



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit

Bonn, 29. Juli 2008

# **Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle**

- Entwurf -

## **Inhaltsverzeichnis**

1. Zielsetzung .....	3
2. Geltungsbereich.....	3
3. Begriffsdefinitionen und -erläuterungen .....	4
4. Zweckbestimmung und allgemeine Schutzziele .....	8
5. Sicherheitsprinzipien.....	8
6. Schrittweise Optimierung.....	9
7. Schutzkriterien .....	12
8. Sicherheitsnachweise .....	14
9. Endlagerauslegung .....	20
<u>Anhang 1</u> .....	24
<u>Anhang 2</u> .....	25

## 1. Zielsetzung

Die Sicherheitsanforderungen legen fest, welches Sicherheitsniveau zur Erfüllung der atomrechtlichen Anforderungen ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen nachweislich einzuhalten hat. Sie gelten für einen Standort, bei dem sich der für die Einrichtung von Anlagen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle zuständige Bund für die Durchführung eines Planfeststellungsverfahrens entschieden hat. Bei der Festlegung dieses Endlagerstandortes einzuhaltende Anforderungen sind in dieser Unterlage nur enthalten, falls auch nach der Standortfestlegung im Rahmen der Optimierung noch Einfluss auf die Erfüllung dieser Anforderungen genommen werden kann.

Die Sicherheitsanforderungen enthalten insbesondere folgende Punkte:

- Sicherheitsprinzipien
- Optimierung
- Schutzkriterien
- Sicherheitsnachweise
- Endlagerauslegung

Die Sicherheitsanforderungen beschränken sich auf sicherheitstechnisch relevante technische und administrative Aspekte mit Ausnahme der gemäß § 7 Abs. 2 Nr. 5 des Atomgesetzes zum Schutz gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter zu treffenden Maßnahmen. Anforderungen aus anderen Rechtsgebieten werden durch diese Anforderungen nicht festgelegt. Ebenfalls nicht durch diese Unterlage festgelegt werden Anforderungen an die Information und Beteiligung der Öffentlichkeit, die maßgeblich dazu beitragen können, dass die in der Nähe des Endlagers wohnenden Menschen der Sicherheit des Endlagers vertrauen und seine Einrichtung akzeptieren.

*Es wird auch international anerkannt, dass insbesondere sozialpolitische Faktoren einen wesentlichen Einfluss auf die Akzeptanz eines Endlagers haben, die beispielsweise davon abhängen kann, in welchem Maße die Öffentlichkeit in die Realisierung des Endlagers eingebunden wird, ob Nachteile für die in der Nähe des Endlagers lebenden Menschen vermieden bzw. ausgeglichen werden können und ob die für die Errichtung des Endlagers notwendigen Rechte im Besitz der öffentlichen Hand oder in Privatbesitz sind. Zur Einbindung der Öffentlichkeit sehen die derzeitigen Regelungen vor, dass jeder, dessen Belange durch die Errichtung des Endlagers berührt werden, im Rahmen des Anhörungsverfahrens nach § 73 VVerfG Einwendungen erheben kann, die nachfolgend im Erörterungstermin behandelt werden.*

## 2. Geltungsbereich

Diese Sicherheitsanforderungen gelten für das Bundesamt für Strahlenschutz als Antragsteller und Betreiber eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle sowie für die Planfeststellungsbehörde, bei der das BfS die Durchführung des Planfeststellungsverfahrens für ein derartiges Endlager beantragt und die bei Erfüllung der hier genannten Voraussetzungen die Genehmigung für Errichtung, Einlagerungsbetrieb und Stilllegung eines solchen Endlagers erteilt. Soweit der Bund die Wahrnehmung seiner Aufgaben mit den dafür erforderlichen hoheitlichen Befugnissen nach § 9a Abs. 3 AtG ganz oder teilweise auf Dritte übertragen hat, gelten sie für diesen Dritten in dem Umfang, in dem der Bund ihm Aufgaben übertragen hat. Insbesondere gelten sie für die Planung, Erkundung, Errichtung, den Einlagerungsbetrieb und die Stilllegung eines derartigen Endlagers und betreffen auch seine Beaufsichtigung nach Stilllegung.

*Abschließende Definition erfolgt durch Rechtsreferat. Altanlagen wie z. B. die Asse oder Morsleben sind ausdrücklich auszunehmen. Die Regelung betrifft radioaktive Abfälle, die nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können.*

### **3. Begriffsdefinitionen und -erläuterungen**

*Vorbemerkung: Die nachfolgenden, auf die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle bezogenen Definitionen und Erläuterungen wesentlicher Begriffe erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Für weitere Definitionen und Erläuterungen wird auf das Atomgesetz mit Verordnungen und auf die Endlagerungsbedingungen Konrad des BfS verwiesen.*

#### Abfall, wärmeentwickelnder radioaktiver

Wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle sind radioaktive Abfälle, deren Wärmeentwicklung nicht vernachlässigbar ist, so dass sie nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können. Sie sind durch hohe Aktivitätskonzentrationen und damit einhergehende hohe Zerfallswärmeleistungen gekennzeichnet. Sie stellen besondere Anforderungen an ein Endlager (Endlagerung in tiefen geologischen Formationen, Verwendung von abgeschirmten anlagen-internen Transportbehältern, Anwendung spezieller Einlagerungstechniken, thermische Auslegung des Endlagerbergwerks). Dazu gehören insbesondere Abfälle in Form von bestrahlten Brennelementen sowie ggf. gemeinsam mit Feedklärschlämmen verglaste Spaltproduktkonzentrate und hochdruckverpresste Hülsen und Strukturteile aus der Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente. Sie sind gemäß § 3 Abs. 2 Satz 1 StrlSchV radioaktive Stoffe im Sinne des § 2 Abs. 1 des Atomgesetzes, die nach § 9a des Atomgesetzes als radioaktive Abfälle geordnet beseitigt werden müssen.

#### Barriere

Als Barriere wird eine natürliche oder technische Komponente des Endlagersystems bezeichnet, die den Transport von Radionukliden oder anderen Stoffen in die Biosphäre ganz oder teilweise verhindert bzw. verzögert.

*Es wird zwischen technischen, geologischen und geotechnischen Barrieren unterschieden. Derartige Barrieren sind beispielsweise die Abfallmatrizen, die Abfallbehälter, die Kammer- und Schachtverschlussbauwerke, der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) und die diesen ewG umgebenden oder überlagernden geologischen Schichten. Elemente des Endlagersystems, die aus den Abfällen freigesetzte Stoffe lediglich verteilen oder verdünnen, werden nicht als Barrieren bezeichnet. Sie können jedoch im Rahmen der Sicherheitsanalysen bedeutsame Sicherheitsfunktionen übernehmen.*

#### Errichtungs- und Betriebsphase

Die Errichtungs- und Betriebsphase umfasst die mit dem Bau von Schächten und Infrastruktureinrichtungen beginnende Errichtung des Endlagers, die Einlagerung der Abfälle in das Endlager, seine Stilllegung einschließlich Verschluss und eine eventuell vom Betreiber des Endlagers zu verantwortende Nachsorgephase.

#### Deckgebirge

Als Deckgebirge werden die den einschlusswirksamen Gebirgsbereich überlagernden geologischen Schichten bezeichnet.

#### Einschluss

Als Einschluss wird eine Sicherheitsfunktion des Endlagersystems bezeichnet, die dadurch charakterisiert ist, dass die radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich so einge-

geschlossen sind, dass sie im wesentlichen am Einlagerungsort verbleiben und allenfalls geringe definierte Stoffmengen diesen Gebirgsbereich verlassen. Diese Stoffmengen dürfen nicht zu unzulässigen Risiken für die vom Endlager betroffenen Menschen führen.

#### Einschlusswirksamer Gebirgsbereich

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) ist der Teil des Endlagersystems, der im Zusammenwirken mit den geotechnischen Verschlüssen (Schachtverschlüsse, Kammerabschlussbauwerke, Dammbauwerke, Versatz, ... ) den Einschluss der Abfälle sicherstellt.

#### Endlagerbergwerk

Das Endlagerbergwerk besteht aus unterschiedlichen Komponenten wie Schächten, Strecken, Kammern mit den darin eingelagerten Abfallgebänden, Versatz und Dichtelementen. Mit Ausnahme der Zugänge und ggf. aus betrieblichen Gründen aufgefahrener Strecken oder Kammern liegt das Endlagerbergwerk im einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Es wird nach Beendigung der Einlagerung im Rahmen der Stilllegung sukzessive durch Verfüllung und Verschluss der Zugänge in einen wartungsfreien Zustand überführt.

