
- den Nachweis der Einhaltung der Sicherheitsprinzipien für die Endlagerung (Kap. B.5) und des Schutzzieles für die Nachbetriebsphase (Kap. B.6.2.1) mit Hilfe von Langzeitsicherheitsanalysen über den geforderten Nachweiszeitraum (Kap. B.10.1).

Den Langzeitsicherheitsanalysen sind die potenziellen Entwicklungen des Endlagersystems aus inneren oder äußeren Ursachen zugrunde zu legen. Außerdem sind Entwicklungen, die durch Aktivitäten des Menschen ausgelöst werden können, zu berücksichtigen. Den bestehenden jeweiligen Unsicherheiten wie den Szenarien-, Daten- und Modellunsicherheiten ist im Langzeitsicherheitsnachweis Rechnung zu tragen.

B.10.1 Zeitraum für den Langzeitsicherheitsnachweis

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

B.10.2 Langzeitsicherheitsanalysen

Die Langzeitsicherheitsanalyse muss die Szenarienanalyse und die Konsequenzenanalyse zum Nachweis der Einhaltung des Schutzzieles umfassen.

Die Robustheit und das Isolationsvermögen des Endlagersystems muss dargestellt werden.

B.10.2.1 Szenarienanalyse

In der Szenarienanalyse werden die potenziellen Entwicklungen des Endlagersystems identifiziert. In ihr müssen repräsentative Szenarien ermittelt werden, deren Konsequenzen die Konsequenzen aller in den Grenzen praktischer Vernunft denkbaren Szenarien abdecken. Die repräsentativen Szenarien werden eingeteilt in Szenarien, die menschliches Eindringen in das Endlager zum Gegenstand haben, und alle anderen Szenarien; letztere werden als "natürliche Entwicklungen" bezeichnet.

Zur Nachweisführung der Langzeitsicherheit sind die natürlichen Entwicklungen folgenden Szenarienklassen zuzuordnen:

- wahrscheinliche Szenarien: Szenarien, deren Eintreten im Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahren eine hohe Wahrscheinlichkeit zuzuordnen ist,*
- weniger wahrscheinliche Szenarien: Szenarien, deren Eintreten im Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahren eine Eintrittswahrscheinlichkeit kleiner 0,1 zuzuordnen ist,*
- nicht weiter zu betrachtende Szenarien: Szenarien, deren Auftreten eine sehr kleine Eintrittswahrscheinlichkeit zuzuordnen ist.*

Szenarien, die der Klasse der 'nicht weiter zu betrachtenden Szenarien' zuzuordnen sind, brauchen in den Langzeitsicherheitsanalysen nicht behandelt zu werden. Die maßgeblichen Gründe für ihre Einordnung in diese Klasse müssen in der Szenarienanalyse dargelegt werden.

Menschliches Eindringen in ein Endlager kann für eine Zeit, nach der eine Dokumentation über das Endlager als nicht mehr gesichert angesehen werden kann, nicht ausgeschlossen werden. Der für eine systematische Szenarienanalyse erforderlichen Prognose der menschlichen Entwicklung, der menschlichen Lebensweise und des menschlichen Verhaltens über die zu betrachtenden Zeiträume fehlt die wissenschaftlich fundierte Basis. Daher sollen in der Langzeitsicherheitsanalyse nur ausgewählte Szenarien für das direkte menschliche Eindringen betrachtet werden.

Szenarien für menschliches Eindringen sind beim Langzeitsicherheitsnachweis wie folgt zu behandeln:

- Szenarien, die das unbeabsichtigte Eindringen in ein Endlager beschreiben, werden zusammengefasst. Zur Behandlung in Langzeitsicherheitsanalysen sind Referenzszenarien heranzuziehen.*
- Szenarien, die das beabsichtigte Eindringen des Menschen in das Barrierensystem beschreiben, sowie kriegerische Einwirkungen bleiben außer Betracht. Diese Eingriffe werden in die Verantwortung der jeweils handelnden Gesellschaft gestellt.*

Die Szenarienanalyse muss transparent und nachvollziehbar dokumentiert werden. Die Einzelschritte müssen dabei begründet und wesentliche Entscheidungen nachvollziehbar dargestellt werden.

B.10.2.2 Konsequenzenanalysen

Die Ermittlung der Konsequenzen durch den Austritt von Radionukliden aus dem Abfall in die Geosphäre und Biosphäre erfolgt für alle repräsentativen Szenarien.

Die Konsequenzenanalyse muss auf der Basis naturwissenschaftlicher Methoden durchgeführt werden. Es sind konzeptionelle Modelle zu entwickeln und in mathematische Rechenverfahren umzusetzen. Die in der Konsequenzenanalyse angewendeten Methoden und Rechenprogramme müssen in der Lage sein, die konzeptionellen Modelle des Endlagersystems und seiner Teilsysteme zu beschreiben. Sie müssen qualifiziert sein. Zur Behandlung der wesentlichen Datenunsicherheiten sind Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen durchzuführen.

B.10.2.3 Datenerhebung

Die zur Durchführung der Langzeitsicherheitsanalyse benötigten Daten müssen standortbezogen erhoben werden. Sie müssen - entsprechend der Standortentwicklung - eine angemessene Extrapolation in die ferne Zukunft erlauben.

B.10.2.4 Nachweisführung der Einhaltung des Schutzzieles

Zur Nachweisführung der Einhaltung des Schutzzieles, welches als Risikokriterium formuliert ist (Kap. B.6.2.1), wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

- Als Maß der Konsequenz C_i des Szenariums S_i soll das radiologische Risiko für ein Individuum aus einer betroffenen Gruppe, einen schweren körperlichen Schaden zu erleiden, verwendet werden: $C_i = d_i \gamma$, mit d_i als der in der Konsequenzenanalyse ermittelten Individualdosis und γ als dem Risikokonversionsfaktor ($5 \cdot 10^{-2} \text{ 1/Sv}$).

- Zur Ermittlung einer Bewertungsgröße soll von der Menge „aller“ Szenarien S zu einer Menge repräsentativer Szenarien $S_R \subset S$ übergegangen werden. Die Bewertungsgröße für das Risiko ist dann $R_R = \sum_{S_i \in S_R \subset S} p_i C_i$.
- p_i ist die Gesamtwahrscheinlichkeit aus Eintritt und Ablauf eines Szenariums i und der Wahrscheinlichkeit für ein Individuum, aufgrund dieses Szenariums eine radiologische Belastung d_i zu erfahren. Die verwendete Eintrittswahrscheinlichkeit ist also die Wahrscheinlichkeit, dass das betrachtete Szenario zu irgendeinem Zeitpunkt eintritt, so dass im Bewertungszeitraum die Exposition irgendeiner Einzelperson aufgrund ihres Aufenthaltsortes und ihrer Verhaltensweise erfolgen kann. Die Gesamtwahrscheinlichkeit ist als integrale Größe über den Betrachtungszeitraum (Nachweiszeitraum) anzusehen.
- Die bei der Ermittlung bzw. Schätzung der drei Risikokomponenten Szenario S_i , Wahrscheinlichkeit p_i und Konsequenz C_i auftretenden Unsicherheiten sollen folgendermaßen behandelt werden:
 - Dem Problem der Szenarienvollständigkeit soll durch den Übergang zu repräsentativen Szenarien (s.o.) begegnet werden.
 - Bei der Bestimmung von Eintrittswahrscheinlichkeiten sollen obere, fundiert abgeleitete Schranken Verwendung finden.
 - Bei der Schätzung der Konsequenz sind probabilistische Methoden anzuwenden. In der Bewertungsgröße sind Vertrauensintervalle für die Perzentilen der Verteilung der C_i zu verwenden.

Für die Gesamtheit der repräsentativen Szenarien S_R , bestehend aus der Klasse der wahrscheinlichen Szenarien und der Klasse der weniger wahrscheinlichen Szenarien, gilt:

Wahrscheinliche Szenarien

Die in der Konsequenzenanalyse für die wahrscheinlichen Szenarien ermittelte Strahlenexposition für eine Einzelperson der Bevölkerung darf die effektive Dosis von 0,3 mSv im Kalenderjahr nicht übersteigen.

Das Schutzziel ist so gewählt, dass die zugelassene Strahlenexposition innerhalb der mittleren Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition in Deutschland (2,4 mSv pro Kalenderjahr) liegt. Dieses Schutzziel entspricht den Anforderungen der StrlSchV in § 47 wie auch der ICRP 81 /ICR 98a/ (0,3 mSv pro Kalenderjahr effektive Dosis). Der für kerntechnische Anlagen nach den neuen EU-Grundnormen /KEG 96/ vorgesehene Grenzwert für die Bevölkerung von 1 mSv pro Kalenderjahr effektive Dosis wird unterschritten. Die Eintrittswahrscheinlichkeit für die wahrscheinlichen Szenarien wird gleich eins angenommen. Wird eine Person einer Individualdosis von 0,3 mSv im Kalenderjahr ausgesetzt, so entspricht dies einem Risiko von ca. 10^{-5} im Kalenderjahr, einen schweren körperlichen Schaden zu erleiden.

Weniger wahrscheinliche Szenarien

Das in der Konsequenzenanalyse für die Gesamtheit der weniger wahrscheinlichen Szenarien ermittelte Risiko $\sum p_i C_i$, einen schweren gesundheitlichen Schaden aus der Strahlenexposition zu erleiden, darf 10^{-5} im Kalenderjahr nicht übersteigen.

Wird der Nachweis für ein Szenarium stellvertretend für eine Gruppe von Szenarien geführt, so muss die für diese Gruppe insgesamt gültige Eintrittswahrscheinlichkeit zugrunde gelegt werden.

Für die Kriterien in beiden Szenarienklassen gilt darüber hinaus:

Sowohl für die wahrscheinlichen als auch für die weniger wahrscheinlichen Szenarien werden die Konsequenzen C_i unter expliziter Berücksichtigung von Datenunsicherheiten ermittelt. Als Konsequenz in diesem Sinne wird die in dieser Rechnung ermittelte obere Grenze eines 90%-Konfidenzintervalls für das 90-Perzentil der Dosis festgelegt.

Unbeabsichtigtes menschliches Eindringen

Bei der Planung und Auslegung des Endlagers ist die Möglichkeit unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Endlager zu berücksichtigen. Unter Berücksichtigung der Standortverhältnisse ist diese Möglichkeit zu analysieren und zu bewerten. Die ermittelten potenziellen radiologischen Auswirkungen sollen anhand der ICRP-Empfehlung 81 bewertet werden. Gegebenenfalls sind angemessene Maßnahmen vorzusehen, die derartige Eingriffsmöglichkeiten verringern oder ihre möglichen radio-

logischen Auswirkungen begrenzen. Bei dieser Bewertung sind auch die Anzahl der betroffenen Personen, das räumliche Ausmaß einer möglichen Kontamination und die Möglichkeit der Begrenzung von Auswirkungen sowie von Gegenmaßnahmen zu betrachten.

Bei der Planung des Endlagersystems werden ausgewählte Szenarien für menschliches Eindringen analysiert. Zur radiologischen Bewertung der analysierten Auswirkungen und zur Entscheidung über zu planende Gegenmaßnahmen können die Empfehlungen der ICRP zur Intervention zum Schutz vor radiologischen Belastungen herangezogen werden. Die ICRP empfiehlt als Schwellenwert zur Einleitung von Interventionen die potenzielle Belastung von 100 mSv pro Kalenderjahr. Bei Belastungen unterhalb 10 mSv pro Kalenderjahr ist eine Intervention nicht vorgesehen. Im Bereich zwischen 10 mSv und 100 mSv pro Kalenderjahr ist abzuwägen, ob eine Intervention geboten ist. Bei Interventionsentscheidungen sind auch die Anzahl der betroffenen Personen, das räumliche Ausmaß einer möglichen Kontamination und die Möglichkeit der Begrenzung von Auswirkungen sowie von Gegenmaßnahmen zu betrachten.

Zur Behandlung der Szenarien, die das unbeabsichtigte menschliche Eindringen in ein Endlager beschreiben, ist davon auszugehen, dass das Wissen über das Endlager bis zu 500 Jahre erhalten bleibt. Als Zeitpunkt für ein Eingriffsszenarium braucht daher kein früherer Zeitpunkt gewählt werden (Kap B.8.9).

Verwendete Unterlagen

- /AKE 01/ Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd)
2. Zwischenbericht: Stand der Diskussion
August 2001
- /ATG 00/ Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz
gegen ihre Gefahren (Atomgesetz - AtG) vom 23. Dezember 1959,
Neufassung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I. 1565), zuletzt geändert durch Ge-
setz vom 28. Dezember 2000 (BGBl. I. S. 1960)
- /BMI 83/ Bundesministerium des Innern (BMI)
Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Berg-
werk
GMBI. 1983, S. 220
- /BOR 97/ Bork, M.
Internationale und nationale Regelungen zur Endlagerung radioaktiver Ab-
fälle, Teilaspekte Sicherheit in der Vorbetriebs- und Betriebsphase von
Endlagern
GRS - A - 2459, Köln, 1997¹
- /BOR 98/ Bork, M.
Bewertungsmaßstäbe für die Betriebs- und Langzeitsicherheit von geologi-
schen Endlagern
GRS - A - 2643, Köln, 1998 ¹
- /GNE 98/ Gesetz zu dem Gemeinsamen Übereinkommen vom 5. September 1997
über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über
die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle
(Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung)
BGBl Teil II, Nr. 31,S. 1752, 1998

¹Die gekennzeichneten Literaturstellen sind im Auftrag des BMU erstellte GRS-A-Berichte bzw. Statusberichte. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere dürfen solche Berichte nur mit seiner Zustimmung zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt werden bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

- /GOV 99/ Government Decision of the Council of State on the Safety of Disposal of Spent Nuclear Fuel
Helsinki, 25 March 1999/478
- /HSK 93/ Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Eidg. Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA)
Richtlinie für schweizerische Kernanlagen
Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle
HSK-R-21/d, November 1993
- /IAE 89/ International Atomic Energy Agency (IAEA)
Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High Level Radioactive Wastes
Safety Series No. 99, Vienna 1989
- /IAE 94/ International Atomic Energy Agency (IAEA)
Safety indicators in different time frames for the safety assessment of underground radioactive waste repositories
IAEA-TECDOC - 767, October 1994
- /IAE 94a/ International Atomic Energy Agency (IAEA)
Classification of Radioactive Waste
A Safety Guide
Safety Series No. 111 - G - 1.1, IAEA, Vienna, 1994
- /IAE 95/ International Atomic Energy Agency (IAEA)
The Principles of Radioactive Waste Management
Safety Series No. 111 - F, IAEA, Vienna, 1995

- /IAE 95a/ International Atomic Energy Agency (IAEA)
Requirements for the safe management of radioactive waste
Proceedings of a seminar held in Vienna, 28 - 31 August 1995
IAEA-TECDOC - 853
- /IAE 98/ International Atomic Energy Agency (IAEA)
Topical issues in nuclear radiation and radioactive waste safety, Topical issue 5: Radiation safety in the distant future: The issue of the disposal of long-lived waste
Proceedings of an international conference 31.8. - 4.9.1998, Vienna
- /ICR 85/ International Commission of Radiological Protection (ICRP)
Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste
ICRP-Publication 46, July 1985
- /ICR 91/ International Commission of Radiological Protection (ICRP)
Recommendations of the ICRP
Publication 60, 1991
- /ICR 98/ International Commission of Radiological Protection (ICRP)
Recommendations of the ICRP
Publication 77, 1998
- /ICR 98a/ International Commission of Radiological Protection (ICRP)
Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste
Publication 81
Annals of the ICRP, Vol. 28, No 4 1998
- /KEG 96/ Kommission der Europäischen Gemeinschaften
Richtlinie 96/29/EURATOM des Rates vom 13. Mai 1996 zur Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlen
Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 159, 29. Juni 1996