#### Endlagersystem

Das Endlagersystem besteht aus dem Endlagerbergwerk, dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich und aus den diesen Gebirgsbereich umgebenden oder überlagernden geologischen Schichten bis zur Erdoberfläche, soweit sie für den Sicherheitsnachweis betrachtet werden müssen.

#### Integrität

Zur geologischen Bewertung des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ewG eines Endlagers wird der Begriff Integrität verwendet. Darunter wird die Fähigkeit und Wirksamkeit des ewG verstanden, das Eindringen von Fluiden aus dem Deck- und Nebengebirge in das Endlagerbergwerk sowie gegebenenfalls das Austreten von Fluiden und Gasen aus dem Endlagerbergwerk dauerhaft zu verhindern oder zumindest stark zu behindern.

#### Kritikalität

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

#### Langzeitsicherheit

Die Langzeitsicherheit des Endlagers ist gegeben, wenn innerhalb des vorgegebenen Nachweiszeitraums die Sicherheitsprinzipien, Schutzkriterien und Prüfwerte nachsorgefrei eingehalten werden.

#### Langzeitsicherheitsanalyse

Als Langzeitsicherheitsanalyse wird die standortspezifische Analyse des Einschlussvermögens des Endlagersystems bezeichnet. Sie umfasst die Entwicklung konzeptioneller Modelle, die Szenarienentwicklung, die Konsequenzenanalyse sowie den Vergleich der Ergebnisse mit vorgegebenen Sicherheitsprinzipien, Schutzkriterien und sonstigen Nachweisanforderungen. Sie ist Bestandteil des Langzeitsicherheitsnachweises.

#### Nachweiszeitraum, vorgegebener

Der vorgegebene Nachweiszeitraum ist der regulatorisch festgelegte Zeitraum, für den die Langzeitsicherheit nachzuweisen ist.

*International bestehen keine einheitlichen Vorgaben, für welchen Zeitraum die Langzeitsicherheit von Endlagern für hochaktive Abfälle nachzuweisen ist. Diesbezügliche Vorgaben*

*müssen insbesondere die jeweiligen länderspezifischen geologischen Gegebenheiten berücksichtigen. Für Deutschland wird davon ausgegangen, dass an geeigneten Standorten die Langzeitsicherheit für 1 Million Jahre nachgewiesen werden kann.*

### Optimierung

Als Optimierung wird der Prozess bezeichnet, der darauf abzielt, die von den endgelagerten Abfällen ausgehenden Risiken unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls so gering wie vernünftigerweise möglich zu halten.

### Langzeitprognose

Als Prognose wird im Allgemeinen die Voraussage von zukünftigen Entwicklungen mit Hilfe eines auf Erfahrungen oder Berechnungen beruhenden Wahrscheinlichkeitsschlusses bezeichnet. Die Langzeitprognose ist die wissenschaftlich begründete Herleitung der möglichen Entwicklungen des Endlagersystems mit seinen für die Sicherheit relevanten Komponenten und ihrer jeweiligen Wahrscheinlichkeit.

### Prüfwert

Der Sicherheitsnachweis ist über die Feststellung, Berechnung, Abschätzung oder Messung definierter Eigenschaften zu führen. Für diese Eigenschaften werden hier teilweise einzuhaltende Werte – so genannte Prüfwerte – vorgegeben (z. B. die Risiko-Indikatoren in Abschnitt 7. oder die Kriterien für die Bewertung der Integrität des ewG in Anhang 2) oder sind im Rahmen der Sicherheitsnachweise aus diesen Sicherheitsanforderungen abzuleiten. Falls alle geforderten Eigenschaften gegeben sind und falls alle Prüfwerte mit hoher Wahrscheinlichkeit eingehalten werden, ist in der Sicherheitsbewertung davon auszugehen, dass die Schutzziele erreicht und die Schutzkriterien eingehalten werden.

### Risiko

Das Glossar der Internationalen Atomenergieorganisation IAEO für den Bereich kerntechnische Sicherheit und Strahlenschutz nennt als eine mögliche Definition für den Begriff Risiko: Eine vielparametrische Größe, die ein Maß für zufällig oder kausal bedingte, tatsächliche oder mögliche Gefahren darstellt, die zu einer tatsächlichen oder möglichen Gefährdung oder Schädigung der Gesundheit führen. (Risk: A multiattribute quantity expressing hazard, danger or chance of harmful or injurious consequences associated with actual or potential exposures.) Als Risiko-Indikator wird hier die Wahrscheinlichkeit verwendet, dass eine in der Nähe des Endlagers lebende Person im Verlauf ihres Lebens einen schwerwiegenden Gesundheitsschaden erleidet, der durch aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich des Endlagers freigesetzte radioaktive Stoffe verursacht wird.

*Als Risiko-Maß wird häufig der erwartete Verlust, d. h. die Summe über die Höhe möglicher Schäden, multipliziert mit den jeweiligen Wahrscheinlichkeiten ihres Eintretens verwendet. Eine derartige quantitative Beschreibung der vom Endlager insgesamt ausgehenden Risiken ist nur eingeschränkt möglich.*

### Robustheit

Unter Robustheit wird hier sowohl die Robustheit des Endlagersystems, d. h. die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen, als auch die Robustheit der Ergebnisse der Sicherheitsanalyse gegenüber Abweichungen von den zugrunde gelegten Annahmen verstanden.

### Sicherheit

Der Begriff Sicherheit wird im technischen Sinn verwendet. Das Endlager ist technisch ausreichend sicher, wenn die von den endgelagerten Abfällen für Mensch und Umwelt ausgehenden Risiken geringer als die zulässigen Risiken sind.

#### Sicherheitsfunktion

Eine Sicherheitsfunktion ist eine Eigenschaft oder ein im Endlagersystem ablaufender Prozess, die bzw. der in einem sicherheitsbezogenen System oder Teilsystem oder bei einer Einzelkomponente die Erfüllung der sicherheitsrelevanten Anforderungen gewährleistet. Durch das Zusammenwirken solcher Funktionen wird die Erfüllung aller sicherheitstechnischen Anforderungen sowohl in der Betriebsphase als auch in der Phase nach Stilllegung des Endlagers gewährleistet.

#### Sicherheitsnachweis

Der Sicherheitsnachweis umfasst Daten, Maßnahmen, Analysen und Argumente, die die Erfüllung dieser Sicherheitsanforderungen und damit die Sicherheit des Endlagers aufzeigen, sowie ihre Prüfung und Bewertung. Ein umfassender Sicherheitsnachweis (Safety Case) entsteht durch die Zusammenführung aller genannten Punkte und kann mit einem dem jeweiligen Kenntnisstand entsprechenden Tiefgang für verschiedene Phasen der Endlagerung geführt werden. Es wird zwischen Sicherheitsnachweisen für die Betriebsphase und für die Phase nach Stilllegung des Endlagers unterschieden.

#### Stilllegung

Die Stilllegung umfasst alle nach Einstellung des Einlagerungsbetriebs getroffenen Maßnahmen einschließlich Verschluss des Endlagers zur Herstellung eines wartungsfreien Zustandes, der die Langzeitsicherheit des Endlagers gewährleistet.

#### Szenarium

Ein Szenarium (Plural: Szenarien) beschreibt eine von den derzeitigen Standortgegebenheiten ausgehende und aufgrund geowissenschaftlicher oder sonstiger Überlegungen mehr oder weniger wahrscheinliche Entwicklung des Endlagersystems mit seinen sicherheitsrelevanten Eigenschaften nach der Stilllegung des Endlagers. Diese Entwicklung wird durch das Vorliegen von Sachverhalten, das Eintreten von künftigen Ereignissen und den Ablauf von Prozessen bestimmt. Jedes Szenarium ist durch eine Eintrittswahrscheinlichkeit gekennzeichnet, wobei diese allerdings häufig nicht anhand statistischer Daten berechnet sondern lediglich, beispielsweise anhand von Analogiebetrachtungen, abgeschätzt werden kann.

#### Verfüllung

Mit Verfüllung wird das Einbringen von Versatzmaterial in die Grubenbaue zur Verringerung des verbleibenden Hohlraumvolumens, zur Erhöhung der Stabilität des Grubengebäudes und zur Gewährleistung der Funktionstüchtigkeit der geologischen und geotechnischen Barrieren des Endlagers bezeichnet.

#### Verschluss

Als Verschluss wird sowohl der Verschluss der Einlagerungsbereiche durch firstbündige Verfüllung ausgewählter Strecken und Grubenbaue als auch der Verschluss der Schächte des Endlagerbergwerks bezeichnet.

#### Wirtsgestein

Das Wirtsgestein ist die Gesteinsformation, in die die wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle eingelagert werden.

## 4. Zweckbestimmung und allgemeine Schutzziele

Diese Sicherheitsanforderungen haben den Zweck, Grundsätze und Anforderungen für Vorsorge- und Schutzmaßnahmen zum Schutz des Menschen und der Umwelt vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung zu regeln, die bei der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen anzuwenden sind. Diese Endlagerung verfolgt zwei wesentliche allgemeine Schutzziele:

- 4.1 Dauerhafter Schutz von Mensch und Umwelt vor der ionisierenden Strahlung und sonstiger schädlicher Wirkungen dieser Abfälle
- 4.2 Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen

Dabei wird der dauerhafte Schutz von Mensch und Umwelt vor den sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle als gegeben angesehen, wenn für die aus dem Endlager abgeleiteten sonstigen Stoffmengen die aus dem Wasser- und Bodenrecht resultierenden Anforderungen erfüllt werden. Unzumutbare Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen werden dadurch vermieden, dass bei der geologischen Endlagerung längerfristig Kontroll- oder Wartungsmaßnahmen entfallen können.

## 5. Sicherheitsprinzipien

Damit der Zweck dieser Sicherheitsanforderungen und die genannten allgemeinen Schutzziele erreicht werden, sind folgende Prinzipien zu beachten:

- 5.1 Die Endlagerung muss sicherstellen, dass Freisetzungen von Schadstoffen aus dem Endlager die für den Menschen aufgrund der Strahlenexposition und aufgrund sonstiger Auswirkungen resultierenden Risiken nur unwesentlich gegenüber natürlich bedingten Risiken erhöhen und dass diese Risiken auch langfristig das heute akzeptierte Maß nicht übersteigen.

*Nachfolgend wird für die in den radioaktiven Abfällen enthaltenen Radionuklide festgelegt, dass die aus ihrer etwaigen Freisetzung resultierenden Risiken innerhalb eines zeitlich beschränkten Nachweiszeitraums Schutzkriterien einhalten, so dass sich die natürlichen radiologischen Risiken für den Menschen in diesem Zeitraum nachweislich nur unwesentlich erhöhen. Entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik wird davon ausgegangen, dass die Ermittlung radiologischer Risiken jenseits dieses Nachweiszeitraums mit so hohen Unsicherheiten behaftet ist, dass Forderungen nach einem rechnerischen Nachweis der Einhaltung dieser Schutzkriterien nicht sinnvoll sind.*

- 5.2 Die Endlagerung darf die Artenvielfalt nicht gefährden und die Nutzung natürlicher Ressourcen nicht unnötig einschränken.

*Wenn der Mensch als Individuum vor ionisierender Strahlung geschützt ist und die aus dem Endlager freigesetzten sonstigen Stoffmengen die gemäß Wasser- und Bodenrecht zulässigen Werte einhalten, wird davon ausgegangen, dass auch terrestrische Ökosysteme sowie andere Spezies in ihrer Art geschützt werden. Die Einhaltung von Risikogrenzwerten für andere Lebewesen, z. B. für im Endlagerbergwerk oder in seiner Nähe lebende Mikroorganismen, wird nicht gefordert. Wissenschaftlich begründete Modelle zur Bewertung der Auswirkungen auf Flora und Fau-*

*na sind für Nachweiszeiträume in der Größenordnung von 1 Million Jahren nicht verfügbar. Bei der Standortauswahl und bei der Auslegung des Endlagers muss darauf geachtet werden, dass die Nutzung natürlicher Ressourcen durch nachfolgende Generationen so wenig wie vernünftigerweise möglich eingeschränkt wird. Diesem Gesichtspunkt kann insbesondere dadurch Rechnung getragen werden, dass die Abmessungen des für den geologischen Langzeitsicherheitsnachweis festzulegenden einschlusswirksamen Gebirgsbereichs so klein wie möglich gewählt werden.*

- 5.3 Die Auswirkungen der Endlagerung auf Mensch und Umwelt dürfen außerhalb der Grenzen Deutschlands nicht größer sein als innerhalb Deutschlands zulässig.

*Dieses in erster Linie bei grenznahen Standorten bedeutsame Prinzip ist nachweislich einzuhalten. Gemäß Artikel 37 des EURATOM-Vertrages ist jeder Mitgliedsstaat der EU verpflichtet, der Kommission Angaben über jeden Plan zur Ableitung radioaktiver Stoffe zu übermitteln; aufgrund dieser Angaben soll festgestellt werden, ob die Durchführung dieses Plans eine radioaktive Verseuchung des Wassers, des Bodens oder des Luftraums eines anderen Mitgliedsstaates verursachen kann. Vorgaben zur grenzüberschreitenden Behördenbeteiligung bei der Prüfung der Umweltauswirkungen enthält § 8 UVPG.*

- 5.4 Die Langzeitsicherheit des Endlagers darf nicht auf aktiven Maßnahmen zur Überwachung und Wartung beruhen. Davon unberührt ist eine Phase von mindestens 500 Jahren nach der Stilllegung, während der nach heutiger Einschätzung von den zuständigen Stellen sichergestellt werden kann, dass keine den dauerhaften Einschluss der Abfälle gefährdenden menschlichen Aktivitäten im Bereich des Endlagers durchgeführt werden.

*Für die ersten 500 Jahre nach Stilllegung des Endlagers ist zu gewährleisten, dass die Information über das Endlager zur Kenntnis der beispielsweise für Tiefbauvorhaben, den Bau von Tiefbrunnen oder der für den Bergbau zuständigen Stellen gelangt und erhalten bleibt. Diese Stellen haben dafür Sorge zu tragen, dass keine den dauerhaften Einschluss der Abfälle gefährdenden Maßnahmen im Bereich des Endlagers durchgeführt werden. Auch über diesen Gewährleistungszeitraum hinausgehend ist nach Möglichkeit für einen dauerhaften Wissenserhalt zu sorgen.*

## **6. Schrittweise Optimierung**

Um die genannten Ziele und insbesondere das in Punkt 5.1 genannte Sicherheitsprinzip zu erfüllen, ist für alle Phasen der Endlagerung unter Beachtung der Verhältnismäßigkeit der Maßnahmen ein schrittweiser Optimierungsprozess durchzuführen.

*Zeitlich werden die Phasen Standortentscheidung, Planung, Erkundung (durch den Betreiber), Planfeststellung, Errichtung, Einlagerungsbetrieb, Stilllegung sowie der Zeitraum nach Stilllegung unterschieden. International ist für den zuletzt genannten Zeitraum der Begriff „post-closure period“ üblich. In Deutschland wird häufig der Begriff „Nachbetriebsphase“ verwendet, obgleich streng genommen lediglich der aktive Betrieb der Anlage beendet wird. Eine zeitlich scharfe Abgrenzung der genannten Phasen, insbesondere der Phasen Planung, Erkundung und Errichtung, ist nicht möglich. So setzt z. B. die untertägige Erkundung das Abteufen von Schächten und den Bau von Infrastruktureinrichtungen voraus, die als Bestandteil der Errichtung eines Endlagers angesehen werden können. Mit der vom Antragsteller zu treffenden Entscheidung zur Einleitung des Planfeststellungsverfahrens nach § 9b AtG*

*entscheidet sich dieser unter Berücksichtigung von Art und Menge der endzulagernden radioaktiven Abfälle und der geplanten technischen Auslegung (Design) des Endlagers für einen Standort. Der Planfeststellungsbeschluss bestätigt, dass dieser Standort die Anforderungen der nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderlichen Vorsorge erfüllt und legt abschließend die Art und Menge der einlagerbaren Abfälle sowie die technische Auslegung des Endlagers fest.*

- 6.1 Durch den schrittweisen Optimierungsprozess ist sicherzustellen, dass die mit der Endlagerung verbundenen Risiken so gering wie vernünftigerweise möglich sind. Hierbei ist das Hauptaugenmerk auf die Zuverlässigkeit der Einhaltung der in Abschnitt 7 definierten Schutzkriterien zu legen.