- /KSA 92/ Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA)
Sicherheitsprinzipien für die Entsorgung radioaktiver Abfälle
Tagungsbericht Klausurtagung, Dezember 1992
- /NAS 95/ National Academy of Sciences
Technical Bases for Yucca Mountain Standards
National Academy Press, Washington D. C. 1995
- /NOR 89/ Die nordischen Länder
Disposal of High Level Radioactive Waste, Consideration of Some Basic
Criteria
A Consultative Document, 1989
- /NRC 00/ US Nuclear Regulatory Commission (NRC)
Disposal of high-level radioactive wastes in geologic repositories
10 CFR Part 60, Federal Register 2000
- /NRP 92/ National Radiological Protection Board
Radiological Protection Objectives for the Land-based Disposal of Solid
Radioactive Wastes
Documents of the NRPB, Febr. 1992
- /OEC 91/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA)
Disposal of High-Level Radioactive Wastes
Radiation Protection and Safety Criteria
Proceedings of an NEA Workshop, Paris, 5 - 7 November 1991
- /OEC 95/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA)
Steering Committee for Nuclear Energy:
Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal
A Collective Opinion of the Radioactive Waste Management Committee
OECD, Paris 1995
- /OEC 95a/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA)
Bedeutung und Anwendung des Konzepts der potenziellen Exposition
Bericht der CRPPH / CSNI / CNRA / RWMC-Expertengruppe, Dez. 1995

- /OEC 99/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA)
Geological Disposal of Radioactive Waste
Review of Developments in the Last Decade
OECD, Paris 1999
- /RSK 88/ Gemeinsame Stellungnahme der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK)
und der Strahlenschutzkommission (SSK), 30.06.1988
- /SSI 98/ The Swedish Radiation Protection Institute's (SSI) Regulation Concerning
the Protection of Human Health and Environment in Connection with the
Final Management of Spent Nuclear Fuel or Nuclear Waste
Stockholm, September 28, 1998
- /SSK 98/ Strahlenschutzkommission (SSK)
Freigabe von Materialien, Gebäuden und Bodenflächen mit geringfügiger
Radioaktivität aus anzeige- oder genehmigungspflichtigem Umgang
Empfehlung der Strahlenschutzkommission
Berichte der Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Heft 16
Gustav Fischer Verlag Stuttgart; Jena; Lübeck; Ulm; 1998
- /STR 94/ Strahlenschutzverordnung (StrlSchV): Verordnung über den Schutz vor
Schäden durch ionisierende Strahlen
zuletzt geändert durch Medizinproduktegesetz vom 2. August 1994
(BGBl. I. S. 1963, 1981)
- /STR 01/ Strahlenschutzverordnung (StrlSchV)
Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen
in der Fassung der Bekanntmachung vom 20. Juli 2001
(BGBl. I. S. 1714, 2001)
- /STU 01/ Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK)
Long-term safety of disposal of nuclear spent fuel
YVL Guide 8.4, 23 May 2001

TEIL C

Anhang

C1 Zeiträume

Bei der Bewertung der Sicherheit von Endlagern in der Nachbetriebsphase stellt die angemessene Berücksichtigung der sehr langen Zeiträume, für welche die Bewertung abzugeben ist, ein besonderes Problem dar. Das Dilemma besteht darin, dass einerseits die geforderte Einhaltung von Schutzzielen zeitlich nicht begrenzt ist, andererseits jedoch die für einen Langzeitsicherheitsnachweis erforderlichen Kenntnisse wissenschaftlich fundiert nur zeitlich begrenzt vorliegen. Radionuklide weisen zum Teil Halbwertszeiten von Millionen von Jahren auf. Es ist daher für eine konkrete Nachweisführung und Prüfung der Sicherheit entscheidend, welche Aussagekraft den einzelnen Nachweismethoden in den Zeiträumen zugeordnet werden kann, insbesondere dann, wenn es um die Einhaltung quantitativer Werte wie der radiologischen Schutzziele geht.

Die langlebigen Radionuklide

Um die Länge der zu betrachtenden Zeiträume zu illustrieren, seien zunächst die Halbwertszeiten einiger wichtiger Radionuklide aufgeführt. Dabei handelt es sich um Spaltprodukte der Kernspaltung und um durch Neutroneneinfang entstehende Aktivierungsprodukte, insbesondere Actiniden. Besonders lange Halbwertszeiten haben die natürlich vorkommenden Uran- und Thoriumisotope. Aber auch einige Spaltprodukte, die im Allgemeinen in der Geosphäre mobiler sind als die Actiniden, weisen Halbwertszeiten im Bereich von Hunderttausenden oder Millionen Jahren auf (Tab. 1).

Tabelle 1: Halbwertszeiten wichtiger Radionuklide /FZK 98/

Leichte Spalt- und Aktivierungsprodukte	Halbwertszeit Jahre	Actiniden	Halbwertszeit Jahre
H-3	12,3	Cm-244	18,1
Sr-90	28,6	Cm-243	29,1
Cs-137	30,2	Pu-238	87,7
		Am-241	432,2
C-14	5 730	Pu-240	6 563
		Am-243	7 370
		Pu-239	$2,4 \cdot 10^4$
Tc-99	$2,1 \cdot 10^5$	Pu-242	$3,8 \cdot 10^5$
Cs-135	$2 \cdot 10^6$	Np-237	$2,1 \cdot 10^6$
I-129	$1,6 \cdot 10^7$	U-235	$7,0 \cdot 10^8$
		U-238	$4,5 \cdot 10^9$
		Th-232	$1,4 \cdot 10^{10}$

Der Mensch und sein Verhalten

Der Nachweis der Langzeitsicherheit ist primär auf den Schutz der Gesundheit des Menschen ausgerichtet. Der Mensch ist erdgeschichtlich gesehen eine relativ junge Art und unterliegt der Evolution. Dem Homo sapiens wird ein Alter von einer Million Jahren zugeschrieben. Vor hunderttausend Jahren trat der Neandertaler auf. Selbst während der historisch einigermaßen überschaubaren Periode der letzten zehntausend Jahre hat sich der Mensch auch physisch verändert, z. B. durch Zunahme der Körpergröße. Wie wird der Mensch in ferner Zukunft aussehen? Welche biologische Konstitution und welche Ernährungsgewohnheiten wird er haben?

Für den Zeitraum einiger tausend bis zehntausend Jahre werden Veränderungen der biologischen Konstitution des Menschen nicht ins Gewicht fallen, wenn man sie ins Verhältnis zu der bestehenden erheblichen Variationsbreite zwischen Individuen und Gruppen der heutigen Bevölkerung setzt. Für längere Zeiträume fehlen jegliche Grundlagen für wissenschaftliche Prognosen zur biologischen Entwicklung des Menschen. Für den Nachweis der Sicherheit wird daher von der biologischen Verfassung des heutigen Menschen ausgegangen, wie sie den Konzepten und Modellen des Strahlenschutzes zugrunde liegt. Dieses Schutzkonzept berücksichtigt ohnehin durch entsprechende Modelle eine breite Variation von alters- und geschlechtsabhängigen Merkmalen.

Erheblich größer könnte in Zukunft die Bandbreite des menschlichen Verhaltens und seiner Ernährungsgewohnheiten sein. Als Basisfall sollten wiederum die heutigen Verhältnisse in einer realistischen Weise zugrunde gelegt werden. Änderungen des Klimas, der Landwirtschaft und anderer vom Menschen oder von außen bedingter Einflüsse können selbst im Zeitraum einiger tausend Jahre erhebliche Änderungen hervorrufen. Hierzu könnten Sensitivitätsbetrachtungen mit Modellszenarien vorgenommen werden. Beispiele wären:

- Der Mensch in einem subtropischen Klima.
- Der Mensch unter Eiszeitbedingungen.

Insgesamt wird allerdings die Variationsbreite der endlagerbedingten Strahlenexposition aufgrund der radioökologischen Bedingungen gegenüber denjenigen aus geologischen und hydrogeologischen Langzeiteinflüssen relativ gering bleiben. Die Variation dieser radioökologischen Szenarien kann daher in vielen Fällen vernachlässigt werden, insbesondere für sehr lange Zeiträume, in denen die Bandbreite der hydrogeologischen und geologischen Entwicklungsmöglichkeiten viel bedeutsamer ist.

Zusammengefasst wird es für sinnvoll und ausreichend gehalten, von der heutigen biologischen Konstitution und dem Verhalten des Menschen auszugehen. Für Langzeitbetrachtungen würde normalerweise die Betrachtung von Bodenstrahlung und Grundwasser-/Trinkwasserpfad unter realitätsnahen Annahmen genügen. Im Rahmen von Sensitivitätsbetrachtungen können andere Verhaltensweisen unter anderen Klimabedingungen unterstellt werden. Dies ist aber nur sinnvoll, wenn diese Varianten gegenüber den geologischen Ungewissheiten noch bedeutsam sind.

Die geologische und hydrogeologische Entwicklung

Die geologische und hydrogeologische Gesamtsituation unterliegt den natürlichen, langsam und kontinuierlich, zuweilen jedoch auch diskontinuierlich ablaufenden Kreisläufen der Gesteine der Erdkruste und der zugehörigen Hydrosphäre. Diese Vorgänge laufen im Allgemeinen sehr langsam ab, sind jedoch komplex und können nur zum Teil anhand von Modellvorstellungen prognostiziert werden. Zur Ableitung von geologischen Prognosen über den Endlagerstandort bilden Kenntnisse über die Erdgeschichte die Grundlage (Tab. 2).

Tabelle 2: Einige Daten zur Erdgeschichte

Vorgang	Zeitabschnitt, Jahre
Alter der Erde	4.6 Mia.
Alter der kontinentalen Kruste	bis 3.8 Mia.
Alter der ozeanischen Kruste	bis 180 Mio.
Bildung der Alpen	50 - 100 Mio.
Zeitraum von Kontinentalspaltungen	30 Mio.
Meteoriteneinschlag im Ries	14 Mio.
Ende des Tertiärs	2 Mio.
Beginn der quartären Eiszeiten in Europa	700 000
Größte Vereisung der letzten Eiszeit in Mitteleuropa	18 000
Laacher See – Vulkanismus	11 000
Ende der letzten Eiszeit in Mitteleuropa	10 000

Der Zeithorizont und die Verlässlichkeit von Prognosen zur Entwicklung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse an einem Endlagerstandort hängen stark von den Kenntnissen über die vorliegende geologische Situation und deren Vergangenheit ab. Endlager für radioaktive Abfälle werden in besonders stabilen Formationen im tiefen Untergrund angelegt. Die Standortverhältnisse werden intensiv erkundet. Unter günstigen geologischen Voraussetzungen kann die geologische Standortsituation bis zu einigen Millionen Jahren begründet prognostiziert werden. Bei entsprechender Tiefe und Standortwahl sind sodann in diesem Zeitraum keine grundsätzlichen, insbesondere keine unerwarteten Änderungen der geologischen Gesamtsituation an-

zunehmen. Prognostizierbare Veränderungen, z. B. Hebungen einer Region, Aufstieg eines Salzstockes, Erosion, Subrosion und Eiszeiteinflüsse sind bei der Definition der standortbezogenen Szenarien zu berücksichtigen.

Die Entwicklung der hydraulischen Verhältnisse kann, basierend auf den Erkenntnissen aus der Erd- und Klimageschichte, nur für wesentlich kürzere Zeiträume begründet prognostiziert werden. Nach den Erkenntnissen zum wiederholten Auftreten von Kalt- und Warmzeiten und den zugrunde liegenden Zyklen kann mit einer neuen Kaltzeit in etwa 20 000 Jahren und einer stärkeren Eiszeit in etwa 60 000 Jahren gerechnet werden.

Bei sehr langen Zeiträumen - im Bereich von vielen Millionen Jahren - können die Veränderungen der Erdkruste nicht mehr auf wissenschaftlicher Basis prognostiziert werden. Solche Veränderungen betreffen z.B. Entstehung von Gräben, Bruch- und Faltengebirgen, Entstehung von Vulkanregionen. Aus diesem Grund sind quantitative Sicherheitsanalysen aber auch qualitative Bewertungen anhand von Sicherheitsindikatoren immer weniger belastbar. In diesen Zeiträumen sind im Wesentlichen nurmehr die auch natürlich vorkommenden Uran- und Thoriumnuklide vorhanden, außerdem noch einige langlebige Spaltprodukte.

Zusammenfassend ist festzustellen:

Der Isolationszeitraum des Endlagersystems soll für langlebige Radionuklide in der Größenordnung von Millionen Jahren liegen. Bei sorgfältiger Wahl und Erkundung des Standortes eines tiefliegenden Endlagers können die geologischen Verhältnisse im Bereich der Endlagertiefe über den Isolationszeitraum als unverändert oder begründet prognostizierbar angesehen werden. Der Nachweis der Langzeitsicherheit muss für das Endlagersystem unter Berücksichtigung der Unsicherheiten geführt werden. Daher beschränkt sich der Zeitraum, für den eine wissenschaftlich begründete Prognose über die Entwicklung des Endlagersystems gemacht werden kann, auf etwa eine Million Jahre. Jenseits dieses Zeitraumes ist eine naturwissenschaftlich begründete Prognose in der Regel nicht mehr möglich.

C2 Langzeitsicherheitsanalysen

Der in die Zukunft gerichtete Langzeitsicherheitsnachweis hat prognostischen Charakter. Da das Endlager in der Nachbetriebsphase einer sicherheitstechnischen Überprüfung nicht unmittelbar zugänglich ist, sind an die Nachweisführung der langfristigen Einhaltung von Schutzziele und des Isolationsvermögens des Endlagersystems hohe Anforderungen zu stellen. Ausreichend gesicherte wissenschaftliche Erkenntnisse u.a. über das Verhalten des Endlagersystems, das Verhalten von Teilsystemen (z.B. das Verhalten des Endlagerbergwerkes), den Ablauf spezieller Ereignisse und Prozesse (z.B. Verhalten des Abfalls bei Anwesenheit von Grundwasser oder Lauge) und die Auswirkung unterschiedlicher Standortentwicklungen (z.B. Hebungen, Klimaveränderungen) bilden die Grundlage der Langzeitsicherheitsanalyse. Konzeptionelle Modellvorstellungen zur Beschreibung der wesentlichen Ereignisse und Prozesse im Endlagersystem müssen in numerische Modelle umgesetzt werden. In der Szenarienanalyse werden die potenziellen Entwicklungen des Endlagersystems identifiziert, für welche in der Konsequenzenanalyse die Auswirkungen in den Umweltmedien ermittelt werden. Zur Bewertung der Analyseergebnisse werden die formulierten Schutzziele herangezogen.

Szenarienanalyse

Die Szenarienanalyse stellt eine Identifikation und Selektion relevanter alternativer Entwicklungen des Endlagersystems zur weiteren Behandlung in der Konsequenzenanalyse dar. Basis der Szenarienanalyse sind die Standortcharakterisierung, die geologische Langzeitprognose sowie Charakterisierung des Endlagersystems mit seinen Teilsystemen.

Definition

Der Begriff des Szenariums wird für das Endlagersystem folgendermaßen definiert:

"Ein Szenarium beschreibt eine potenzielle (realistische) Entwicklung eines Endlagersystems, die durch eine Kombination relevanter Faktoren spezifiziert ist, welche das Endlagersystem charakterisieren oder dieses beeinflussen."

Ausgangspunkt der Betrachtungen in der Langzeitsicherheitsanalyse ist der Zustand des Endlagersystems zu Beginn der Nachbetriebsphase.

Die potenziellen Entwicklungen des Endlagersystems haben einerseits ihre Ursache in endogenen und exogenen Prozessen des Gesamtsystems und andererseits in Entwicklungen, die durch menschliche Aktivitäten ausgelöst werden.

Natürliche Entwicklungen (Szenarien) sind die nach naturwissenschaftlichen Erkenntnissen zu erwartenden Entwicklungen des Endlagersystems. Sie umfassen sowohl die nach Verschluss des Endlagers zu erwartenden Entwicklungen, welche durch die charakteristischen Merkmale des Endlagersystems, z.B. Wärme- und Gasentwicklung, Grundwasser, Korrosion, zeitliche Abnahme von Barrierenwirksamkeiten, tektonische Bewegungen bestimmt werden, als auch Entwicklungen, die durch Störungen eingeleitet werden. Dabei sind auch extreme Entwicklungen denkbar, welche das Barrierensystem des Endlagers zerstören, z.B. Vulkanismus. Zu den natürlichen Entwicklungen gehören auch menschliche Aktivitäten (mit Ausnahme menschlichen Eindringens), welche beabsichtigt oder unbeabsichtigt die Barrierenwirksamkeit des Endlagersystems verändern. Aktivitäten, die die Barrierenwirksamkeit oder die Standortsituation beeinflussen sind beispielsweise die Veränderung der Grundwassersituation durch den Bau einer Talsperre oder die Errichtung einer Grundwassergewinnungsanlage.

Weiterhin ist **menschliches Eindringen** zu beachten, das das Barrierensystem umgeht und direkt in das Endlager eingreift. Der direkte Eingriff in das Endlager führt zur totalen oder auch partiellen Zerstörung des Barrierensystems (z.B. durch Explorationsbohrungen, Auffahren eines Bergwerkes). Die Konsequenzen aus diesen Szenarien sind z.T. anderer Art als in den vorher beschriebenen Szenarien. Sie führen z.B. zu Belastungen des Personals, das den Eingriff vornimmt. Ebenso können langfristige Auswirkungen auf die Bevölkerung aus den Eingriffen resultieren.

Für das beabsichtigte Eindringen in das Endlager oder eine bewusste Inkaufnahme der Beeinflussung des Endlagersystems muss die jeweils handelnde Gesellschaft die Ver-

antwortung übernehmen. Szenarien dieser Art werden in den Sicherheitsanalysen für ein Endlager nicht weiter betrachtet.

In Sicherheitsanalysen werden nur menschliche Aktivitäten weiter untersucht, welche unbeabsichtigt das Isolationsvermögen des Endlagersystems beeinflussen oder umgehen. Diesen Aktivitäten ist gemein, dass das Vorhandensein und die Lage des Endlagers bei den handelnden Menschen in Vergessenheit geraten ist oder das Gefährdungspotenzial der Aktivitäten als nicht bekannt vorausgesetzt werden muss. Der für eine systematische Szenarienanalyse dieser Szenarien erforderlichen Prognose der menschlichen Entwicklung, der menschlichen Lebensweise und des menschlichen Verhaltens über die zu betrachtenden Zeiträume fehlt die wissenschaftlich fundierte Basis. Daher sollen in der Langzeitsicherheitsanalyse ausgewählte Szenarien für das direkte menschliche Eindringen betrachtet werden.

Klassifizierung der natürlichen Entwicklungen

Die Szenarien der natürlichen Entwicklungen des Endlagersystems können hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens klassifiziert werden.

Die Klasse der **wahrscheinlichen Szenarien** umfasst die natürlichen Entwicklungen, die mit einer hohen Eintrittswahrscheinlichkeit behaftet sind. Sie beinhaltet die für das Endlagersystem erwartete Entwicklung über den Prognosezeitraum.

Entwicklungen des Endlagersystems, die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik nicht ausgeschlossen werden können und denen eine geringere Wahrscheinlichkeit über den Prognosezeitraum zugeordnet ist als den wahrscheinlichen Szenarien oder deren Eintreten hypothetisch ist, werden der Klasse der **weniger wahrscheinlichen Szenarien** zugeordnet. Beispiele für diese Szenarienkategorie sind das Entstehen neuer Wegsamkeiten infolge des Wärmeeintrags und der Gasentwicklung durch die Abfalleinlagerung oder aufgrund tektonischer Ereignisse.

Ereignisse und Entwicklungen, die extrem unwahrscheinlich sind oder für die keine Schadensvorsorge getroffen werden kann, werden der Klasse der **nicht weiter zu betrachtenden Szenarien** zugeordnet. Beispiele für diese Klasse sind Vulkanismus, der aus den Standortgegebenheiten nicht ableitbar ist, oder der Einschlag eines großen Meteoriten. Solche Szenarien führen zu Situationen außerhalb der erwarteten Ent-

wicklung des Endlagersystems und können die Konsequenzen der erwarteten Entwicklung deutlich überschreiten. Die Standortauswahl muss Sorge dafür tragen, dass derartige Szenarien, sofern sie standortbedingt sind, als ausreichend unwahrscheinlich eingestuft werden können.

Szenarienanalysemethode

Die Szenarienanalyse erfolgt im Wesentlichen in drei Schritten:

1. Zunächst werden die relevanten Faktoren, die für die Charakterisierung des Verhaltens des betrachteten Endlagersystems wesentlich sind, zusammengestellt. Dabei kann sowohl auf generische Datenbasen (etwa die NEA-Datenbank) als auch auf standortspezifische Informationen zurückgegriffen werden. Der Prozess der Auswahl der Phänomene, die für die Fragestellung für relevant gehalten werden (screening), basiert auf z. T. subjektiven Entscheidungen. Dies gilt auch, wenn dieser Entscheidungsprozess stark formalisiert oder gar automatisiert ist, da in solchen Fällen die (evtl. subjektive) Entscheidung mit der Festlegung des Auswahlkriteriums gefällt wird.

2. Die Phänomene werden dann zu Szenarien kombiniert. Für die Methodik der Kombination der Phänomene gibt es verschiedene Möglichkeiten, unter denen sich derzeit keine gegenüber den übrigen durch besondere Vorteile auszeichnet.

3. Abschließend werden für die Szenarien der natürlichen Entwicklungen und des menschlichen Eindringens repräsentative Szenarien festgelegt. Die Szenarien der natürlichen Entwicklungen werden in Wahrscheinlichkeitsklassen unterteilt. Den repräsentativen Szenarien wird die für die Klasse insgesamt gültige Eintrittswahrscheinlichkeit anteilmäßig zugeordnet. Die unter 1. getroffenen Feststellungen bezüglich der Subjektivität eines solchen Entscheidungsprozesses gelten auch hier.

Konsequenzenanalysen

Die Ermittlung der Konsequenzen aus der Freisetzung von Radionukliden aus dem Abfall in die Geosphäre und Biosphäre erfolgt für alle repräsentativen Szenarien. Die Konsequenzenanalyse erfordert die Entwicklung konzeptioneller Modelle und deren

Umsetzung in mathematische Rechenverfahren. Der Konsequenzenanalyse liegt ein integriertes Modell des Endlagersystems zugrunde, welches Teilmodelle in sich vereinigt. Als Ergebnis der Konsequenzenanalysen werden z.B. räumlich verteilte und zeitlich veränderliche Grundwasserströme, Konzentrationen von Radionukliden sowie Dosiswerte ermittelt.

Der Langzeitsicherheitsnachweis muss den unvermeidlich auftretenden Unsicherheiten in folgender Weise Rechnung tragen:

1. Szenariunsicherheiten: Es hat eine systematische Szenarienanalyse zu erfolgen. Entscheidungen innerhalb der Szenarienanalyse sind zu begründen und nachvollziehbar zu dokumentieren. Für die quantitative Sicherheitsanalyse sind repräsentative Szenarien auszuwählen. Diese Auswahl ist ebenfalls zu begründen und nachvollziehbar zu dokumentieren.
2. Modellunsicherheiten: Bei bestehenden Unsicherheiten über die Wahl konzeptueller Modelle ist von konservativen Annahmen auszugehen oder es sind Modellalternativen zu untersuchen. Die jeweilige Vorgehensweise ist zu begründen und nachvollziehbar zu dokumentieren. Für verwendete Rechenmodelle ist der Stand der Vertrauensbildung in diese Modelle zu belegen.
3. Datenunsicherheiten: Für die in die Modellrechnungen eingehenden Daten sind konservative Abschätzungen oder Verteilungsfunktionen entsprechend der bestehenden Unsicherheiten zu verwenden. Diesbezügliche Entscheidungen sind zu begründen und nachvollziehbar zu dokumentieren.

Bewertungsgröße Risiko

Das Wort „**Risiko**“ kennzeichnet eine mögliche Gefährdung. Zur Beschreibung der von einem Endlager ausgehenden potenziellen Gefährdung sind Kenntnisse über mögliche Ereignisse und Entwicklungen, also *Szenarien* S_i , die aus ihnen resultierenden *Konsequenzen* mit Bemessungsgrößen C_i sowie die *Eintrittswahrscheinlichkeiten* p_i der Szenarienabläufe und den radiologischen Belastungen eines Individuums als Folge dieser Szenarien erforderlich. Nach dem IAEA-Glossary kann dieser Sachverhalt mathematisch als Menge von Tripeln $\{<S_i|p_i|C_i>\}$ ausgedrückt werden. Eine vollständige Bestimmung der Größen S_i , p_i und C_i ist wegen der Vielzahl sich ergebender *Unsicherheiten*

ten nicht möglich. Regelwerke beziehen sich deshalb auf einzelne Aspekte der Charakterisierung des Risikos R. So setzten sich die deutschen Sicherheitskriterien von 1983 ausschließlich mit der Dosis als Konsequenzenmaß C_i auseinander, ohne die Wahrscheinlichkeiten p_i zu berücksichtigen.

Im engeren Sinne versteht man unter dem Begriff des Risikos den *Erwartungswert der Konsequenz*

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

bei dessen Bestimmung sich im Vergleich zu den vorher genannten Kriterien einige Besonderheiten ergeben:

Die Erwartungswertbildung erfordert streng genommen eine Summation (Integration) über alle denkbaren Szenarien.

- Eine Ermittlung der Gesamtheit aller denkbaren Szenarien ist nicht möglich. Mittels der Szenarienanalyse können hingegen repräsentative Szenarien identifiziert und zur Bewertung herangezogen werden. Daher sollte zur Bewertung des Risikos von der Menge „aller“ Szenarien S zu einer Menge *repräsentativer* Szenarien $S_R \subset S$ übergegangen werden. Die Bewertungsgröße für das Risiko ist dann

$$R_R = \sum_{S_i \in S_R \subset S} p_i C_i$$

Es ist eine Quantifizierung der Wahrscheinlichkeiten p_i erforderlich.

- p_i ist die Gesamtwahrscheinlichkeit aus Eintritt und Ablauf eines Szenariums i und der Wahrscheinlichkeit für ein Individuum, aufgrund dieses Szenariums eine radiologische Belastung d_i zu erfahren. Die verwendete Eintrittswahrscheinlichkeit ist also die Wahrscheinlichkeit, dass das betrachtete Szenario zu irgendeinem Zeitpunkt eintritt, so dass im Bewertungszeitraum die Exposition irgendeiner Einzelperson aufgrund ihres Aufenthaltsortes und ihrer Verhaltensweise erfolgen kann. Die Gesamtwahrscheinlichkeit ist als integrale Größe über den Betrachtungszeitraum (Nachweiszeitraum) anzusehen.
- Hinsichtlich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeiten lassen sich die Szenarien einordnen in die „wahrscheinlichen Szenarien“, denen eine relativ hohe Eintrittswahrscheinlichkeit

lichkeit zugeordnet werden kann, und die „weniger wahrscheinlichen Szenarien“ mit einer deutlich geringeren Eintrittswahrscheinlichkeit.

- Zur Ermittlung des Risikos R_R können die Szenarien nach ihren Eintrittswahrscheinlichkeiten geordnet und die Summenbildung in die Summation über die wahrscheinlichen Szenarien S_w und die Summation über die weniger wahrscheinlichen Szenarien S_u aufgespalten werden.

$$\begin{aligned}
 R_R &= \sum_{S_i \in S_R \subset S} p_i C_i \\
 &= \sum_{S_i \in S_w \subset S_R} p_i C_i + \sum_{S_i \in S_u \subset S_R} p_i C_i \\
 &\leq \sum_{S_i \in S_w \subset S_R} p_i \cdot \max_{S_i \in S_w \subset S_R} C_i + \sum_{S_i \in S_u \subset S_R} p_i C_i \\
 &= \max_{S_i \in S_w \subset S_R} C_i \cdot \sum_{S_i \in S_w \subset S_R} p_i + \sum_{S_i \in S_u \subset S_R} p_i C_i \\
 &\leq \max_{S_i \in S_w \subset S_R} C_i + \sum_{S_i \in S_u \subset S_R} p_i C_i \\
 &= C_{\max} + R_{res}
 \end{aligned}$$

Diese Vorgehensweise ermöglicht die Bewertung der potenziellen Auswirkungen der wahrscheinlichen Szenarien anhand der maximalen Konsequenz C_{\max} und die Bewertung der potenziellen Auswirkungen der weniger wahrscheinlichen Szenarien anhand des restlichen Risikos R_{Rest} .

Die Festlegung auf das Konsequenzenmaß Risiko ist erforderlich.

- Das Konsequenzenmaß C_i kann eine aufgrund einer Strahlenexposition erhaltene Dosis sein. Eine Dosis stellt ein Gesundheitsrisiko für den Menschen dar. In der Praxis wird deshalb als Bewertungsgröße das Risiko aufgrund einer erhaltenen Dosis angegeben. Es handelt sich um *bedingte* Risiken für bestimmte Gesundheitsschäden (Tod, Krebs, Erbschäden), die sich unter der *Bedingung* einer bestimmten Dosisbelastung ergeben. Ihre Ermittlung setzt die Annahme von Beziehungen zwischen Dosis und bedingtem Risiko voraus (z. B. ICRP-Faktoren) und erfordert zwingend eine *Spezifizierung der Art des betrachteten Schadens*.
- Zur Bewertung der Langzeitsicherheit soll als Maß der *Konsequenz* C_i das radiologische Risiko für ein Individuum aus einer betroffenen Gruppe, einen schweren kör-

perlichen Schaden zu erleiden, verwendet werden: $C_i = d_i \gamma$, mit d_i als der in der Konsequenzenanalyse ermittelten Individualdosis und γ als dem Risikokonversionsfaktor ($5 \cdot 10^{-2} \text{ 1/Sv}$).

Begründung für den Erwartungswert der Konsequenz

- Der wichtigste Grund für die Verwendung des o.g. Erwartungswertes ist die Möglichkeit, potenziell große Konsequenzen als weniger gravierend einzustufen, wenn diese als wenig wahrscheinlich angesehen werden. Das IAEA-Glossary nimmt dazu wie folgt Stellung:

"The summing of *risks* associated with *scenarios* or *event sequences* with widely differing values of C_i is controversial. In such cases the use of the term 'expectation value', although mathematically correct, is misleading and should be avoided if possible."

Diese Bedenken ergeben sich aus der aggregierenden Eigenschaft des Erwartungswertes, der Auskünfte über Bandbreiten, Streuungen o.ä. nicht ermöglicht.

Berücksichtigung von Unsicherheiten

- Es ergibt sich die Frage, in welcher Form Unsicherheiten bzgl. der Bestimmung bzw. Schätzung der einzelnen Komponenten S_i , p_i und C_i zu berücksichtigen sind:
 - Eine Darstellung als *Teil des Risikos* ergäbe eine Erwartungswertbildung auch über diese Unsicherheiten und somit ihre „Ausmittlung“.
 - Eine differenziertere, aber auch hinsichtlich der Präsentation anspruchsvollere Möglichkeit ist eine Präsentation als *Unsicherheit bei der Bestimmung des Risikos*.

Zusammenfassend wird im Folgenden ein Weg zur Nachweisführung der Einhaltung des Schutzzieles abgeleitet.