*Im Sinne eines nachhaltigen Schutzes von Mensch und Umwelt gibt es keine Rechtfertigung für vermeidbare Verschmutzungen der Umwelt und damit einhergehende Belastungen des Menschen. Deshalb sind Ereignisse oder Entwicklungen, die zu einer unzulässigen Strahlenexposition oder Kontamination mit grundwasser- oder bodenrelevanten Stoffen führen können, im Optimierungsprozess zu berücksichtigen. Dort, wo verlässliche quantitative Aussagen zu Strahlenexpositionen oder Kontaminationen gemacht werden können, sind diese in den Optimierungsprozess einzubeziehen und unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls auch unterhalb von Begrenzungen so gering wie vernünftigerweise möglich zu halten.*

*Die Optimierung selbst erfordert, dass in den einzelnen Schritten nach Lösungen gesucht wird, die zu möglichst geringen nachteiligen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt, zu möglichst geringen Verpflichtungen und Einschränkungen für zukünftige Generationen und zu möglichst geringen nachteiligen sozioökonomischen Auswirkungen führen, soweit diese aus heutiger Sicht einschätzbar sind. Insbesondere muss Wert auf die Anwendung dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechender Erkenntnisse und Methoden gelegt werden, um eine möglichst hohe Zuverlässigkeit des Endlagerbetriebs und Belastbarkeit seiner Sicherheitsbewertung zu erzielen. Das schrittweise Vorgehen führt dazu, dass die in den einzelnen Verfahrensschritten vorzunehmende Optimierung dokumentiert und bewertet wird und dass Fehleinschätzungen möglichst frühzeitig erkannt und korrigiert werden können. Der jeweilige Optimierungsschritt ist abgeschlossen, wenn ein positives Gesamturteil der Planfeststellungs- bzw. Aufsichtsbehörde vorliegt.*

- 6.2 Vor allen wesentlichen Entscheidungsschritten sind Sicherheitsnachweise durchzuführen und für die Schritte b) und c) der Genehmigungsbehörde vorzulegen.
- a) die Standortfestlegung durch den Antragsteller,
  - b) die erste Teilplanfeststellung mit Genehmigung zum Abteufen der Schächte und zum Bau von Infrastruktureinrichtungen zwecks Erkundung,
  - c) die zweite Teilplanfeststellung mit Genehmigung zur restlichen Errichtung des Endlagers, zur Aufnahme des Einlagerungsbetriebs und zur Stilllegung des Endlagers sowie
  - d) die tatsächliche Stilllegung des Endlagers.

Die Standortfestlegung a) erfolgt durch den gemäß § 9a Abs. 3 für die Einrichtung von Anlagen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle zuständigen Bund und umfasst insbesondere die vorläufige Festlegung der technischen Auslegung des Endlagers einschließlich seiner geplanten Betriebsweise. Die Planfeststellungsbehörde entscheidet zu den Punkten b) und c) anhand der vom Antragsteller vorgelegten Un-

terlagen, ob unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung des Grundsatzes der Verhältnismäßigkeit alles getan wurde, um den Schutz von Mensch und Umwelt zu optimieren. Der Tiefgang der Analysen und Nachweise hat sich nach der Bedeutung des Entscheidungsschrittes im Planfeststellungsverfahren zu richten. Die Planfeststellungsbehörde legt fest, ob ggf. weitere Optimierungsschritte durchzuführen sind.

*Das Verfahren zu a) wird unter Punkt 6.3 beschrieben. Die zu b) und c) vorgelegten Unterlagen sind von der zuständigen Planfeststellungsbehörde zu prüfen und zu bewerten. Insbesondere ist zu überprüfen, ob den Grundsätzen der bestmöglichen Schadensvorsorge unter Einsatz der besten verfügbaren Techniken gefolgt wurde. Das schrittweise Vorgehen lehnt sich an das Verfahren der Teilgenehmigung für die in § 7 Abs. 1 und 5 des Atomgesetzes genannten Anlagen an, das in § 18 AtVfV geregelt wird. Bei der Endlagerung ist dieses Vorgehen insbesondere wegen der langen Dauer des Planfeststellungsverfahrens angebracht. Der zweite Teilplanfeststellungsbeschluss erfolgt vor der endgültigen Errichtung des Endlagers und bestätigt, dass die Genehmigungsvoraussetzungen für die Einlagerung der radioaktiven Abfälle und die Stilllegung des Endlagers erfüllt sind. Für die Erteilung des zweiten Teilplanfeststellungsbeschlusses ist vom Antragsteller insbesondere nachzuweisen, dass die im Sicherheitsnachweis an die Stilllegung gestellten Anforderungen (z. B. hinsichtlich der Funktionstüchtigkeit der geotechnischen Barrieren) nach derzeitigem Stand von Wissenschaft und Technik erfüllt werden können. Diese Planungen zur Stilllegung sind vor der tatsächlichen Stilllegung vom Antragsteller dahingehend zu überprüfen, ob aufgrund der Fortentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik davon auszugehen ist, dass Änderungen des Stilllegungskonzepts zu einer Verringerung der vom Endlager ausgehenden Risiken führen würden. Sollte dies der Fall sein, ist vom Antragsteller bei der Planfeststellungsbehörde eine Änderungsge-nehmigung zur Stilllegung zu beantragen. Die Sicherheitsnachweise zu den übrigen Entscheidungs- bzw. Optimierungsschritten werden der Planfeststellungs- bzw. Aufsichtsbehörde vorgelegt, um rechtzeitig erkennen und gegebenenfalls eingreifen zu können, falls wesentliche Optimierungen nicht oder nur unzureichend durchgeführt wurden. Der Planfeststellungsbeschluss als solcher wird nicht in Frage gestellt. Eine Besonderheit der Endlagerung ist, dass für die Errichtung eines Endlagers der Bau von Schächten und maßgeblichen Infrastruktureinrichtungen erforderlich ist, bevor sämtliche für die Aufnahme des Einlagerungsbetriebs und die Stilllegung erforderlichen Sicherheitsnachweise vorliegen.*

- 6.3 Im Rahmen der Standortfestlegung ist insbesondere die Wahl des Standortes zu begründen. Basierend auf dem allgemeinen Kenntnisstand über die geologischen Verhältnisse in Deutschland und unter Berücksichtigung der auch in anderen Ländern entwickelten Endlagerkonzepte legt der Antragsteller dar, dass der Standort weder hinsichtlich der Robustheit seiner geologischen Barrieren, des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, noch hinsichtlich der Möglichkeiten, die Sicherheitsanforderungen mit technischen Maßnahmen zu erfüllen, signifikante Nachteile aufweist. Es ist vom Antragsteller auch darzulegen, in welchem Umfang durch die Standortfestlegung und durch die Endlagerauslegung heute absehbare Möglichkeiten zur Verminderung der Wahrscheinlichkeit für unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich des Endlagers und seiner Auswirkungen genutzt wurden und dass diese Auslegung die Langzeitsicherheit des durch menschliches Eindringen ungestörten Endlagersystems nicht beeinträchtigt.

*Nicht in diese Sicherheitsanforderungen aufgenommen wurden Kriterien für die Standortfestlegung durch den Antragsteller (Standortauswahlkriterien). Derartige Kriterien sind insbesondere dann notwendig, wenn im Rahmen eines Auswahlverfahrens eine Entscheidung für oder gegen die weitergehende Untersuchung eines Standortes getroffen werden soll. Sie stellen jedoch keine Voraussetzungen für den Erlass eines Planfeststellungsbeschlusses dar. Die Entscheidung, ob und - wenn ja - in welchem Umfang verschiedene potentielle Endlagerstandorte im Rahmen eines Auswahlverfahrens zu vergleichen sind, obliegt dem für die Einrichtung von Endlagern zuständigen Bund und wird von der Planfeststellungsbehörde nicht überprüft. Im Rahmen eines umfassenden Sicherheitsnachweises können Vorteile für einen Standort auch aus seiner Nähe zu bestehenden oder geplanten kerntechnischen Anlagen resultieren, insbesondere wenn dadurch Abfalltransporte reduziert werden können.*

- 6.4 Während des Einlagerungsbetriebes ist vom Betreiber jeweils im Abstand von 10 Jahren eine Überprüfung auf sicherheitsrelevante Veränderungen des Standes von Wissenschaft und Technik bei der Beurteilung der Sicherheit von Endlagern und eine Überprüfung und Bestätigung der Sicherheitsnachweise durchzuführen. In diese Überprüfung und Bestätigung ist auch der Erfahrungsrückfluss aus dem Betrieb des Endlagers einzubeziehen.

*Diese Unterlagen sind der Aufsicht über das Endlager vorzulegen und der Planfeststellungsbehörde zur Kenntnis zu geben. Mit der Überprüfung und Bestätigung der Sicherheitsnachweise während der Betriebsphase wird nicht nur sichergestellt, dass im Betrieb des Endlagers z. B. Änderungen der gesetzlichen Bestimmungen, die Weiterentwicklung von Einlagerungstechniken oder der sich weiterentwickelnde Kenntnisstand bei der Bewertung der Anlagensicherheit berücksichtigt werden, sondern auch für die Optimierung des Einlagerungsbetriebs sowie für den Wissenserhalt bei allen Beteiligten gesorgt.*

## **7. Schutzkriterien**

- 7.1 Für den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen bei Erkundung, Errichtung, Einlagerungsbetrieb und Stilllegung des Endlagers gelten die einschlägigen Vorschriften des Atomgesetzes mit Verordnungen. Dabei ist das jeweils gültige kerntechnische Regelwerk sinngemäß anzuwenden.
- 7.2 Für die Phase nach Abschluss der Stilllegungsmaßnahmen ist zu zeigen, dass für wahrscheinliche Entwicklungen das vom Endlager ausgehende zusätzliche Risiko eines Menschen kleiner als  $10^{-4}$  ist, im Laufe seines Lebens einen schwerwiegenden Gesundheitsschaden durch aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzte Radionuklide zu erleiden. Für die Lebenszeit dieses Menschen wird die heutige Lebenserwartung zugrunde gelegt. Als wahrscheinlich werden hier Entwicklungen bezeichnet, deren auf den festgelegten Nachweiszeitraum bezogene Eintrittswahrscheinlichkeit mehr als  $10^{-1}$  beträgt. Eine Zusammenstellung in Erwägung zu ziehender und bei der Ermittlung von Eintrittswahrscheinlichkeiten zu berücksichtigender Entwicklungen enthält Anhang 1.

*Als Risiko-Indikator wird hier die bedingte Wahrscheinlichkeit verwendet, im Verlauf des Lebens einen schwerwiegenden Gesundheitsschaden (Tumor, genetischer Schaden, ...) zu erleiden, der durch aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich des Endlagers freigesetzte Radionuklide verursacht wird. Dieser Risiko-Indikator be-*

*zieht sich auf Einzelpersonen, die während der gesamten Lebenszeit exponiert werden. Wahrscheinliche Entwicklungen sind Entwicklungen infolge realistischerweise anzunehmender Situationen, Vorgänge und Ereignisse. Die WHO hat für Trinkwasser empfohlen, als Richtwert die Wahrscheinlichkeit einer schwerwiegenden Erkrankung auf  $10^{-4}$  pro Lebenszeit einzuhalten, wobei die WHO eine Lebenszeit von 70 Jahren zugrunde legt. Da nach der Stilllegung eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen längerfristig eine Exposition - wenn überhaupt - voraussichtlich über den Wasserpfad erfolgt, liegt eine Übertragung dieses Schutzniveaus auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle nahe. Die derzeit steigende Lebenserwartung wird nicht berücksichtigt, da weder die Lebenserwartung noch die Einstufung von Gesundheitsschäden als schwerwiegend über einen Zeitraum von 1 Million Jahre verlässlich prognostizierbar sind.*

- 7.3 Bei unterstelltem Eintreten einer außergewöhnlichen Entwicklung – dies ist eine Entwicklung infolge unwahrscheinlicher aber nicht ausgeschlossener Situationen, Vorgänge oder Ereignisse – darf das vom Endlager ausgehende zusätzliche Risiko für einen dadurch betroffenen Menschen nicht höher als  $10^{-3}$  sein, im Laufe seines Lebens einen schwerwiegenden Gesundheitsschaden durch aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzte Radionuklide zu erleiden. Als außergewöhnlich werden hier Entwicklungen bezeichnet, deren auf den festgelegten Nachweiszeitraum bezogene Eintrittswahrscheinlichkeit kleiner  $10^{-1}$  und nicht deutlich unterhalb von  $10^{-2}$  beträgt.

*Nach dem Stand von Wissenschaft und Technik sind quantitative Angaben zur Eintrittswahrscheinlichkeit geologischer Entwicklungen in der Regel lediglich Schätzungen, die zudem für außergewöhnliche Entwicklungen mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sein können. Statistische Daten für diese Entwicklungen sind in der Regel aufgrund des Fehlens oder der zu geringen Anzahl vergleichbarer geologischer Gesamtsituationen an anderen Standorten nicht verfügbar, so dass Angaben zur Wahrscheinlichkeit dieser Entwicklungen in der Regel lediglich mit Expertenwissen begründet werden können. Eine Summation dieser Eintrittswahrscheinlichkeiten zur Ermittlung der Gesamtwahrscheinlichkeit außergewöhnlicher Entwicklungen ist nicht möglich, da geologische Entwicklungen in der Regel keine im statistischen Sinn voneinander unabhängigen Ereignisse darstellen. Soweit verschiedene außergewöhnliche Entwicklungen möglicherweise in Kombination auftreten, sind die Eintrittswahrscheinlichkeit für diese Kombination und das zugehörige Risiko abzuschätzen.*

- 7.4 Nicht weiter zu betrachten sind Entwicklungen, deren Eintreten so unwahrscheinlich ist, dass ihre auf den Nachweiszeitraum bezogene Eintrittswahrscheinlichkeit kleiner als  $10^{-2}$  ist oder bei denen die primären Auswirkungen des auslösenden Ereignisses die Sekundärfolgen seiner Auswirkungen auf das Endlager bei weitem übersteigen.

*Ein Beispiel für Ereignisse, deren Auswirkungen die die mit der Freisetzung radioaktiver Stoffe aus dem Endlager verbundenen Auswirkungen bei weitem übersteigen, ist der Einschlag eines großen Meteoriten.*

- 7.5 Die Einleitung wasser- oder bodenrechtlich bedeutsamer Bestandteile der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und sonstiger, in das Endlager eingebrachter und nach seiner Stilllegung darin verbleibender Stoffe in den Grundwasserkörper ist nach den Vorschriften des Wasser- und Bodenrechts zu bewerten.

## 8. Sicherheitsnachweise

- 8.1 Für die Betriebsphasen Einlagerungsbetrieb und Stilllegung müssen anlagenspezifische Sicherheitsanalysen durchgeführt werden. Diese müssen Aussagen zu den Auswirkungen des Endlagers auf Mensch und Umwelt für alle Zustände des Endlagersystems ermöglichen, die nicht ausgeschlossen werden können. Die Robustheit des Endlagersystems muss analysiert und dargestellt werden. Für die sicherheitsbezogenen Systeme, Teilsysteme oder Einzelkomponenten sind die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten von Einwirkungen, Ausfällen oder von Abweichungen vom Erwartungsfall (Referenzfall) zu berechnen oder abzuschätzen und die Auswirkungen auf die jeweils zugehörige Sicherheitsfunktion zu analysieren.

*Mit Hilfe der Sicherheitsanalysen sind im Rahmen der Optimierung zusätzliche Anforderungen an Systeme, Teilsysteme oder Komponenten zu identifizieren und festzulegen, falls die ursprünglich vorgesehenen Systeme, Teilsysteme oder Komponenten ihren jeweiligen Zweck nicht oder nicht optimal erfüllen.*

- 8.2 Für die Phasen Einlagerungsbetrieb und Stilllegung des Endlagers ist nachzuweisen, dass ein nicht beherrschbarer Wassereintritt ausgeschlossen werden kann.
- 8.3 Zum Nachweis der Sicherheit nach Stilllegung des Endlagers ist ein umfassender standortspezifischer Langzeitsicherheitsnachweis zu führen, der alle Analysen und Argumente zusammenfasst, die die Langzeitsicherheit des Endlagers belegen, und der darlegt, wodurch das Vertrauen in diesen Nachweis begründet ist.

*Weil die Sicherheit des Endlagers nach seiner Stilllegung von einer nicht normierbaren geologischen Gesamtsituation geprägt wird, können im Rahmen dieser Sicherheitsanforderungen für diese Phase nicht alle sicherheitstechnischen Nachweisanforderungen vorab abschließend genannt bzw. quantitativ vorgegeben werden.*

Der Nachweis der Langzeitsicherheit muss sich auf mindestens folgende Nachweisfelder abstützen:

- 8.3.1 Geologische Langzeitprognose: Für die wahrscheinlichen Entwicklungen ist für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich auf der Grundlage einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose nachzuweisen, dass die Integrität dieses Gebirgsbereichs über einen Zeitraum von 1 Million Jahre sichergestellt ist. Hierfür ist vom Antragsteller der einschlusswirksame Gebirgsbereich räumlich und zeitlich eindeutig zu definieren und zu zeigen, dass auch unter Berücksichtigung der eingelagerten Abfälle und geotechnischen Barrieren langfristig
- ggf. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhandenes Porenwasser nicht am hydrogeologischen Kreislauf teilnimmt (kein Grundwasseraustausch zu oberflächennahen Grundwasservorkommen innerhalb des Nachweiszeitraums von 1 Million Jahre, wobei dieser Nachweis in der Regel über eine Alters- oder Herkunftsbestimmung des Porenwassers erfolgt),
  - innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs kein advektiver Transport stattfindet oder dass innerhalb dieses Gebirgsbereichs die Ausbreitung von Schadstoffen durch advektive Transportprozesse allenfalls vergleichbar zur Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse erfolgt, und dass

- die Ausbildung von solchen sekundären Wegsamkeiten innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ausgeschlossen werden kann, die zum Eindringen unbelasteter oder zum Austreten schadstoffbelasteter wässriger Lösungen führen können.