Nachweisführung der Einhaltung des Schutzzieles

Für die Anwendung des Risikokriteriums wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

- Als Maß der Konsequenz C_i des Szenariums S_i soll das radiologische Risiko für ein Individuum aus einer betroffenen Gruppe, einen schweren körperlichen Schaden zu erleiden, verwendet werden: $C_i = d_i \gamma$, mit d_i als der in der Konsequenzenanalyse ermittelten Individualdosis und γ als dem Risikokonversionsfaktor ($5 \cdot 10^{-2} \text{ 1/Sv}$).
- Zur Ermittlung einer Bewertungsgröße soll von der Menge „aller“ Szenarien S zu einer Menge repräsentativer Szenarien $S_R \subset S$ übergegangen werden. Die Bewertungsgröße für das Risiko ist dann
$$R_R = \sum_{S_i \in S_R \subset S} p_i C_i.$$
- p_i ist die Gesamtwahrscheinlichkeit aus Eintritt und Ablauf eines Szenariums i und der Wahrscheinlichkeit für ein Individuum, aufgrund dieses Szenariums eine radiologische Belastung d_i zu erfahren. Die verwendete Eintrittswahrscheinlichkeit ist also die Wahrscheinlichkeit, dass das betrachtete Szenario zu irgendeinem Zeitpunkt eintritt, so dass im Bewertungszeitraum die Exposition irgendeiner Einzelperson aufgrund ihres Aufenthaltsortes und ihrer Verhaltensweise erfolgen kann. Die Gesamtwahrscheinlichkeit ist als integrale Größe über den Betrachtungszeitraum (Nachweiszeitraum) anzusehen.
- Die bei der Ermittlung bzw. Schätzung der drei Risikokomponenten Szenario, Wahrscheinlichkeit und Konsequenz auftretenden Unsicherheiten sollen nicht gemittelt werden. Vielmehr soll folgendermaßen vorgegangen werden:
 - Dem Problem der Szenarienvollständigkeit soll durch den Übergang zu repräsentativen Szenarien (s.o.) begegnet werden.
 - Bei der Bestimmung von Eintrittswahrscheinlichkeiten sollen obere, fundiert abgeleitete Schranken Verwendung finden. In der Praxis werden sich in der Regel folgende Möglichkeiten ergeben:

Für die wahrscheinlichen Szenarien lassen sich fundiert in der Regel keine Wahrscheinlichkeiten p_i ableiten. Daher ist für eine konservative Schätzung des Risikos in dieser Klasse der Sachverhalt $\sum_i p_i \leq 1$ zu verwenden und damit die maximale potenzielle Auswirkung C_{\max} weiter zu betrachten. Bei der Bewertung der Konsequenz kann die Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition herangezogen werden.

Die Eintrittswahrscheinlichkeiten der weniger wahrscheinlichen Szenarien mit $p_i < 0,1$ sind fundiert zu begründen.

- Bei der Schätzung der Konsequenz sind probabilistische Methoden anzuwenden. In der Bewertungsgröße sind Vertrauensintervalle für die C_i zu verwenden.

C3 Erhalt von Wissen

Das unbeabsichtigte menschliche Eindringen in ein Endlager braucht für die Zeit nach Verschluss des Endlagers, in der das Wissen um die Existenz und die Lage des Endlagers noch vorhanden ist, in der Szenarienanalyse nicht behandelt werden. In diesem Fall wird unterstellt, dass ein Eingriff des Menschen wesentlich erfolgt und damit beabsichtigt ist. Für das beabsichtigte Eindringen in ein Endlager muss die jeweils handelnde Gesellschaft die Verantwortung übernehmen.

Damit stellt sich die Frage, wie lange nach Verschluss des Endlagers das Wissen um dessen Vorhandensein vorausgesetzt werden kann. Zur Beantwortung dieser Frage wurde einerseits recherchiert, wie weit historische Ereignisse zurückverfolgt werden können bzw. aus welcher Zeit alte Kataster (z.B. Bergbauarchive) stammen. Andererseits wurde geprüft, wie lange mit modernen Dokumentationsmitteln heute erstellte Archive zukünftig Bestand haben können/werden.

Ad 1: Nach /NEA 95/ zeigen die Erfahrungen in einigen Europäischen Ländern, dass Aufzeichnungen in Archiven über einige Jahrhunderte Bestand haben können. Z.B. wurde das Bergbauarchiv (Office of Quarries) in Paris unter Ludwig XVI. begonnen. Es wird heute noch geführt und auf Stand gehalten. In Deutschland sind die ältesten Akten im Oberbergamt in Freiberg auf das Jahr 1499 datiert /SST 01/ und haben damit über ein halbes Jahrtausend Bestand. In den Archiven des Vatikan lagern Dokumente, die über tausend Jahre alt sind /JEN 93/. Danach erscheint die Annahme, dass das Wissen um die Existenz eines Endlagers aufgrund von Aufzeichnungen für bis zu 500 Jahre erhalten bleiben kann, zunächst gerechtfertigt. Es muss aber zudem sichergestellt werden, dass die Informationen um die Existenz des Endlagers immer verfügbar bleiben und zu jeder Zeit sicher erkannt werden können. Um der Gefahr der Vernichtung der Archive in Unruhezeiten oder durch andere zerstörerische Gefahren (z.B. Brandereignisse) vorzubeugen, sind alle Informationen redundant und an sicheren Orten aufzubewahren. Es wird vorgeschlagen, Endlagerstandorte auch auf Landkarten zu verzeichnen /NEA 95/. In einigen Ländern wird diskutiert, die Endlagerstandorte durch entsprechende Markierungen wie Sichtzeichen oder „Denkmäler“ zu kennzeichnen. Von der ANDRA wird diesbezüglich argumentiert, dass Marker die Gefahr des Eindringens eher erhöhen können, indem sie die Neugier der Menschen hervorrufen. Sie sollten daher nicht direkt über dem Endlager platziert werden, sondern im Abstand von mindestens 10 bis 20 km.

Ad 2: Von den heute zur Verfügung stehenden Mitteln zur Aufbewahrung von Informationsmaterial kann Papier bei entsprechender Vorbehandlung bis zu 1000 Jahre archiviert werden. Die Lebensdauer von Mikrofilmen wird auf 200 bis 400 Jahre geschätzt, wenn die Information mindestens einmal zwischendurch regeneriert wird. Dagegen müssen Magnetplatten oder Kompaktdisks häufig kopiert werden, da ihre Lebensdauer nach heutigen Erfahrungen nur einige 10 Jahre beträgt. Dabei ist es von entscheidender Bedeutung, dass die zur Auswertung benötigte Hard- und Software verfügbar und funktionsfähig bleibt. Auf lange Sicht besteht somit nur die Wahl zwischen Papier und Mikrofilm.

Unter dem Aspekt des Wissenserhalts für zukünftige Generationen kann dieser bei der richtigen Wahl des Dokumentationsmittels für den in den Sicherheitskriterien avisierten Zeitraum von 500 Jahren als gesichert angesehen werden. Bei der Behandlung der Szenarien braucht damit als Zeitpunkt für ein Eingriffsszenarium kein früherer Zeitpunkt gewählt werden. Eine analoge Festlegung bei der Behandlung von Szenarien, die den unbeabsichtigten Eingriff des Menschen in ein Endlager beschreiben, findet sich im französischen Regelwerk /RFS 91/. Hier wird darauf hingewiesen, dass in einer "Initial-Phase" von 500 Jahren, in der Aufzeichnungen über das Endlager verfügbar sind, menschliche Eingriffe extrem unwahrscheinlich sind. Bei der Entwicklung von Szenarien zum unbeabsichtigten Eingriff des Menschen ist davon auszugehen, dass das Endlager und seine Lage in Vergessenheit geraten ist.

Es wird darauf hingewiesen, dass neben dem Erhalt des Wissens sichergestellt werden muss, dass die Informationen bei Aktivitäten am Standort berücksichtigt werden.

Verwendete Unterlagen:

/FZK 98/ Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
 Karlsruher Nuklidkarte, 6. Auflage 1995
 korrigierter Nachdruck 1998

/JEN 93/ Jensen, M.: Conservation and Retrieval of Information
 Final Report of the Nordic Nuclear Safety Research Project KAN - 1.3
 August 1993

- /NEA 95/ Nuclear Energy Agency (NEA)
Future Human Action at Disposal Sites
OECD, Paris 1995
- /RFS 91/ Règle Fondamentale de Sûreté (RFS) No III.2.f
Stockage définitive de déchets radioactifs en formation géologique profonde.
Englische Fassung: Basic Safety Rules, Determination of the objectives to be adopted in the design and construction phases of the creation of a deep geological formation radioactive waste repository to ensure safety after the repository has been closed, Rule No.III.2.f,1991
- /SST 01/ Sächsisches Staatsarchiv
Oberbergamt Freiberg
Schneeberger Bergbuch
pers. Mitteilung, Dezember 2001

Entwurf

**Präzisierung und Weiterentwicklung der
Sicherheitskriterien für die
Endlagerung radioaktiver Abfälle
in einem Bergwerk**

B. Baltes
H. Heuser
A. Kindt
W. Thomas

12.03.02

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Anwendungsbereich der Sicherheitskriterien	4
3	Definitionen	4
4	Aufgabe der Endlagerung	6
5	Sicherheitsprinzipien für die Endlagerung	6
6	Radiologische Schutzziele	7
6.1	Betriebsphase des Endlagers	8
6.1.1	Schutz des Menschen und der Umwelt	8
6.1.2	Optimierung des Strahlenschutzes	9
6.2	Nachbetriebsphase	10
6.2.1	Schutz des Menschen	10
6.2.2	Schutz der Umwelt	10
6.2.3	Optimierung des Strahlenschutzes	11
7	Standort	11
8	Planung und Errichtung	13
8.1	Planungsgrundsätze	13
8.2	Qualitätssicherung	14
8.3	Auslegung	14
8.4	Errichtung des Endlagerbergwerkes	15
8.4.1	Schächte	15
8.4.2	Grubenbaue	15
8.5	Planung des Einlagerungsbetriebs	15
8.6	Überwachungsprogramm	16
8.7	Radioaktive Abfälle	17

8.8	Stilllegung	17
8.9	Planung der Nachbetriebsphase	18
9	Betriebsphase	18
9.1	Einschluss radioaktiver Stoffe	19
9.2	Kritikalitätssicherheit	19
9.3	Wärmeabfuhr	19
9.4	Strahlenschutz	19
9.5	Ableitungen radioaktiver Stoffe	20
9.6	Brand- und Explosionsschutz	20
9.7	Einwirkungen von innen	20
9.8	Einwirkungen von außen	20
9.9	Qualitätssicherung	21
9.10	Betriebsführung	21
10	Nachbetriebsphase	22
10.1	Zeitraum für den Langzeitsicherheitsnachweis	23
10.2	Langzeitsicherheitsanalysen	23
10.2.1	Szenarienanalyse	23
10.2.2	Konsequenzenanalysen	25
10.2.3	Datenerhebung	25
10.2.4	Nachweisführung der Einhaltung des Schutzzieles	25
	Gesetze und Empfehlungen	28

1 Einführung

In Deutschland sollen radioaktive Abfälle durch Endlagerung in einem Bergwerk entsorgt werden. Art und Menge der radioaktiven Abfälle sowie der Nachweis der langzeitigen Sicherheit des Endlagers am Standort sind wesentliche Voraussetzungen für die Entwicklung eines Endlagerkonzeptes und Grundlage für die Genehmigung eines Endlagers.

Radioaktive Abfälle

In Kernkraftwerken, in den Anlagen der Kernbrennstoffversorgung und -entsorgung, in Forschungseinrichtungen, in der Industrie und in der Medizin fallen radioaktive Abfälle an, die sich nach ihrem Volumen, ihrem physikalisch-chemischen Zustand, ihrer stofflichen Zusammensetzung, ihrem Gehalt an radioaktiven Stoffen und damit der Radiotoxizität unterscheiden. Es handelt sich dabei um Rohabfälle, die entsprechend der Klassifizierung der IAEA in schwach- und mittelradioaktive - je nach Halbwertszeit unterteilt in kurzlebige und langlebige - Abfälle bzw. in hochradioaktive Abfälle eingeteilt werden können. In Deutschland gilt im Hinblick auf die Endlagerung zudem eine Einteilung in radioaktive Abfälle mit Wärmeentwicklung und in radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung. Rückstände aus der Urangewinnung werden grundsätzlich für eine Wiederverwertung vorgesehen und stellen somit derzeit keine Abfälle dar. Scheidet die Verwertung des abgereicherten Urans objektiv aus, oder wird sie von den entsorgungspflichtigen Inhabern der Stoffe nicht weiter betrieben, werden auch die Rückstände aus der Urangewinnung von der Kategorie der radioaktiven Abfälle erfasst.

Die radioaktiven Abfälle aus Kernkraftwerken und anderen kerntechnischen Anlagen stellen nach Aktivitätsinventar und Volumen bei weitem den größten Anteil der zu entsorgenden radioaktiven Abfälle dar. Bei einer Stromerzeugung von 1 GWa in einem Leichtwasserreaktor fallen etwa 25 t bestrahlte Brennelemente an. Die Betriebsabfälle in einem Kernkraftwerk belaufen sich auf etwa 75 m³ pro Jahr. Nach Zwischenlagerung mit Abklingen der Wärmeleistung und Zerfall der kurzlebigen radioaktiven Stoffe können die bestrahlten Brennelemente endlagergerecht verpackt der Endlagerung zugeführt werden. Ein noch bis zum Jahre 2005 zugelassener zweiter Entsorgungsweg

führt über die Wiederaufarbeitung der bestrahlten Brennelemente mit Abtrennung der wiederverwendbaren Kernbrennstoffe und Verglasung der verbleibenden unbrauchbaren Spaltprodukte und Actiniden. Die Glaskokillen stellen hochradioaktive Abfälle dar. Für eine Stromerzeugung von 1 GWa fallen etwa 3 m³ verglaste hochradioaktive Abfälle an sowie weitere wärmeentwickelnde und gering wärmeentwickelnde Abfälle.

Radioaktive Abfälle können eine Gefährdung für Mensch und Umwelt darstellen. Ihr radiologisches Gefährdungspotenzial und seine zeitliche Entwicklung hängt vom Aktivitätsinventar, von der Art und Strahlung, der Radiotoxizität und der Halbwertszeit der in den Abfällen enthaltenen Radionuklide ab. Zum Schutz von Mensch und Umwelt müssen die Abfälle von der Biosphäre so isoliert werden, dass von ihnen keine Gefährdung ausgeht. Die erforderliche Isolation bestimmt sich aus den Halbwertszeiten und der Aktivität der Radionuklide. Viele Radionuklide zerfallen rasch, so dass sie nicht lange von der Biosphäre isoliert werden müssen, andere Radionuklide haben z.T. sehr lange Halbwertszeiten. Daraus leiten sich bei entsprechend großem Aktivitätsinventar hohe Anforderungen für eine Isolation dieser Radionuklide ab.

Endlagerung

Die Endlagerung soll für alle radioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Formationen an einem Standort mit einer günstigen geologischen Gesamtsituation erfolgen. Ein oberflächennaher Verbleib ist bei Abfällen mit rasch abklingender Radioaktivität (Abklingabfälle) zulässig.

Die Endlagerung verfolgt das Prinzip des Konzentrierens und Isolierens in einer günstigen geologischen Gesamtsituation nach dem Mehrbarrierenkonzept von ineinandergreifenden, sich unterstützenden Barrieren. Die fundamentale Sicherheitsfunktion bei der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ist die Isolation. Für den Fall eines Austritts von Radionukliden aus dem Endlager soll das Endlagersystem günstige Rückhalte- und Verzögerungseigenschaften aufweisen, so dass die Radionuklidkonzentration auf ein unbedenkliches Maß reduziert wird.

Zur Isolation von Radionukliden werden Gesteinsbereiche verwendet, die aufgrund ihrer physikalischen und chemischen Beschaffenheit - wie keine oder geringe Durchlässigkeit gegenüber Fluiden und hohe Rückhaltefähigkeit gegenüber Radionukliden - günstige Isolationseigenschaften aufweisen. Weitere für die Endlagerung günstige Ei-

genschaften sind ein ausreichend großer Gebirgsbereich, ein einfacher geologisch-tektonischer Bau, das Fehlen tief reichender Grundwasserleiter mit meteorischem Wasser, geringe rezente Tektonik sowie günstige gebirgsmechanische Eigenschaften der Einlagerungsformation.

Prognosezeitraum

Im Standortauswahlverfahren werden Standorte mit einer günstigen geologischen Gesamtsituation ausgewiesen, deren Entwicklungsgeschichte sich über geologische Zeiträume zurückverfolgen lässt. Für diese Standorte lassen sich in diesen Zeiträumen stabile Verhältnisse mit einer wissenschaftlich fassbaren Bandbreite ihrer für die Endlagerung wesentlichen Eigenschaften nachweisen. Die geowissenschaftlichen Kenntnisse über einen so ausgewählten, durch standortspezifische Untersuchungen charakterisierten und als geeignet befundenen Standort lassen eine wissenschaftlich begründete Prognose über die zukünftige Entwicklung der geologischen Gesamtsituation in der Größenordnung von einer Million Jahre zu. Jenseits dieses Prognosezeitraumes ist eine wissenschaftlich begründete geologische Langzeitprognose in der Regel nicht mehr möglich.