Solange die Abfälle vollständig in den Abfallbehältern bzw. am Einlagerungsort eingeschlossen sind, dürfen advective Transportprozesse im ewG durch die Wärmeentwicklung oder die Gasbildung angeregt oder verstärkt werden. Prüfwerte zum Nachweis der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sind beispielhaft in Anhang 2 enthalten.

*Nach der Stilllegung des Endlagers könnten insbesondere die anfänglich hohe Wärmeleistung der Abfälle oder korrosionsbedingte Gasbildungsprozesse zu advectiven Transportprozessen führen, so dass die für die geologische Langzeitprognose geltenden Anforderungen zeitweise verletzt werden.*

- 8.3.2 Radiologische Langzeitprognose: Für im Nachweiszeitraum nicht ausschließbare Entwicklungen sind anhand repräsentativer Szenarien und Referenzbiosphärenmodelle Berechnungen zur Einhaltung der in Abschnitt 7. genannten Schutzkriterien durchzuführen. Diese Berechnungen sind grundsätzlich auf den Transport von Radionukliden über den Wasserpfad zu beschränken.

*Legt man den 2007 in der ICRP-Publikation Nr. 103 veröffentlichten Wert für das detrimentangepasste nominale Risiko einer Krebserkrankung oder Erbgutschädigung von in Summe 0,057 pro Sievert (ca. 0,1 in Zukunft) für die Gesamtbevölkerung zugrunde, erhält man bei einem Lebenszeitrisiko von  $10^4$  für die effektive Lebenszeitdosis einen zulässigen Wert von 1,8 mSv. Konkretisierende Vorschriften zur Berechnung der effektiven Dosis und von Risikowerten im Langzeitsicherheitsnachweis werden in einer Leitlinie vor den jeweiligen Entscheidungsschritten im Genehmigungsverfahren zusammengestellt. Die Lebensgewohnheiten und Empfindlichkeiten zukünftiger Menschen können nicht prognostiziert werden. Außerdem können die heutigen oberflächennahen Verhältnisse allenfalls für Zeiträume in der Größenordnung von 10.000 Jahren als stabil angenommen werden. Insofern müssen angelehnt an die heute vorkommenden Lebensweisen des Menschen und die möglichen Verhältnisse an der Oberfläche Modellvorstellungen zum Ökosystem entwickelt werden. Für die Ermittlung von Strahlenexpositionen zum Nachweis der Langzeitsicherheit sind stilisierte Ökosysteme zugrunde zu legen, die die aus heutiger Sicht wesentlichen potentiellen Expositionspfade und möglichen Klimaänderungen berücksichtigen („reference biosphere“) und die zu einer möglichst realistischen Einschätzung der Strahlenexposition führen.*

- 8.3.3 Langzeitprognose des Einschlusses: Bei der radiologischen Langzeitprognose kann für erwartete bzw. für außergewöhnliche Entwicklungen auf Modellrechnungen zur Radionuklidausbreitung im Deckgebirge verzichtet werden, falls die für Einzelpersonen der Bevölkerung ermittelte effektive Dosis die Größenordnung von 0,1 mSv im Kalenderjahr nicht überschreitet, wobei der Bewertungsort am Rande des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs liegt, so dass die Barriereigenschaften der umgebenden oder überlagernden geologischen Schichten sowie Verteilungs- oder Verdünnungsprozesse im Deckgebirge gänzlich vernachlässigt werden. Andernfalls ist die Einhaltung der Schutzkriterien in der Biosphäre unter Berücksichtigung der Radionuklidausbreitung im Deckgebirge zu zeigen.

Die genannte effektive Dosis ist anhand eines für Betrachtungen zur Langzeitsicherheit anerkannten generischen Expositionsmodells zu ermitteln. Für dieses Expositionsmodell ist anzunehmen, dass

- der betrachtete Mensch seinen gesamten für die Ernährung (Trinken, Tränken, Beregnen) notwendigen jährlichen Wasserbedarf von 500 Kubikmetern aus einem Brunnen deckt und
- dieses Brunnenwasser sämtliche aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich in dem jeweiligen Jahr ausgetretenen Radionuklide enthält.

*Die Langzeitprognose des Einschlusses setzt für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ewG die Einhaltung gewisser Mindestabmessungen und Mindestanforderungen voraus. Hierzu zählen bei Tongesteinen hohe Anforderungen an die Diffusionskonstante und Porosität. Bei Salzgesteinen sind insbesondere die Auswirkungen außergewöhnlicher Entwicklungen zu beachten. Der vereinfachte radiologische Sicherheitsnachweis kann insoweit als Bindeglied zwischen geologischem und radiologischem Langzeitsicherheitsnachweis verstanden werden, als für diesen Nachweis die primär geologisch begründete Festlegung der Grenze des ewG auch radiologisch begründeten Anforderungen genügen muss.*

- 8.3.4 Wasser- und bodenrelevante Stoffe: Ebenfalls nachzuweisen ist, dass die Ableitung anderer, nicht radioaktiver grundwasser- oder bodenrelevanter Stoffe aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich in eine Gebirgszone, die am hydrogeologischen Kreislauf teilnimmt, nicht zur Überschreitung der zulässigen Grenzkonzentrationen, Prüfwerte oder Geringfügigkeitsschwellen des oberflächennahen Grundwassers führt und dass sie bei Einwirkung auf den Boden keine schädlichen Bodenveränderungen hervorruft. Kann dieser Nachweis bereits für den Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs geführt werden, kann auf Modellrechnungen zur Schadstoffausbreitung im Deckgebirge verzichtet werden.
- 8.3.5 Mobilisierung natürlicher Stoffe: Es ist zu untersuchen, inwieweit natürlich im Endlagersystem vorkommende radioaktive oder sonstige grundwasser- oder bodenrelevante Stoffe mobilisiert werden können und inwieweit Grundwasserströme in sicherheitsrelevantem Umfang verändert werden könnten. Dies könnte zum Beispiel aufgrund der hohen Wärmeleistung der eingelagerten Abfälle oder aufgrund veränderter geochemischer Bedingungen der Fall sein.
- 8.3.6 Integritätsnachweis für geotechnische Barrieren: Es ist nachzuweisen, dass weder die Integrität noch das Einschlussvermögen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch die technisch unvermeidbaren Barriereperforationen (z. B. Schächte) oder durch die Verfüllung beeinträchtigt werden. Hierzu sind der geologischen Barriere funktionell gleichwertige geotechnische Abdichtungs- und Verschlussbauwerke vorzusehen. Zum Nachweis sind unter anderem die für die Funktionstüchtigkeit der geotechnischen Verschlussbauwerke maßgeblichen Beanspruchungszustände und Eigenschaften der Baustoffe zu untersuchen. Die Beanspruchbarkeit und Alterungsbeständigkeit dieser Baustoffe ist für den Zeitraum nachzuweisen, für den die Funktionstüchtigkeit der Bauwerke gegeben sein muss.

*Die Bauwerke müssen so konstruiert sein und die Beständigkeit der Baustoffe muss über geeignete Untersuchungen und wissenschaftlich begründete Prognosen so nachgewiesen sein, dass in den Bauwerken für die jeweilig geforderten*

*Funktionszeiträume keine nachteiligen Veränderungen auftreten. Soweit notwendig müssen die sofort wirksamen Komponenten den Einschluss der Abfälle für den Zeitraum übernehmen, in dem die volle Wirksamkeit der langfristig wirksamen Komponenten noch nicht gegeben ist.*

- 8.3.7 Qualitätsnachweis für Abfallbehälter: Die Abfallbehälter müssen so stabil und so korrosionsbeständig sein, dass feste Abfälle für den Zeitraum von mindestens 500 Jahren für wahrscheinliche und außergewöhnliche Entwicklungen eingeschlossen bleiben. Eine ggf. von künftigen Generationen in diesem Zeitraum für notwendig erachtete Rückholung der Abfälle aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager darf nicht unnötig erschwert werden. Für diesen Fall sind Daten zu den endgelagerten radioaktiven Abfällen und zum Endlager in einem Umfang zu dokumentieren, der eine hinreichende Einschätzung der Notwendigkeit und Problematik einer derartigen Rückholung erlaubt. Darüber hinausgehend ist für eine Phase von 1000 Jahren nach der Stilllegung des Endlagers der Einschluss der Abfälle am Einlagerungsort nachzuweisen.