Sicherheitskonzept

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

Nachweis der Sicherheit

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

2 Anwendungsbereich der Sicherheitskriterien

Die vorliegenden Sicherheitskriterien beziehen sich ausschließlich auf radiologische Schutzziele und Anforderungen, die das in § 1 Nr. 2 und § 7 Abs. 2 Satz 1 Nr. 3 des Atomgesetzes enthaltene Gebot der atomrechtlichen Schadensvorsorge konkretisieren. Nichtradiologische Anforderungen und Anforderungen zum Schutz gegen Einwirkung Dritter sind nicht Gegenstand dieser Sicherheitskriterien. Im Einklang mit Art. 2 lit. i) des Übereinkommens über nukleare Entsorgung wird die Rückholbarkeit der radioaktiven Abfälle nicht berücksichtigt.

Die Sicherheitskriterien gelten für das nach § 9b Abs. 1 AtG durchzuführende Planfeststellungsverfahren für ein zur Endlagerung radioaktiver Abfälle vorgesehenes Bergwerk an einem ausgewählten Standort.

3 Definitionen

Biosphäre ist generell definiert als die Gesamtheit der mit lebenden Organismen besiedelten Bereiche der Erde. Für die Zwecke dieses Berichtes wird diese Definition eingeschränkt auf die Bereiche der Erde, in oder aus denen Radionuklide über Luft, Grundwasser und Boden durch Inhalation oder Ingestion in den menschlichen Organismus aufgenommen oder durch die Haut absorbiert werden können.

Einschlusswirksamer Gebirgsbereich ist der Teil der geologischen Barrieren, der bei

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

Endlagersystem ist die geologische Gesamtsituation des Standortes und das Endlagerbergwerk mit seinen Komponenten wie Bergwerk, Abfallgebinde, Versatz und Dichtelemente.

Geologisches Barrierensystem ist die Gesamtheit der geologischen Einheiten zwischen Einlagerungsbereich und Biosphäre, die eine Schadstoffausbreitung ver- oder behindern.

Günstige geologische Gesamtsituation ist die Gesamtheit der Standorteigenschaften, die mit hoher Wahrscheinlichkeit die Anforderungen an die Endlagerung erfüllen. Die günstige geologische Gesamtsituation wird charakterisiert durch Eigenschaften wie stabiler geologisch-tektonischer Bau, kein tief reichender Grundwasserleiter mit meteorischem Wasser, geringe rezente Tektonik, geringe Gesteinspermeabilität, gute Rückhalteeigenschaften der Gesteine für Radionuklide, günstige gebirgsmechanische Eigenschaften der Einlagerungsformation.

Kritikalität ist der Zustand einer sich selbst erhaltenden Kettenreaktion, d.h. die Neutronenproduktionsrate ist gleich oder größer als die Neutronenverlustrate.

Mehrbarrierensystem ist die Gesamtheit der ineinandergreifenden, sich unterstützenden geologischen, geotechnischen und technischen Barrieren (gestaffelte Sicherheitsbarrieren).

Nachbetriebsphase ist die Zeitphase der Endlagerung nach Beendigung des Einlagerungsbetriebs und dem ordnungsgemäßen Verschluss des Endlagers.

Robustheit des Endlagersystems ist die Unempfindlichkeit der Barrierenwirksamkeit des Endlagersystems gegenüber inneren und äußeren Einflüssen (einschließlich Störungen).

Wirtsgestein ist das Gestein, in das die Abfälle eingelagert werden.

4 Aufgabe der Endlagerung

Die Aufgabe der Endlagerung wird wie folgt definiert:

Die Endlagerung radioaktiver Abfälle hat

- *den langzeitigen Schutz von Mensch und Umwelt vor den potenziell schädlichen Auswirkungen der eingelagerten radioaktiven Abfälle zu gewährleisten und*
- *Sorge dafür zu tragen, dass zukünftigen Generationen keine unzumutbaren Lasten und Verpflichtungen auferlegt werden.*

5 Sicherheitsprinzipien für die Endlagerung

Ausgehend von den fundamentalen Sicherheitsprinzipien der IAEA sowie des Gesetzes zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung für den sicheren Umgang mit radioaktiven Abfällen werden folgende Sicherheitsprinzipien für die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen formuliert:

- *Die aus der Endlagerung resultierende Strahlenexposition für Mensch und Umwelt soll niedrig sein gegenüber der natürlichen Strahlung.*
- *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 radioaktiver Stoffe in Deutschland dürfen außerhalb der Grenzen Deutschlands nicht größer sein als innerhalb zulässig.*
- *Für die Betriebs-, Stilllegungs- und Nachbetriebsphase des Endlagers ist die Sicherheit nachzuweisen. Bestandteil dieser Nachweise sind standortspezifische Si-*

cherheitsanalysen nach dem Stand von Wissenschaft und Technik.

- *Standortauswahl und Endlagerauslegung müssen die langzeitige Sicherheit gewährleisten. Der Nachweis der Sicherheit in der Nachbetriebsphase des Endlagers muss über einen Zeitraum von einer Million Jahre geführt werden können.*
- *Die Sicherheit des Endlagers in der Nachbetriebsphase darf sich nicht auf aktive Maßnahmen nach dem Verschluss abstützen.*

6 Radiologische Schutzziele

Die radiologischen Schutzziele, die für die Endlagerung radioaktiver Stoffe gelten, ergeben sich aus dem Atomgesetz, der Strahlenschutzverordnung und aus dem Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung.

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.

Die Errichtung und der Betrieb eines Endlagers für radioaktive Abfälle bedürfen einer Planfeststellung nach § 9b AtG. Dabei müssen die nach § 7 Abs. 2 Nr. 1, 2, 3 und 5 AtG genannten Voraussetzungen erfüllt und die Umweltverträglichkeit festgestellt sein. 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.

Gemäß § 5 StrlSchV dürfen bei Tätigkeiten die zugelassenen Dosisgrenzwerte nicht überschritten werden. Nach § 6 StrlSchV ist jede unnötige Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt zu vermeiden. Auch unterhalb der 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.

Das Gesetz zu dem Übereinkommen über die nukleare Entsorgung enthält in Artikel 24 Anforderungen zum Strahlenschutz während des Betriebes sowie weitere Anforderungen, insbesondere in den Artikeln 11, 13, 14, 15 und 16, die die Sicherheit eines End-

lagers betreffen.

6.1 Betriebsphase des Endlagers

6.1.1 Schutz des Menschen und der Umwelt

Bei Errichtung, Betrieb und Verschluss des Endlagers sind die nach Strahlenschutzverordnung geltenden Anforderungen für den Schutz der Beschäftigten, der Bevölkerung und der Umwelt einzuhalten.

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

Insbesondere sind folgende Bestimmungen der Strahlenschutzverordnung einschlägig:

§ 46: Begrenzung der Strahlenexposition der Bevölkerung

(1) Für Einzelpersonen der Bevölkerung beträgt der Grenzwert der effektiven Dosis durch Strahlenexpositionen aus Tätigkeiten nach § 2 Abs. 1 Nr. 1 ein Millisievert im Kalenderjahr.

(2) Unbeschadet des Absatzes 1 beträgt der Grenzwert der Organdosis für die Augenlinse 15 Millisievert im Kalenderjahr und der Grenzwert der Organdosis für die Haut 50 Millisievert im Kalenderjahr.

(3) Bei Anlagen oder Einrichtungen gilt außerhalb des Betriebsgeländes der Grenzwert für die effektive Dosis nach Absatz 1 für die Summe der Strahlenexposition aus Direktstrahlung und der Strahlenexposition aus Ableitungen. Die für die Strahlenexposition aus Direktstrahlung maßgebenden Aufenthaltszeiten richten sich nach den räumlichen Gegebenheiten der Anlage oder Einrichtung oder des Standortes; liegen keine begründeten Angaben für die Aufenthaltszeiten vor, ist Daueraufenthalt anzunehmen.

§ 47: Begrenzung der Ableitung radioaktiver Stoffe

Der Grenzwert für die effektive Dosis der durch Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft oder Wasser aus dem Endlager während der Betriebsphase jeweils bedingten Strah-

lenexposition beträgt 0,3 mSv im Kalenderjahr für Einzelpersonen der Bevölkerung.

§ 49: Sicherheitstechnische Auslegung für den Betrieb von Kernkraftwerken, für die standortnahe Aufbewahrung bestrahlter Brennelemente und für Anlagen des Bundes zur Sicherstellung und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle

Bei der Planung baulicher und sonstiger technischer Schutzmaßnahmen gegen Störfälle darf im ungünstigsten Störfall durch Freisetzung radioaktiver Stoffe in der Umgebung der Anlage höchstens eine effektive Dosis von 50 mSv zugrunde gelegt werden. Maßgebend für eine ausreichende Vorsorge gegen Störfälle ist dabei der Stand von Wissenschaft und Technik.

§ 55: Schutz bei beruflicher Strahlenexposition

Für beruflich strahlenexponierte Personen beträgt der Grenzwert der effektiven Dosis 20 mSv im Kalenderjahr. Außerdem sind Grenzwerte für die Organdosis einzuhalten.

6.1.2 Optimierung des Strahlenschutzes

Jede Strahlenexposition und Kontamination von Mensch und Umwelt ist unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls auch unterhalb der Grenzwerte so gering wie möglich zu halten (§ 6 StrlSchV).

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

Bei sehr kleinen Dosisbeiträgen von etwa 0,03 mSv pro Kalenderjahr oder kleiner ist eine Optimierung nicht mehr erforderlich (Konzept der trivialen Dosis).

6.2 Nachbetriebsphase

6.2.1 Schutz des Menschen

Radiologisches Schutzziel für die Nachbetriebsphase ist die Begrenzung des Risikos eines Individuums, einen schweren gesundheitlichen Schaden aus der Strahlenexposition (Individualdosis) zu erleiden. Die Individualdosis bezieht sich auf den Menschen mit seinen heute geltenden Verhaltensweisen.

Das Schutzziel gilt zeitlich unbegrenzt.

Für den Sicherheitsnachweis des Endlagers sind die potenziellen natürlichen Entwicklungen des Endlagersystems, die aufgrund innerer oder äußerer Ursache ausgelöst werden können, unter Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeit der jeweiligen Entwicklung zugrunde zu legen. Außerdem sind Einflüsse, die durch unbeabsichtigte Eingriffe des Menschen ausgelöst werden, zu berücksichtigen.

6.2.2 Schutz der Umwelt

Ein Austritt von Radionukliden aus dem verschlossenen Endlager muss so eingeschränkt sein, dass ein angemessener Schutz der Umwelt sichergestellt ist.

Der Schutz umfasst die natürlichen Lebensgrundlagen des Menschen sowie Flora und Fauna. Für den Schutz der Umwelt kann ein eigenständiges Schutzziel heute noch nicht entwickelt und definiert werden. Bei der Bewertung von Maßnahmen zum Schutz der Umwelt ist von einer qualitativen Betrachtung des heute vorhandenen Ökosystems auszugehen.

Zur Bewertung von Radionuklidfreisetzungen können in der Natur vorkommende Radionuklide mit den Gegebenheiten am Standort und in seiner Umgebung verglichen werden. Für nicht in der Natur auftretende Radionuklide liegen keine direkt anwendbaren Bewertungsmaßstäbe vor. Für diese Radionuklide sollte der Schutz der Umwelt bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle an Hand der Dosis und der chemisch-physikalischen Stoffeigenschaften bewertet werden, wobei der Stand vergleichbarer industrieller Tätigkeit berücksichtigt werden sollte.

6.2.3 Optimierung des Strahlenschutzes

Analog zu den Anforderungen der StrlSchV ist auch in der Nachbetriebsphase das Optimierungsgebot zu erfüllen.

Die Optimierung des Strahlenschutzes unter Gesichtspunkten der Langzeitsicherheit ist ein Abwägungsprozess der radiologischen Sicherheit eines Endlagers unter Berücksichtigung ökonomischer und soziologischer Faktoren. Ziel ist es sicherzustellen, dass angemessene Maßnahmen zur Reduzierung zukünftiger potenzieller radiologischer Belastungen getroffen wurden. Der Optimierung wird durch einen schrittweise und iterativ geführten Prozess bei der Endlagergestaltung Rechnung getragen, d.h. durch Standortauswahl, Standortcharakterisierung, Eignungsnachweis, Endlagerplanung und -auslegung. Die Standortauswahl, die Entwicklung eines Endlagerkonzeptes sowie die Auslegung des Endlagers erfolgen im Hinblick auf die Reduzierung von Eintrittswahrscheinlichkeiten potenzieller ungünstiger Ereignisse und Entwicklungen des Endlagersystems - sowohl bezogen auf die natürlichen Entwicklungen als auch das unbeabsichtigte menschliche Eindringen - sowie deren Auswirkungen. Weitere Maßnahmen zur Optimierung sind die Gestaltung eines robusten Endlagersystems, die Durchführung von Sicherheitsnachweisen in jedem Prozessschritt, der Einsatz von Techniken nach Stand von Wissenschaft und Technik, die Anwendung qualifizierter Verfahren, Qualitätssicherungsmaßnahmen sowie der Einsatz von qualifiziertem Personal.

Das Ziel der Optimierung des Strahlenschutzes in der Nachbetriebsphase ist erreicht, wenn der Nachweis der Einhaltung des Schutzzieles geführt ist, die Endlagerauslegung nach Stand von Wissenschaft und Technik erfolgt ist, und der Antragsteller nachgewiesen hat, dass die Planungsgrundsätze (Kap. 8.1) eingehalten wurden.

7 Standort

Die Auswahl eines potenziellen Endlagerstandortes erfolgt unter Anwendung des qualifizierten Standortauswahlverfahrens.

Standorterkundung

Die Standorteigenschaften müssen in einem Erkundungsprogramm nach qualifizierten Methoden erhoben und bewertet werden, um ausreichende Kenntnis der Standortcharakteristika hinsichtlich der Eignung des Standorts und der Bewertung der Sicherheit zu erhalten. Die Erkundungsarbeiten müssen sowohl von über Tage als auch von unter Tage durchgeführt werden. Sie müssen derart ausgeführt werden, dass das Isolationsvermögen des Standortes so wenig wie möglich beeinträchtigt wird. Auf der Basis der Erkundungsergebnisse müssen die sicherheitsrelevanten Standorteigenschaften dargelegt werden. In situ - Messungen sind vorzusehen. In einem Testplan ist darzulegen, welche zusätzlichen Untersuchungen zu wesentlichen Auslegungsparametern geotechnischer und technischer Komponenten (z.B. Verschlussmaßnahmen) sowie deren Wechselwirkung mit dem Wirtsgestein und den natürlichen Gegebenheiten durchgeführt werden müssen.

Standortcharakterisierung

Der Antragsteller hat die Ergebnisse der Standorterkundung und eine Standortcharakterisierung sowohl im Hinblick auf die betriebliche Sicherheit als auch auf die Langzeitsicherheit darzulegen.

Geowissenschaftliche Langzeitprognose

Der Antragsteller hat die aufgrund von inneren und äußeren Ursachen möglichen zukünftigen Entwicklungen des geologischen Barrierensystems in einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose zu beschreiben. Dabei muss die anthropogene Beeinflussung des geologischen Barrierensystems durch die Errichtung des Endlagerbergwerkes sowie durch die Einlagerung von radioaktiven Abfällen in die Betrachtung mit einbezogen werden.