*Wesentlichen Einfluss übt das Endlager auf die ursprünglich natürlichen geologischen Verhältnisse aus, solange die Hohlräume des Endlagers konvergieren, die radioaktiven Abfälle Wärme entwickeln und sich das Gebirge wieder abkühlt. Zu Beginn dieser transienten Phase des Endlagers sollen die Abfallbehälter eine zusätzliche Einschlussmaßnahme darstellen.*

*International ist es zunehmend üblich, die Rückholbarkeit der Abfälle aus dem Endlager in die Planungen einzubeziehen. Es wird davon ausgegangen, dass bei einem diesen Sicherheitsanforderungen entsprechenden Endlager sicherheitstechnische Gründe für eine Rückholung der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle höchstwahrscheinlich ausscheiden. Deshalb ist gemäß diesen Sicherheitsanforderungen die Rückholbarkeit der Abfälle kein Bestandteil des Planfeststellungsverfahrens. Weiter sind gemäß Artikel 17 Abs. iii) des genannten Gemeinsamen Übereinkommens geeignete Maßnahmen zu treffen, damit auch nach der Stilllegung des Endlagers ggf. eingegriffen wird, wenn nach dem Verschluss eines Endlagers während der aktiven behördlichen Kontrolle eine ungeplante Freisetzung von Radionukliden erkannt wird. Diese aktive Kontrollphase, in der von den zuständigen Behörden die Sicherheit des Endlagers gefährdende menschliche Aktivitäten unterbunden werden kann, beträgt nach internationalen Einschätzungen 500 Jahre. Eine weitergehende Optimierung zur Erleichterung der Rückholung, beispielsweise die Einhaltung bestimmter Obergrenzen der Temperatur im stillgelegten Endlagerbergwerk, die Streckenlagerung von Abfällen anstelle ihrer Bohrlochlagerung, die Vermeidung des dichten Einschlusses der Abfälle aufgrund der Gebirgskonvergenz oder die Gewährleistung der Handhabbarkeit oder der Gasdichtheit der Behälter über einen Zeitraum von 500 Jahren, wird nicht gefordert.*

*Eine Behälterbarriere bietet auch bei unbeabsichtigten menschlichen Einwirkungen einen zusätzlichen Schutz. Die Forderung nach dem Einschluss der Abfälle für eine Phase von 1000 Jahren nach Stilllegung des Endlagers ist dadurch begründet, dass die Aktivität der in den Abfällen enthaltenen  $\beta/\gamma$ -Strahler erst ab diesem Zeitpunkt weitgehend abgeklungen ist.*

- 8.4 Kritikalität ist auszuschließen.

*Der Ausschluss von Kritikalität wird gefordert, auch wenn die Auswirkungen eines diesbezüglichen Störfalls keinesfalls mit der Detonation eines Kernsprengsatzes*

*gleichzusetzen sind. Für die Phasen Einlagerungsbetrieb und Stilllegung gelten die diesbezüglichen Anforderungen des Atomgesetzes mit Verordnungen (s. 7.1). In der Phase nach Stilllegung ist nach gegenwärtigem Kenntnisstand lediglich im Kristallingestein als „Extremfall“ ein Szenarium denkbar, bei dem eine geochemische Trennung von Uran und Plutonium und damit Kritikalität möglich erscheint. Dieses Szenarium wird aus geochemischer Sicht als unrealistisch eingestuft, da zu viele unwahrscheinliche Bedingungen eintreten müssten, bevor Kritikalität eintreten könnte. Zudem wären unmittelbare Auswirkungen an der Erdoberfläche nicht zu erwarten. Nachteilige Auswirkungen würden sich jedoch für die Langzeitprognosen ergeben, da weder die Intensität noch die Zeitdauer noch die Häufigkeit derartiger Zustände und damit deren Folgen für die Sicherheit des Endlagers zuverlässig eingrenzbar wären.*

- 8.5 Als Nachweiszeitraum für die Einhaltung der Sicherheitsprinzipien und Schutzkriterien wird ein Zeitraum von einer Million Jahren festgelegt. Für diesen Zeitraum müssen die wahrscheinlichen und außergewöhnlichen Entwicklungen des Endlagers sowie ihre Auswirkungen betrachtet und bewertet werden. Für den über eine Million Jahre hinaus bis ca. 10 Millionen Jahre reichenden Zeitraum ist eine geowissenschaftliche Langzeitprognose zur Wahrscheinlichkeit einer abrupten Veränderung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs abzugeben, die zu einem vollständigen oder teilweisen Verlust der Integrität des ewG führen könnte, wobei mögliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt nicht zu bewerten sind.

*Die Unsicherheiten der Rechnungen zu Auswirkungen des Endlagers steigen, je später der Zeitraum liegt, für den Angaben gemacht werden. Wenn die Unsicherheiten so groß werden, dass praktisch beliebige Rechenergebnisse erzeugt werden können, haben die Rechnungen nur noch geringe Beweiskraft. Qualitative Betrachtungen und Bewertungen können quantitative dann ersetzen, wenn aufgrund von geowissenschaftlichen Langzeitprognosen und hinreichenden Erfahrungswerten von einem ausreichenden Einschluss der Schadstoffe auszugehen ist.*

- 8.6 Bei deterministischen Rechnungen zum Nachweis der Langzeitsicherheit ist der jeweils zulässige Prüfwert (z. B. Korrosionsrate der Abfallbehälter, Alter der Grundwässer, Transportgeschwindigkeit des ggf. im ewG enthaltenen Porenwassers, Risiko eines schwerwiegenden Gesundheitsschadens) einzuhalten. Für diese Rechnungen sind grundsätzlich Medianwerte als Eingangsdaten zu verwenden. Zur Analyse der Unsicherheit der Ergebnisse der deterministischen Rechnungen sind zusätzliche Rechnungen mit Parameter- und, soweit zutreffend, Szenarien- oder Modellvariation durchzuführen. Unter Berücksichtigung der Unsicherheit der deterministischen Rechnungen gilt die Einhaltung der Prüfwerte gilt als nachgewiesen, falls der jeweils zulässige Prüfwert in 19 von 20 Fällen eingehalten wird und falls eine so hohe Anzahl von Rechnungen durchgeführt wurde, dass zur Überschreitung der zulässigen Prüfwerte führende Parameterkombinationen mit hoher Wahrscheinlichkeit identifiziert und hinsichtlich ihrer sicherheitstechnischen Auswirkungen analysiert und bewertet werden können. Bei Langzeitprognosen sind ggf. Referenzdaten und Referenzmodelle für den Zeitraum zu verwenden, für den die Unsicherheit der Eingangsdaten und Rechenmodelle so hoch ist, dass die Gültigkeit der Ergebnisse fraglich ist. Für diesen Zeitraum sollten ergänzend auch qualitative Nachweise herangezogen werden.
- 8.7 Die radiologischen und sonstigen Konsequenzen eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens sind mit Referenzszenarien zu analysieren, denen derzeit übliche menschliche Aktivitäten zugrunde liegen.

*Eine vermutete Nutzung als Rohstoffvorkommen oder eine vermutete anderweitige Nutzung könnte die Wahrscheinlichkeit für menschliche Tätigkeiten (Bohrungen, Auffahrungen, Sohlung von Kavernen) im tiefen Untergrund erhöhen. Derartige Überlegungen sind von dem für die Standortfestlegung verantwortlichen Bund bereits bei seiner Standortfestlegung und seinen ersten konzeptionellen Endlagerplanungen anzustellen. Die aus sicherheitstechnischen Gründen getroffene Entscheidung, die Abfälle im tiefen Untergrund zu konzentrieren und einzuschließen, hat zur Folge, dass ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen zu einer Perforation sicherheitstechnisch bedeutsamer Barrieren oder zur Schwächung von Sicherheitsfunktionen der Barrieren des Endlagers und nachfolgend zu erhöhten Freisetzungen führen könnte. Tätigkeiten von Menschen, die unabsichtlich auf diese Barrieren einwirken, sollten möglichst geringe Auswirkungen auf die Sicherheitsfunktionen der Barrieren haben.*

*Schutzkriterien für solche Tätigkeiten werden nicht vorgegeben, da weder die Wahrscheinlichkeit noch die Art der Einwirkungen ausreichend belastbar eingeschätzt werden können. Allerdings sollten hohe Strahlenexpositionen, die dazu führen, dass eine größere Zahl in der Umgebung des Endlagers lebender Menschen effektive Individualdosen von mehr als 10 mSv/a zu befürchten haben, nach Möglichkeit vermieden werden. Menschliche Aktivitäten mit Wissen um das Endlager und sein Gefährdungspotenzial werden in die Verantwortung der Handelnden gestellt und brauchen nicht betrachtet zu werden. Für die Menschen, die z. B. mit einer Bohrung direkt in ein Abfallgebinde hineinstoßen und mit dem Bohrklein in Berührung kommen, wird kein Schutzkriterium vorgegeben. Obgleich für Tätigkeiten, die im Bewusstsein durchgeführt werden, dass sich dort ein Endlager befindet, die durchführenden Menschen die Verantwortung übernehmen müssen, darf das Endlager nicht so konstruiert und dokumentiert sein, dass es leicht zu einer fehlerhaften Einschätzung der Risiken kommt. In einer Leitlinie sind Referenzszenarien für das menschliche Eindringen und Optimierungsanforderungen zur Verminderung des damit verbundenen Risikos festzulegen.*