8 Planung und Errichtung

8.1 Planungsgrundsätze

Der Planung des Endlagersystems sind folgende Planungsgrundsätze zugrunde zu legen:

- *Es ist ein Sicherheitskonzept zu erstellen, in dem darzulegen ist, mit welchen Maßnahmen die Sicherheit während des Betriebes, bei der Stilllegung sowie in der Nachbetriebsphase erreicht werden soll. Das Sicherheitskonzept sowie die technische Auslegung des Endlagers sind durch den Antragsteller darzulegen. Insbesondere sind Angaben vorzulegen zu Art und Menge der endzulagernden Abfallgebinde, zum Aktivitätsinventar und zu den Radionukliden in den einzulagernden Abfällen sowie ihren physikalisch-chemischen Stoffeigenschaften.*
- *Es ist ein robustes Endlagersystem anzustreben.*
- *Das Endlager soll als Bergwerk errichtet werden. Das Bergwerk soll nach dem Stand der Technik errichtet und betrieben werden.*
- *Zur Minimierung der Einflüsse auf das Endlager aufgrund übertägiger Ereignisse soll das Einlagerungsniveau in mindestens einigen hundert Metern Tiefe liegen.*
- *Durch ein Mehrbarrierensystem muss sichergestellt sein, dass aus dem Endlager kein unzulässiger Austritt radioaktiver Stoffe in die Biosphäre erfolgt. Im Hinblick auf mögliche Schwächungen einzelner Barrieren sowie realistischerweise anzunehmende Veränderungen ihrer Wirksamkeit muss das Mehrbarrierensystem insgesamt ausreichende Sicherheitsreserven aufweisen.*
- *Die Wirksamkeit der Barrieren darf nicht von einer Instandsetzung oder von Kontrollen bzw. Instandhaltungsmaßnahmen in der Nachbetriebsphase abhängen.*
- *Komponenten, die entscheidend für die Sicherheit des Endlagers sind, für die jedoch keine anerkannten Regeln der Technik vorliegen, müssen erprobt werden.*
- *Es sind Maßnahmen zur Vermeidung menschlicher Aktivitäten, die das Isolationsvermögen des Endlagers nachteilig beeinflussen können, vorzusehen.*
- *Es sollen angemessene Managementprinzipien zur Anwendung gelangen wie Qualitätssicherungsmaßnahmen, Einsatz qualifizierter Rechenverfahren, Einsatz*

qualifizierten Personals, Durchführung von adäquaten Messprogrammen während der Betriebsphase zur Überwachung der Auslegungsgrundlagen.

8.2 Qualitätssicherung

Es ist ein umfassendes Qualitätssicherungsprogramm zu erstellen und einzuhalten, welches alle Phasen der Endlagerung abdeckt.

8.3 Auslegung

Die Darstellung der Endlagerauslegung muss die Anforderungen an die Auslegung und die Auslegungsparameter enthalten. Dazu gehören die geotechnische und bergmännische Auslegung wie die Einlagerungstechnik (z.B. Streckenlagerung, Bohrlochlagerung), die Verfüllung und der Schachtverschluss. Außerdem ist die Beherrschung der Gas- und Wärmeentwicklung, die Abschirmung der Strahlung der Abfallgebände bei der Zwischen- und Einlagerung und - bei spaltstoffhaltigen Abfällen - die Einhaltung der Kritikalitätssicherheit darzulegen. Überwachungsmaßnahmen und Beweissicherungsmaßnahmen nach Verschluss des Endlagers sind vorzusehen.

Der Auslegung des Endlagers müssen standortspezifische Sicherheitsanalysen zugrunde liegen. Mit Hilfe der Sicherheitsanalysen sollen Anforderungen an Komponenten und Teilsysteme erkannt und festgelegt werden. Im Sicherheitskonzept ist darzulegen, welche Sicherheitsanalysen für den bestimmungsgemäßen Betrieb, die Stilllegung und die Nachbetriebsphase der Auslegung zu Grunde liegen. Es ist darzulegen, gegen welche Störfälle das Endlager ausgelegt ist.

Geotechnische Langzeitprognose

Der Antragsteller hat die Barrierenwirksamkeit der technischen Barrieren in einer geotechnischen Langzeitprognose unter Berücksichtigung der in der geologischen Langzeitprognose ermittelten Entwicklung des geologischen Barrierensystems zu beschreiben.

8.4 Errichtung des Endlagerbergwerkes

Den besonderen sicherheitstechnischen Anforderungen eines Endlagers entsprechend sind über die Belange eines konventionellen Bergwerkes hinausgehende folgende zusätzliche Gesichtspunkte zu beachten.

8.4.1 Schächte

Die Schachtansatzpunkte sind unter Beachtung der geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten sowie der gebirgsmechanischen Eigenschaften des Deckgebirges/ Nebengesteins und der Endlagerformation festzulegen. Durch einen geeigneten Schachtausbau ist sicherzustellen, dass ein unbeherrschbarer Wassereinbruch durch den Schacht während des Betriebs praktisch ausgeschlossen werden kann.

8.4.2 Grubenbaue

Alle Grubenbaue sind so herzustellen, dass ihre Standsicherheit bis zu ihrer planmäßigen Verfüllung erhalten werden kann. Hierzu sind u.a. zwischen den Einlagerungsräumen ausreichend bemessene Sicherheitsfesten zu belassen.

Durch die Anordnung der Einlagerungsräume ist sicherzustellen, dass - unter Berücksichtigung der Gas- und Wärmeentwicklung als Folge der Endlagerung radioaktiver Abfälle - die Standsicherheit nicht unzulässig beeinflusst wird und die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches auch nach der Verfüllung nicht beeinträchtigt wird.

8.5 Planung des Einlagerungsbetriebs

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

Die Anzahl der offenen Einlagerungsbereiche (Strecken, Kammern, Bohrlöcher) ist unter Beachtung einer betrieblich erforderlichen Vorhaltung zu minimieren. Durch ein

entsprechendes Einlagerungskonzept sind die Einlagerungsräume so kurzzeitig wie möglich offen zu halten und nach beendeter Nutzung zu verschließen.

Das Endlagerbergwerk ist in Einlagerungsfelder mit einzelnen Einlagerungsbereichen zu untergliedern. Sind Teile dieser Felder für die Einlagerung genutzt, werden diese Teile abgeworfen. Nach Nutzung sind die Felder gegen das offene Bergwerk hin abzuschließen.

Handhabungs- und Transportvorgänge im Endlager bedürfen der besonderen Beachtung, da hierbei mit den höchsten Strahlenbelastungen des Personals zu rechnen ist. Transporteinrichtungen für die Einlagerung sind daher so auszulegen, dass die Strahlenexposition von Personen bei der Handhabung und dem Transport von Abfällen möglichst gering bleibt, Schäden an den Einlagerungsbehältern auch bei Störungen an den Transporteinrichtungen vermieden und Störfallmöglichkeiten reduziert werden können.

Verschiedene Einlagerungsfelder und Transportstrecken sollten möglichst in selbstständige voneinander abtrennbare Wetterabteilungen eingeordnet werden, um bei Auftreten einer Kontamination deren Ausbreitung in nicht betroffene Bereiche zu vermeiden. Es ist eine zuverlässige Trennung zwischen Frisch- und Abwetterbereichen vorzunehmen.

8.6 Überwachungsprogramm

Neben den routinemäßigen Betriebs- und Strahlenschutzüberwachungsmaßnahmen ist ein Überwachungsprogramm für das in Betrieb befindliche Endlager zu planen. Dieses Überwachungsprogramm dient der Bestätigung der betrieblichen Auslegungsparameter, die in die Sicherheitsanalyse eingeflossen sind.

Insbesondere sind die thermomechanischen Reaktionen des Gebirges auf das Einbringen radioaktiver Abfälle sowie die gebirgsmechanischen Vorgänge zu verfolgen. Werden signifikante Abweichungen von den Auslegungsdaten bzw. prognostizierten Zuständen festgestellt, sind ihre Auswirkungen auf die Sicherheit des Endlagerbergwerkes zu analysieren und gegebenenfalls durch eine Modifizierung des Endlagers bzw. des weiteren Betriebes zu berücksichtigen.

Zur Verfolgung und Überprüfung der Entwicklung der Einlagerungsorte nach Einlagerung der radioaktiven Abfälle sollen während der Betriebsphase in den jeweiligen Endlagerabschnitten an ausgewählten Einlagerungsorten für den Einlagerungsabschnitt repräsentative Messprogramme vorgesehen werden. Zur Bestätigung der zur Anwendung gelangten Modelle sind gezielte Beobachtungen erforderlich.

8.7 Radioaktive Abfälle

Der Antragsteller muss eine Zusammenstellung der einzulagernden Abfälle nach ihrer Art, Menge und Eigenschaften vorlegen. Es müssen Angaben zur insgesamt eingelagerten Aktivität unter Angabe der Antragswerte gemacht werden. Aufbauend auf den Ergebnissen der Sicherheitsanalysen für das Endlagersystem sind Anforderungen an die jeweiligen zur Endlagerung vorgesehenen radioaktiven Abfälle festzulegen. Sie müssen Anforderungen an das Aktivitätsinventar sowie die Abfallformen, die Behälter und Verpackungen enthalten. Darüber hinaus müssen sie den betrieblichen Belangen Rechnung tragen und so festgelegt werden, dass sie durch eine Produktkontrolle überprüfbar sind.

Abfälle sollen in fester oder verfestigter Form endgelagert werden. Es dürfen nur nicht-brennbare und nicht explosionsfähige Abfallgebinde eingelagert werden. Das Einlagerungskonzept und der zulässige Anteil an Spaltstoffen in den Abfällen sind so festzulegen, dass die Abfallgebinde unterkritisch bleiben. Bei Abfallgebinden ist entweder die Konzentration von Radionukliden im Abfallgebinde so zu begrenzen oder die Einlagerungsdichte der Abfallgebinde so anzupassen, dass unter Berücksichtigung der geplanten Anordnung im Endlager die Temperaturgrenzwerte, resultierend aus den Auslegungsanforderungen an das Endlager und das Wirtsgestein, eingehalten werden.

8.8 Stilllegung

Das Endlager ist am Ende der Betriebsphase stillzulegen. Es ist ein Verfüll- und Verschlusskonzept zu erstellen, das die Anforderungen, die sich aus der Standsicherheit und der Langzeitsicherheit ergeben, erfüllt.

8.9 Planung der Nachbetriebsphase

Überwachung

Errichtung, Betrieb und Stilllegung des Endlagerbergwerks werden so durchgeführt und überwacht, dass in der Nachbetriebsphase ein Kontroll- und Überwachungsprogramm zusätzlich zu den Umweltschutzmessungen und Geländevermessungen aus Sicherheitsgründen nicht erforderlich ist. Die Safeguards - Anforderungen von IAEA und EURATOM bleiben unberührt.

Dokumentation und Kennzeichnung

Die markscheiderischen Daten des Endlagers, die Charakterisierung der eingelagerten Abfälle, die umweltrelevanten Daten zu Beginn der Nachbetriebsphase sowie die wesentlichen technischen Maßnahmen bei Errichtung, Betrieb und Stilllegung des Endlagerbergwerkes sind zu dokumentieren. Vollständige Dokumentensätze sind räumlich getrennt an geeigneten Orten so aufzubewahren, dass die Informationen über die Existenz des Endlagers für einen Zeitraum von 500 Jahren sicher erhalten bleiben.

Es muss dafür Sorge getragen werden, dass die Dokumentation bei beabsichtigten Aktivitäten am Standort zur Kenntnis gelangt.

9 Betriebsphase¹

Die sicherheitstechnischen Anforderungen für die Betriebsphase des Endlagers sollen in einer Leitlinie festgelegt werden. Es gelten die folgenden Sicherheitskriterien und grundlegenden Anforderungen.

¹ Dieses Kapitel wird in einer Leitlinie konkretisiert.

9.1 Einschluss radioaktiver Stoffe

Der sichere Einschluss radioaktiver Stoffe ist durch die Abfallmatrix, die Behälter, bzw. bei aktivierten Stoffen durch das Material selbst zu gewährleisten. Sofern unvermeidlich flüchtige Radionuklide aus den Abfallgebinden austreten, sind entsprechende Strahlenschutzmaßnahmen zum Schutz des Betriebspersonals und der Bevölkerung zu treffen (siehe Kap. 9.5).

9.2 Kritikalitätssicherheit

Die Handhabung, Lagerung und Einlagerung von spaltstoffhaltigen radioaktiven Abfällen ist so vorzunehmen, dass sie im bestimmungsgemäßen Betrieb, bei Störfällen sowie bei Einwirkungen von außen stets unterkritisch bleiben.

9.3 Wärmeabfuhr

Die Abfuhr der Zerfallswärme aus den Abfallgebinden muss soweit durch passive Kühlung (Naturkonvektion) sichergestellt werden, dass an den Abfallgebinden, an sicherheitstechnisch wesentlichen Komponenten und in den Bauwerken des Endlagers keine unzulässigen Temperaturen auftreten.

9.4 Strahlenschutz

Durch die Abfallgebinde, ihre Anordnung sowie durch bauliche Strukturen und bewegliche Abschirmungen ist zum Schutz des Betriebspersonals und der Bevölkerung eine den Anforderungen der Strahlenschutzverordnung entsprechende Abschirmung ionisierender Strahlung vorzusehen.

Bei der Anlieferung sind alle eingehenden Abfallgebinde auf Einhaltung der für das Endlager geltenden radiologischen Grenzwerte durch Messung zu überprüfen. Nach § 34 StrlSchV ist eine Strahlenschutzanweisung zu erstellen, zu beachten und ggf. geänderten Randbedingungen anzupassen. Das Endlager ist in Strahlenschutzbereiche einzuteilen, in denen an repräsentativen Stellen die Ortsdosisleistung, getrennt nach Gamma- und Neutronendosis, zu messen ist. Die Raumluft in Arbeitsbereichen,

in denen Kontaminationen auftreten können, ist zu Kontrollzwecken zu überwachen.

9.5 Ableitungen radioaktiver Stoffe

Die beantragten Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Fortluft und Abwasser sind vollständig und durch ihre wesentlichen Radionuklide zu spezifizieren.

Bezüglich der Begrenzung der Strahlenexposition der Bevölkerung und der Ableitung radioaktiver Stoffe gelten die Anforderungen von § 46 und 47 StrlSchV. Für die Emissions- und Immissionsüberwachung gelten die Anforderungen von § 48 StrlSchV.

9.6 Brand- und Explosionsschutz

Der Brandschutz des Endlagers ist nach dem kerntechnischen Regelwerk der Reihe KTA 2101 zu gestalten, sofern das konventionelle Regelwerk nicht bereits weitergehende Anforderungen stellt.

Das Endlager ist so auszulegen, dass Explosionen praktisch ausgeschlossen werden können.

9.7 Einwirkungen von innen

In einer Störfallanalyse ist zu untersuchen, welche Betriebsstörungen und Störfälle in der Betriebsphase des Endlagers auftreten können. Aus dieser Analyse sind auslegungsbestimmende Störfälle abzuleiten und gegenüber den Betriebsstörungen abzugrenzen. Menschliches Fehlverhalten ist bei der Analyse der Störfallmöglichkeiten zu berücksichtigen.

Für auslegungsbestimmende Störfälle ist die Einhaltung der Anforderungen von § 49 StrlSchV nachzuweisen.

9.8 Einwirkungen von außen

Naturbedingte Einwirkungen von außen, wie Sturm, Regen, Schneefall, Frost, Blitzschlag, Hochwasser, Erdbeben und Erdbeben sind als betriebliche Lasten oder als

Auslegungsstörfälle zu berücksichtigen.

Im Rahmen einer Sicherheitsanalyse ist darzulegen, welche Auswirkungen durch zivilisatorisch bedingte äußere Einwirkungen zu erwarten sind. Die Entscheidung, welche Ereignisse als Auslegungsstörfälle im Sinne des § 49 StrlSchV zu bewerten sind und ob und welche Schutzmaßnahmen unter dem Gesichtspunkt der Reduzierung der Schadensauswirkung bei Ereignissen erforderlich sind, die wegen ihrer geringen Eintrittshäufigkeit nicht als Auslegungsstörfälle einzustufen sind, hat sich insbesondere an den Ergebnissen der Sicherheitsanalyse und an den Auswirkungen in der Umgebung des Endlagers zu orientieren.

9.9 Qualitätssicherung

Bereits bei Planung und Auslegung des Endlagers ist ein nach Sicherheitserfordernissen abgestuftes Konzept zur Qualitätssicherung für die Errichtung und den Betrieb des Endlagers auszuarbeiten und beim Betrieb des Endlagers einzuhalten.

9.10 Betriebsführung

Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten der Betriebsführung sind klar festzulegen. Der Betrieb ist geeignet zu strukturieren, es sind die erforderlichen personellen, organisatorischen, die Sicherheit betreffenden Voraussetzungen zu schaffen und nachzuweisen.

In einem Betriebshandbuch sind eindeutige technische Sicherheitsspezifikationen und Arbeitsanweisungen für alle Betriebsvorgänge, für die Beherrschung von Störfällen und die Beseitigung von Störfallfolgen festzulegen und im Betrieb einzuhalten.

Die Inbetriebnahme des Endlagers ist in einem Inbetriebsetzungs-Programm festzulegen, das die Schritte der Inbetriebnahme, durchzuführende Inbetriebsetzungs-Prüfungen und erforderliche Tests und Kalterprobungen definiert. Erforderliche wiederkehrende Prüfungen sind in einem Prüfhandbuch festzulegen.

Der Betrieb des Endlagers ist dahingehend zu überwachen, dass sicherheitstechnisch bedeutsame Störungen des Betriebes und Störfälle zuverlässig erkannt und die im

Betriebshandbuch niedergelegten Gegenmaßnahmen ergriffen werden können. Störungsmeldungen sind zentral zu erfassen und zu dokumentieren. Über sicherheitstechnisch bedeutsame Ereignisse ist Buch zu führen. Sicherheitsrelevante Erkenntnisse aus Inbetriebnahme, bestimmungsgemäßem Betrieb (insbesondere bei Reparatur) und wiederkehrenden Prüfungen sind zu dokumentieren.

Betriebserfahrungen des Endlagers sind systematisch auszuwerten und bei der weiteren Betriebsführung zu berücksichtigen.

Für Notfälle ist ein Notfallschutzplan auszuarbeiten und an einer ständig besetzten Stelle im Betrieb verfügbar zu halten.

10 Nachbetriebsphase²

Der Nachweis der Sicherheit in der Nachbetriebsphase muss als umfassende Sicherheitsbewertung des Endlagersystems geführt werden und daher geologische, geotechnische, hydrogeologische, radiologische, chemotoxische und technische Aspekte und ggf. Einzelnachweise umfassen. Der Sicherheitsbewertung für die Nachbetriebsphase ist eine wissenschaftlich fundierte Prognose der zeitlichen Entwicklung des Endlagersystems in Bezug auf seine langzeitige Barrierenfunktion zugrunde zu legen. Basis der Sicherheitsbewertung sind die Erkenntnisse der Standortcharakterisierung, die geowissenschaftliche Langzeitprognose sowie Langzeitsicherheitsanalysen. Die Ergebnisse der Langzeitsicherheitsanalysen werden anhand des in Kap. 6.2.1 enthaltenen Schutzzieles bewertet. Unterstützend sollen Indikatoren zur Bewertung des Isolationsvermögens des Endlagersystems sowie zur Bewertung von Systemeigenschaften herangezogen werden.

Der Nachweis der Langzeitsicherheit muss durch eine umfassende standortspezifische Sicherheitsbewertung erbracht werden. Der Langzeitsicherheitsnachweis stützt sich auf

- *die Standortcharakterisierung und eine geowissenschaftliche Langzeitprognose,*

² Dieses Kapitel wird in einer Leitlinie konkretisiert.

- die Charakterisierung der technischen Barrieren und die geotechnische Langzeitprognose,
- die Umsetzung des Sicherheitskonzeptes und die Beachtung der Planungsgrundsätze (Kap. 8.1),
- die Gewährleistung der Kritikalitätssicherheit,
- die Darstellung und Analyse des langfristigen Verhaltens des Endlagersystems und seiner Teilsysteme zur Bestätigung des Sicherheitskonzeptes mit Hilfe der Methode der Langzeitsicherheitsanalyse sowie
- den Nachweis der Einhaltung der Sicherheitsprinzipien für die Endlagerung (Kap. 5) und des Schutzzieles für die Nachbetriebsphase (Kap. 6.2.1) mit Hilfe von Langzeitsicherheitsanalysen über den geforderten Nachweiszeitraum (Kap. 10.1).

Den Langzeitsicherheitsanalysen sind die potenziellen Entwicklungen des Endlagersystems aus inneren oder äußeren Ursachen zugrunde zu legen. Außerdem sind Entwicklungen, die durch Aktivitäten des Menschen ausgelöst werden können, zu berücksichtigen. Den bestehenden jeweiligen Unsicherheiten wie den Szenarien-, Daten- und Modellunsicherheiten ist im Langzeitsicherheitsnachweis Rechnung zu tragen.

10.1 Zeitraum für den Langzeitsicherheitsnachweis

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

10.2 Langzeitsicherheitsanalysen

Die Langzeitsicherheitsanalyse muss die Szenarienanalyse und die Konsequenzanalyse zum Nachweis der Einhaltung des Schutzzieles umfassen.

Die Robustheit und das Isolationsvermögen des Endlagersystems muss dargestellt werden.

10.2.1 Szenarienanalyse

In der Szenarienanalyse werden die potenziellen Entwicklungen des Endlagersystems

identifiziert. In ihr müssen repräsentative Szenarien ermittelt werden, deren Konsequenzen die Konsequenzen aller in den Grenzen praktischer Vernunft denkbaren Szenarien abdecken. Die repräsentativen Szenarien werden eingeteilt in Szenarien, die menschliches Eindringen in das Endlager zum Gegenstand haben, und alle anderen Szenarien; letztere werden als "natürliche Entwicklungen" bezeichnet.

Zur Nachweisführung der Langzeitsicherheit sind die natürlichen Entwicklungen folgenden Szenarienklassen zuzuordnen:

- wahrscheinliche Szenarien: Szenarien, deren Eintreten im Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahren eine hohe Wahrscheinlichkeit zuzuordnen ist,*
- weniger wahrscheinliche Szenarien: Szenarien, deren Eintreten im Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahren eine Eintrittswahrscheinlichkeit kleiner 0,1 zuzuordnen ist,*
- nicht weiter zu betrachtende Szenarien: Szenarien, deren Auftreten eine sehr kleine Eintrittswahrscheinlichkeit zuzuordnen ist.*

Szenarien, die der Klasse der 'nicht weiter zu betrachtenden Szenarien' zuzuordnen sind, brauchen in den Langzeitsicherheitsanalysen nicht behandelt zu werden. Die maßgeblichen Gründe für ihre Einordnung in diese Klasse müssen in der Szenarienanalyse dargelegt werden.

Menschliches Eindringen in ein Endlager kann für eine Zeit, nach der eine Dokumentation über das Endlager als nicht mehr gesichert angesehen werden kann, nicht ausgeschlossen werden. Der für eine systematische Szenarienanalyse erforderlichen Prognose der menschlichen Entwicklung, der menschlichen Lebensweise und des menschlichen Verhaltens über die zu betrachtenden Zeiträume fehlt die wissenschaftlich fundierte Basis. Daher sollen in der Langzeitsicherheitsanalyse nur ausgewählte Szenarien für das direkte menschliche Eindringen betrachtet werden.

Szenarien für menschliches Eindringen sind beim Langzeitsicherheitsnachweis wie folgt zu behandeln:

- Szenarien, die das unbeabsichtigte Eindringen in ein Endlager beschreiben, werden zusammengefasst. Zur Behandlung in Langzeitsicherheitsanalysen sind Referenzszenarien heranzuziehen.*

- Szenarien, die das beabsichtigte Eindringen des Menschen in das Barrierensystem beschreiben, sowie kriegerische Einwirkungen bleiben außer Betracht. Diese Eingriffe werden in die Verantwortung der jeweils handelnden Gesellschaft gestellt.

Die Szenarienanalyse muss transparent und nachvollziehbar dokumentiert werden. Die Einzelschritte müssen dabei begründet und wesentliche Entscheidungen nachvollziehbar dargestellt werden.

10.2.2 Konsequenzenanalysen

Die Ermittlung der Konsequenzen durch den Austritt von Radionukliden aus dem Abfall in die Geosphäre und Biosphäre erfolgt für alle repräsentativen Szenarien.

Die Konsequenzenanalyse muss auf der Basis naturwissenschaftlicher Methoden durchgeführt werden. Es sind konzeptionelle Modelle zu entwickeln und in mathematische Rechenverfahren umzusetzen. Die in der Konsequenzenanalyse angewendeten Methoden und Rechenprogramme müssen in der Lage sein, die konzeptionellen Modelle des Endlagersystems und seiner Teilsysteme zu beschreiben. Sie müssen qualifiziert sein. Zur Behandlung der wesentlichen Datenunsicherheiten sind Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen durchzuführen.

10.2.3 Datenerhebung

Die zur Durchführung der Langzeitsicherheitsanalyse benötigten Daten müssen standortbezogen erhoben werden. Sie müssen - entsprechend der Standortentwicklung - eine angemessene Extrapolation in die ferne Zukunft erlauben.

10.2.4 Nachweisführung der Einhaltung des Schutzzieles

Zur Nachweisführung der Einhaltung des Schutzzieles, welches als Risikokriterium formuliert ist (Kap. 6.2.1), wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

- Als Maß der Konsequenz C_i des Szenariums S_i soll das radiologische Risiko für ein Individuum aus einer betroffenen Gruppe, einen schweren körperlichen Schaden zu

erleiden, verwendet werden: $C_i = d_i \gamma$, mit d_i als der in der Konsequenzenanalyse ermittelten Individualdosis und γ als dem Risikokonversionsfaktor ($5 \cdot 10^{-2} \text{ 1/Sv}$).

- Zur Ermittlung einer Bewertungsgröße soll von der Menge „aller“ Szenarien S zu einer Menge repräsentativer Szenarien $S_R \subset S$ übergegangen werden. Die Bewertungsgröße für das Risiko ist dann
$$R_R = \sum_{S_i \in S_R \subset S} p_i C_i.$$
- p_i ist die Gesamtwahrscheinlichkeit aus Eintritt und Ablauf eines Szenariums i und der Wahrscheinlichkeit für ein Individuum, aufgrund dieses Szenariums eine radiologische Belastung d_i zu erfahren. Die verwendete Eintrittswahrscheinlichkeit ist also die Wahrscheinlichkeit, dass das betrachtete Szenario zu irgendeinem Zeitpunkt eintritt, so dass im Bewertungszeitraum die Exposition irgendeiner Einzelperson aufgrund ihres Aufenthaltsortes und ihrer Verhaltensweise erfolgen kann. Die Gesamtwahrscheinlichkeit ist als integrale Größe über den Betrachtungszeitraum (Nachweiszeitraum) anzusehen.
- Die bei der Ermittlung bzw. Schätzung der drei Risikokomponenten Szenario S_i , Wahrscheinlichkeit p_i und Konsequenz C_i auftretenden Unsicherheiten sollen folgendermaßen behandelt werden:
 - Dem Problem der Szenarienvollständigkeit soll durch den Übergang zu repräsentativen Szenarien (s.o.) begegnet werden.
 - Bei der Bestimmung von Eintrittswahrscheinlichkeiten sollen obere, fundiert abgeleitete Schranken Verwendung finden.
 - Bei der Schätzung der Konsequenz sind probabilistische Methoden anzuwenden. In der Bewertungsgröße sind Vertrauensintervalle für die Perzentilen der Verteilung der C_i zu verwenden.

Für die Gesamtheit der repräsentativen Szenarien S_R , bestehend aus der Klasse der wahrscheinlichen Szenarien und der Klasse der weniger wahrscheinlichen Szenarien, gilt:

Wahrscheinliche Szenarien

Die in der Konsequenzenanalyse für die wahrscheinlichen Szenarien ermittelte Strah-

lenexposition für eine Einzelperson der Bevölkerung darf die effektive Dosis von 0,3 mSv im Kalenderjahr nicht übersteigen.

Das Schutzziel ist so gewählt, dass die zugelassene Strahlenexposition innerhalb der mittleren Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition in Deutschland (2,4 mSv pro Kalenderjahr) liegt. Dieses Schutzziel entspricht den Anforderungen der StrlSchV in § 47 wie auch der ICRP 81 (0,3 mSv pro Kalenderjahr effektive Dosis). Der für kerntechnische Anlagen nach den neuen EU-Grundnormen vorgesehene Grenzwert für die Bevölkerung von 1 mSv pro Kalenderjahr effektive Dosis wird unterschritten. Die Eintrittswahrscheinlichkeit für die wahrscheinlichen Szenarien wird gleich eins angenommen. Wird eine Person einer Individualdosis von 0,3 mSv im Kalenderjahr ausgesetzt, so entspricht dies einem Risiko von ca. 10^{-5} im Kalenderjahr, einen schweren körperlichen Schaden zu erleiden.

Weniger wahrscheinliche Szenarien

Das in der Konsequenzenanalyse für die Gesamtheit der weniger wahrscheinlichen Szenarien ermittelte Risiko $\sum p_j C_j$, einen schweren gesundheitlichen Schaden aus der Strahlenexposition zu erleiden, darf 10^{-5} im Kalenderjahr nicht übersteigen.

Wird der Nachweis für ein Szenarium stellvertretend für eine Gruppe von Szenarien geführt, so muss die für diese Gruppe insgesamt gültige Eintrittswahrscheinlichkeit zugrunde gelegt werden.

Für die Kriterien in beiden Szenarienklassen gilt darüber hinaus:

Sowohl für die wahrscheinlichen als auch für die weniger wahrscheinlichen Szenarien werden die Konsequenzen C_i unter expliziter Berücksichtigung von Datenunsicherheiten ermittelt. Als Konsequenz in diesem Sinne wird die in dieser Rechnung ermittelte obere Grenze eines 90%-Konfidenzintervalls für das 90-Perzentil der Dosis festgelegt.

Unbeabsichtigtes menschliches Eindringen

Bei der Planung und Auslegung des Endlagers ist die Möglichkeit unbeabsichtigten

menschlichen Eindringens in das Endlager zu berücksichtigen. Unter Berücksichtigung der Standortverhältnisse ist diese Möglichkeit zu analysieren und zu bewerten. Die ermittelten potenziellen radiologischen Auswirkungen sollen anhand der ICRP-Empfehlung 81 bewertet werden. Gegebenenfalls sind angemessene Maßnahmen vorzusehen, die derartige Eingriffsmöglichkeiten verringern oder ihre möglichen radiologischen Auswirkungen begrenzen. Bei dieser Bewertung sind auch die Anzahl der betroffenen Personen, das räumliche Ausmaß einer möglichen Kontamination und die Möglichkeit der Begrenzung von Auswirkungen sowie von Gegenmaßnahmen zu betrachten.

Bei der Planung des Endlagersystems werden ausgewählte Szenarien für menschliches Eindringen analysiert. Zur radiologischen Bewertung der analysierten Auswirkungen und zur Entscheidung über zu planende Gegenmaßnahmen können die Empfehlungen der ICRP zur Intervention zum Schutz vor radiologischen Belastungen herangezogen werden. Die ICRP empfiehlt als Schwellenwert zur Einleitung von Interventionen die potenzielle Belastung von 100 mSv pro Kalenderjahr. Bei Belastungen unterhalb 10 mSv pro Kalenderjahr ist eine Intervention nicht vorgesehen. Im Bereich zwischen 10 mSv und 100 mSv pro Kalenderjahr ist abzuwägen, ob eine Intervention geboten ist. Bei Interventionsentscheidungen sind auch die Anzahl der betroffenen Personen, das räumliche Ausmaß einer möglichen Kontamination und die Möglichkeit der Begrenzung von Auswirkungen sowie von Gegenmaßnahmen zu betrachten.

Zur Behandlung der Szenarien, die das unbeabsichtigte menschliche Eindringen in ein Endlager beschreiben, ist davon auszugehen, dass das Wissen über das Endlager bis zu 500 Jahre erhalten bleibt. Als Zeitpunkt für ein Eingriffsszenarium braucht daher kein früherer Zeitpunkt gewählt werden (Kap 8.9).

Gesetze und Empfehlungen

Bundesministerium des Innern (BMI)

Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk

GMBI. 1983, S. 220

Gemeinsame Stellungnahme der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) und der Strahlenschutzkommission (SSK), 30.06.1988

Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre

Gefahren (Atomgesetz - AtG) vom 23. Dezember 1959,

Neufassung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I. 1565), zuletzt geändert durch Gesetz vom 28.

Dezember 2000 (BGBl. I. S. 1960)

Gesetz zu dem Gemeinsamen Übereinkommen vom 5. September 1997 über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle

(Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung)

BGBl Teil II, Nr. 31, S. 1752, 1998

International Atomic Energy Agency (IAEA)

Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High Level Radioactive Wastes

Safety Series No. 99, Vienna 1989

International Atomic Energy Agency (IAEA)

Classification of Radioactive Waste

A Safety Guide

Safety Series No. 111 - G - 1.1, IAEA, Vienna, 1994

International Atomic Energy Agency (IAEA)

The Principles of Radioactive Waste Management

Safety Series No. 111 - F, IAEA, Vienna, 1995

International Atomic Energy Agency (IAEA)
Requirements for the safe management of radioactive waste
Proceedings of a seminar held in Vienna, 28 - 31 August 1995
IAEA-TECDOC - 853

International Commission of Radiological Protection (ICRP)
Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste
ICRP-Publication 46, July 1985

International Commission of Radiological Protection (ICRP)
Recommendations of the ICRP
Publication 60, 1991

International Commission of Radiological Protection (ICRP)
Recommendations of the ICRP
Publication 77, 1998

International Commission of Radiological Protection (ICRP)
Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid
Radioactive Waste
Publication 81
Annals of the ICRP, Vol. 28, No 4 1998

Kommission der Europäischen Gemeinschaften
Richtlinie 96/29/EURATOM des Rates vom 13. Mai 1996 zur Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlen
Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 159, 29. Juni 1996

OECD Nuclear Energy Agency (NEA)
Disposal of High-Level Radioactive Wastes
Radiation Protection and Safety Criteria
Proceedings of an NEA Workshop, Paris, 5 - 7 November 1991

OECD Nuclear Energy Agency (NEA)

Steering Committee for Nuclear Energy:

Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal

A Collective Opinion of the Radioactive Waste Management Committee OECD, Paris
1995

OECD Nuclear Energy Agency (NEA)

Geological Disposal of Radioactive Waste

Review of Developments in the Last Decade

OECD, Paris 1999

Strahlenschutzkommission (SSK)

Freigabe von Materialien, Gebäuden und Bodenflächen mit geringfügiger Radioaktivität
aus anzeige- oder genehmigungspflichtigem Umgang

Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Berichte der Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicherheit, Heft 16

Gustav Fischer Verlag Stuttgart; Jena; Lübeck; Ulm; 1998

Strahlenschutzverordnung (StrlSchV)

Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen

zuletzt geändert durch Medizinproduktegesetz vom 2. August 1994

(BGBl. I. S. 1963, 1981)

Strahlenschutzverordnung (StrlSchV)

Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen

in der Fassung der Bekanntmachung vom 20. Juli 2001

(BGBl. I. S. 1714, 2001)

Entwurf

**Präzisierung und Weiterentwicklung der
Sicherheitskriterien für die
Endlagerung radioaktiver Abfälle
in einem Bergwerk
(Synopsis)**

A. Kindt

B. Baltes

Einleitung

Im Jahre 1983 hat der Bundesminister des Inneren (BMI) nach Beratung durch die Reaktor-Sicherheitskommission und die Strahlenschutzkommission Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk veröffentlicht. Seither haben sich sowohl die Endlagerung radioaktiver Abfälle als auch die Beurteilung der Sicherheit eines Endlagers in Deutschland und international weiterentwickelt. Auf der Basis dieser Weiterentwicklungen wurden die Sicherheitskriterien von 1983 überarbeitet und fortgeschrieben.

Ausgehend von den internationalen Empfehlungen wurde die Aufgabe der Endlagerung konkretisiert. Es wurden Sicherheitsprinzipien für die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen formuliert.

Dem bei der Endlagerung verfolgten Prinzip des „Isolierens und Konzentrierens“ wird in einem eigenständigen Standortauswahlverfahren Rechnung getragen. Ausgehend von einer günstigen geologischen Gesamtsituation wird in einem schrittweise durchgeführten Auswahlverfahren der Standort gesucht, der die geforderte langzeitige Isolation der radioaktiven Abfälle von der Biosphäre bestmöglich gewährleistet.

Insbesondere die sich heute abzeichnenden nationalen und internationalen Anforderungen an den sicheren Betrieb und die Sicherheit in der Nachbetriebsphase unter Berücksichtigung des Standes von Wissenschaft und Technik sind Ausdruck für die Weiterentwicklung der Sicherheitskriterien. Z.T. haben diese Kriterien international schon Eingang in die Gesetzgebung und die Regelwerke gefunden.

Das Schutzziel für die Nachbetriebsphase beruht auf einem Risikokonzept, das auch international von einer Reihe von Ländern in Ansatz gebracht wird. Als Bewertungsgröße gilt die Dosis (für die wahrscheinlichen Ereignisse) respektive das Risiko, aufgrund einer erhaltenen Strahlenexposition, einen schweren körperlichen Schaden zu erleiden (für die weniger wahrscheinlichen Ereignisse).

Der unbeabsichtigte Eingriff des Menschen soll in Form glaubhafter Referenzszenarien Berücksichtigung finden. Schutzziel ist hier eine Begrenzung der Auswirkungen.

Analog zu den Sicherheitskriterien von 1983 gelten die radiologischen Schutzziele zeitlich unbegrenzt. Der Nachweis der Langzeitsicherheit wird jedoch auf einen Zeitraum begrenzt, in dem wissenschaftlich fundierte Prognosen über den Standort möglich sind.

Eine entscheidende Rolle kommt der geowissenschaftlichen und geotechnischen Langzeitprognose zu. Diese ist Voraussetzung für den Nachweis der Sicherheit in der Nachbetriebsphase.

Die im Einzelnen vorgenommenen Weiterentwicklungen gegenüber den Sicherheitskriterien von 1983 werden nachstehend in Form einer Synopse dargestellt.

Neu eingeführt wurden die Kapitel/Punkte:

- Definitionen
- Sicherheitsprinzipien für die Endlagerung
- Betriebsphase
- Qualitätssicherung
- Erstellung einer geotechnischen Langzeitprognose.

Gliederung/ Anforderung	BMI Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (Stand 1983)	Entwurf zur Präzisierung und Weiterentwicklung der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (Stand 2002)
1. Einführung	<p>Endlagerung in einem Bergwerk</p> <p>Geeignete geologische Formation</p> <p>Alle Kategorien radioaktiver Abfälle</p> <p>Rückholbarkeit nicht erforderlich</p> <p>Wartungsfreie, zeitlich unbefristete und sichere Beseitigung der radioaktiven Abfälle</p> <p>Keine Maßnahmen nach Verschluss</p> <p>Sicherheitsnachweis durch standortspezifische Sicherheitsanalysen</p> <p>Berücksichtigung des jeweiligen Standes von Wissenschaft und Technik</p>	<p>Differenzierter</p> <p>dito</p> <p>dito</p> <p>dito, einschließlich Rückstände aus der Urangewinnung, wenn diese zu Abfällen erklärt werden</p> <p>dito, unter Berufung auf das Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung, Kapitel 2</p> <p>dito</p> <p>dito</p> <p>dito, Nachweis der Sicherheit während des Betriebs und in der Nachbetriebsphase, Langzeitsicherheitsnachweis</p> <p>dito</p> <p>Ergänzend:</p> <p>Prinzip der Endlagerung „Konzentrieren und Isolieren“</p> <p>Prognosezeitraum: wissenschaftlich begründet</p>
2. Schutzziele	<p>Schutzziele werden vorgegeben durch</p> <p>AtG</p> <p>StrlSchV</p>	<p>Schutzziele werden vorgegeben durch</p> <p>AtG, StrlSchV</p> <p>Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Entsor-</p>

Gliederung/ Anforderung	BMI Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (Stand 1983)	Entwurf zur Präzisierung und Weiterentwicklung der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (Stand 2002)
	<p>Betrieb: Schutz von Mensch und Umwelt Optimierung des Strahlenschutzes</p> <p>Nachbetriebsphase: Schutzziel zeitlich unbegrenzt Einhaltung des Dosisgrenzwertes von § 45 (StrlSchV)</p>	<p>gung</p> <p>Betrieb: dito, Kapitel 6.1.1 dito, Kapitel 6.1.2</p> <p>Nachbetriebsphase: dito, Kapitel 6.2.1 Begrenzung des Risikos, einen schweren gesundheitlichen Schaden zu erleiden. Schutz der Umwelt, Kapitel 6.2.2 Optimierung des Strahlenschutzes, Kapitel 6.2.3</p>
3. Maßnahmen zur Verwirklichung der Schutzziele	<ul style="list-style-type: none"> – Standortauswahl – Mehrbarrierenkonzept – Anerkannte Regeln der Technik 	dito, z.T. spezifiziert: eigenständiges Standortauswahlverfahren (s.u.)
3.1 Standortauswahl		<p>Keine Konkretisierung</p> <p>Die Auswahl eines potenziellen Endlagerstandortes erfolgt unter Anwendung des qualifizierten Standortauswahlverfahrens, das derzeit vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) erarbeitet wird.</p>

Gliederung/ Anforderung	BMI Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (Stand 1983)	Entwurf zur Präzisierung und Weiterentwicklung der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (Stand 2002)
3.2 Mehrbarrierenkonzept		Teil des Sicherheitskonzepts, Kapitel 1 Definition des Mehrbarrierensystems, Kapitel 3 Forderung in den Planungsgrundsätzen, Kapitel 8.1
3.3 Anerkannte Regeln der Technik	Bei Errichtung, Betrieb und Stilllegung, Berücksichtigung des Standes von Wissenschaft und Technik	dito, Konkretisiert in den Planungsgrundsätzen, Kapitel 8.1
4. Standortanforderungen 4.1 Topographische Lage 4.2 Bevölkerungsdichte 4.3 Bodenschätze 4.4 Endlagerformation, Deckgebirge und Nebengestein 4.5 Tektonik 4.6 Hydrogeologische Verhältnisse	Detailliert	Nicht detailliert, weil Kriterien zur Standortauswahl durch den AkEnd formuliert werden
5. Voraussetzung für Errichtung und Betrieb eines Endlagers	<ul style="list-style-type: none"> – Einhaltung der Auslegungsdaten – Sicherheitsanalysen 	Formulierung von Planungsgrundsätzen, Kapitel 8.1

Gliederung/ Anforderung	BMI Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (Stand 1983)	Entwurf zur Präzisierung und Weiterentwicklung der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (Stand 2002)
5.1 Einhaltung der Auslegungsdaten		dito Ergänzend: Beherrschung der Gas - und Wärmeentwicklung, Kritikalitätssicherheit, Überwachungsmaßnahmen und Beweissicherungsmessungen nach Verschluss, Kapitel 8.3 bzw. 8.6
5.2 Sicherheitsanalysen	<p>Betrieb: Störfallszenarien, standortspezifische Sicherheitsanalysen</p> <p>Nachbetriebsphase: Sicherheitsanalysen</p>	<p>Betrieb: Differenzierter, in verschiedenen Kapiteln aufgeschlüsselt, Ergänzend: Sicherheitsprinzipien, Kapitel 5 Einwirkungen von innen bzw. von außen, Kapitel 9.7 bzw. 9.8</p> <p>Nachbetriebsphase: dito Ergänzend: Forderung des Langzeitsicherheitsnachweises, Kapitel 10 Zeitliche Begrenzung des Langzeitsicherheitsnachweises auf 1 Million Jahre, Kapitel 10.1</p>

Gliederung/ Anforderung	BMI Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (Stand 1983)	Entwurf zur Präzisierung und Weiterentwicklung der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (Stand 2002)
		<p>Langzeitsicherheitsanalysen, Kapitel 10.2</p> <p>Nachweisführung der Einhaltung des Schutzzieles mittels Langzeitsicherheitsanalysen bestehend aus Szenarien- und Konsequenzenanalysen</p> <p>Szenarienanalyse:</p> <p>Identifizierung der potenziellen Entwicklungen des Endlagersystems</p> <p>Unterscheidung zwischen der natürlichen Entwicklung des Endlagers und dem unbeabsichtigten menschlichen Eindringen beim Bewertungsmaßstab</p> <p>Konsequenzenanalyse:</p> <p>Ermittlung der Konsequenzen durch den Austritt von Radionukliden aus dem Endlager</p> <p>Vorgehensweise zur Nachweisführung der Einhaltung des Schutzzieles</p> <p>Bewertungsmaßstab für wahrscheinliche Szenarien: risikobasierte Dosis</p> <p>Bewertungsmaßstab für weniger wahrscheinliche Szenarien: Risiko</p>

Gliederung/ Anforderung	BMI Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (Stand 1983)	Entwurf zur Präzisierung und Weiterentwicklung der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (Stand 2002)
		Berücksichtigung von Datenunsicherheiten durch Schätzung des 90% Vertrauensintervalls für das 90- Perzentil der in der Konsequenzenanalyse ermittelten Individualdosis, Kapitel 10.2.4
6. Standorterkundung	<ul style="list-style-type: none"> – von über Tage – von unter Tage 	<p>Kürzer gefasst, Kapitel 7</p> <p>Ergänzend:</p> <p>Darlegung der sicherheitsrelevanten Standorteigenschaften</p> <p>In situ - Messungen</p> <p>Testplan für zusätzliche Untersuchungen zu wesentlichen Auslegungsparametern</p> <p>Neu:</p> <p>Standortcharakterisierung: Darlegung der betrieblichen Sicherheit und der Langzeitsicherheit</p> <p>Geowissenschaftliche Langzeitprognose</p>
6.1 Standorterkundung von über Tage		Kürzer gefasst, Kapitel 7
6.2 Standorterkundung von unter Tage		Kürzer gefasst, Kapitel 7

Gliederung/ Anforderung	BMI Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (Stand 1983)	Entwurf zur Präzisierung und Weiterentwicklung der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (Stand 2002)
7. Errichtung und Betrieb	<ul style="list-style-type: none"> – Schächte – Untertägige Hohlräume und Hohlraumssysteme – Bewetterung – Betriebliche Überwachung 	Differenzierter Planung und Errichtung, Kapitel 8 Planungsgrundsätze, Kapitel 8.1 Eigenständige Anforderungen an den Betrieb, Kapitel 9 Konkretisierung in einer Leitlinie
7.1 Schächte		dito, Kapitel 8.4.1
7.2 Untertägige Hohlräume und Hohlraumssysteme		dito, in verschiedenen Kapiteln aufgeschlüsselt (Kapitel 8.4.2, 8.5)
7.3 Bewetterung		dito, Kapitel 8.5
7.4 Betriebliche Überwachung		dito, Kapitel 8.6 Gezielt Messprogramme
8. Abfälle	Detaillierter	Insgesamt komprimiert, Kapitel 8.7 Zusätzlich Überprüfung der Anforderungen durch Produktkontrolle Spezifikation der Abfälle: feste oder verfestigte Form

Gliederung/ Anforderung	BMI Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (Stand 1983)	Entwurf zur Präzisierung und Weiterentwicklung der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (Stand 2002)
9. Stilllegung		dito, Kapitel 8.8
10. Nachbetriebsphase	<ul style="list-style-type: none"> – Überwachung der Umwelt – Dokumentation und Kennzeichnung 	Definition, Kapitel.3 Neu: Nachbetriebsphase, Kapitel 10 Nachweis der Langzeitsicherheit: umfassende Sicherheitsbewertung des Endlagersystems (s. Gliederung 5.2) Konkretisierung in einer Leitlinie
10.1 Überwachung der Umwelt		dito, Kapitel 8.9 Safeguards-Anforderungen bleiben unberührt
10.2 Dokumentation und Kennzeichnung		dito, Kapitel 8.9 Zusätzlich Sicherstellung des Erhalts der Information über 500 Jahre