- 8.8 Zur Überprüfung der Sicherheitsnachweise für den Einlagerungsbetrieb, die Stilllegung und für den Zeitraum nach Stilllegung ist ein Messprogramm durchzuführen, anhand dessen die Eingangsdaten, Annahmen und Aussagen dieser Nachweise nach Möglichkeit überprüft werden. Dieses Messprogramm hat insbesondere die Auswirkungen der thermomechanischen Reaktionen des Gebirges auf die wärmeentwickelnden Abfälle, die geotechnischen Maßnahmen sowie die gebirgsmechanischen Vorgänge zu erfassen. Die Messungen umfassen weiterhin den Ausgangszustand und die Entwicklung der Aktivitätskonzentration in Quell- und Grundwässern, Böden, Gewässern und in der Luft im Einflussbereich des Endlagers zu Beweis Zwecken. Wesentliche Abweichungen von diesbezüglichen Daten, Aussagen und Annahmen der genannten Sicherheitsnachweise sind unverzüglich der zuständigen Behörde mitzuteilen und hinsichtlich ihrer Sicherheitsrelevanz zu bewerten. Notwendigenfalls sind vom Betreiber Gegenmaßnahmen durchzuführen, um eine Beeinträchtigung wesentlicher Sicherheitsfunktionen zu vermeiden. Soweit für diese Gegenmaßnahmen eine Genehmigung erforderlich ist, ist diese bei der zuständigen Behörde zu beantragen. Die zuständige Behörde entscheidet auch über die Beendigung des Messprogramms.
- 8.9 Die sicherheitsrelevanten Eigenschaften der endzulagernden Abfallgebinde sind aus den Sicherheitsanalysen abzuleiten und in Endlagerungsbedingungen umzusetzen. Die gemäß Endlagerungsbedingungen anzugebenden Werte dieser Eigenschaften

sind von den Abfallverursachern zu ermitteln. Die Angaben der Abfallverursacher sind im Rahmen einer vom Abfallverursacher unabhängigen Produktkontrolle zu überprüfen.

*Die Einhaltung der Endlagerungsbedingungen ist im Rahmen der Produktkontrolle nachzuweisen. Entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik werden die wesentlichen Maßnahmen zur Produktkontrolle im Vorfeld der Einlagerung und außerhalb des Endlagers durchgeführt. Gemäß § 74 StrlSchV legt die zuständige Behörde alle sicherheitstechnischen Anforderungen an Abfallgebinde, die für die Endlagerung bestimmt sind, sowie die Vorgaben für die Behandlung der darin enthaltenen Abfälle fest und stellt die Endlagerfähigkeit der nach diesen Vorgaben und Anforderungen hergestellten Abfallgebinde fest. Bei der Anlieferung von Abfällen sind im Endlager zusätzliche Eingangskontrollen durchzuführen.*

- 8.10 Bei der Erkundung sind vom Antragsteller die für die Sicherheit des Endlagers wesentlichen Standortdaten in einem für die Sicherheitsnachweise ausreichendem Umfang zu ermitteln. Soweit hierfür eine quantitative Ermittlung von Standortdaten erforderlich ist, ist auch die Genauigkeit oder Bandbreite sowie eine mögliche Veränderung dieser Standortdaten unter Endlagerbedingungen zu ermitteln. Der Antragsteller hat der Genehmigungsbehörde die Gültigkeit dieser Daten nachzuweisen. Soweit an anderen Standorten ermittelte Daten verwendet werden, ist die Übertragbarkeit dieser Daten zu begründen.

*Quantitative Daten sind erforderlich, um aussagekräftige Sicherheitsanalysen durchführen zu können. Falls keine statistisch abgesicherten Aussagen zur Genauigkeit der Standortdaten möglich sind, können stattdessen maximal oder minimal mögliche Werte angegeben werden.*

- 8.11 Im Langzeitsicherheitsnachweis sind Freisetzungen von Radionukliden aus natürlich vorkommenden Materialien (Versatz und Gebirge) und Freisetzungen von Radionukliden aus den endgelagerten Abfällen getrennt zu bewerten. Eine etwaige Freisetzung von Radionukliden aus natürlich vorkommenden Materialien darf nicht zu Erhöhung der Konzentrationen in der Biosphäre führen, die die Schwankungsbreiten der natürlichen Konzentrationen dieser Radionuklide in Deutschland überschreiten.

## **9. Endlagerauslegung**

- 9.1 Für die Sicherheit des Endlagers in der Betriebsphase einschließlich Stilllegung ist ein in vier Ebenen gestaffeltes Sicherheitskonzept aufzustellen, wie es analog auch für Kernkraftwerke gilt. Durch die Zuordnung der vier Ebenen zu Anlagenzuständen und die für diese Anlagenzustände zu ergreifenden oder vorgesehenen Schutzmaßnahmen ist das Konzept der in die Tiefe gestaffelten Abwehrmaßnahmen (defence in depth) zu realisieren.

Folgende Sicherheitsebenen sind zu betrachten:

Normalbetrieb	- Maßnahmen verhindern Eintreten von Betriebsstörungen
Anomaler Betrieb	- Maßnahmen verhindern Eintreten von Auslegungsstörfällen
Auslegungsstörfälle	- Maßnahmen beherrschen Auslegungsstörfälle
Auslegungsüberschreitende Störfälle/Ereignisse	- Maßnahmen begrenzen Umgebungsauswirkungen

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

*Ereignisse, die wegen ihrer geringen Eintrittshäufigkeit nicht als Auslegungstörfälle einzustufen sind, sind zu bewerten und gegebenenfalls Maßnahmen zur Verringerung ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit und ihrer Auswirkungen vorzuschlagen.*

- 9.2 Die Zuverlässigkeit und Robustheit von Sicherheitsfunktionen innerhalb des Endlagers ist gemäß den Vorgaben des kerntechnischen Regelwerks für vergleichbare Funktionen in anderen kerntechnischen Anlagen nachzuweisen. Technische und geotechnische Komponenten des Endlagersystems, die eine bedeutsame Sicherheitsfunktion ausüben, für die jedoch keine anerkannten Regeln der Technik vorliegen, müssen erprobt werden, falls ihre Robustheit nicht hinreichend begründet werden kann oder falls nicht Sicherheitsreserven bestehen, die den Verzicht auf eine Erprobung erlauben. Die Erprobung muss eine nach kerntechnischem Anspruch durchgeführte Qualitätssicherung beinhalten.

*Die langfristige Robustheit technischer oder geotechnischer Sicherheitsfunktionen kann für Zeiträume jenseits einiger Jahrzehnte nicht erprobt werden, sondern muss auf der Basis theoretischer Überlegungen prognostiziert werden. Gleichwohl muss die Errichtung für die Langzeitsicherheit bedeutsamer und besonderen Anforderungen unterliegender Verschlussbauwerke erprobt sein, falls ihre Robustheit nicht anderweitig nachgewiesen werden kann.*

- 9.3 Erkundungsbohrungen und Erkundungsschächte sind so gebirgsschonend wie möglich auszuführen und so zu verschließen, dass die Barriereigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs unter Einbeziehung der erforderlichen Sicherheitsfesten erhalten bleiben.
- 9.4 Bei der Festlegung der Grenzen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit den darin aufgefahrenen Einlagerungsfeldern und Einlagerungskammern oder -bohrlöchern muss ein ausreichender Abstand zu geologischen Störungen eingehalten werden, die die Integrität dieses Gebirgsbereichs im Nachweiszeitraum gefährden könnten.

*Bei ausreichender Größe des Wirtsgesteins erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass hinreichend große, ungestörte Bereiche gefunden werden, die die an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich gestellten Anforderungen erfüllen und in die die Abfälle eingelagert werden können. Diese Optimierung wird in der Regel als Ergebnis der geowissenschaftlichen Erkundung durchgeführt. Gleichförmige Gesteinsformationen und vergleichsweise einfache geologische Verhältnisse sind zuverlässiger charakterisierbar und ihre Eigenschaften besser prognostizierbar. Eine ausreichende Tiefenlage ist erforderlich, da die geologische Stabilität, insbesondere gegenüber Veränderungen der Umwelt an der Erdoberfläche, generell mit der Tiefenlage zunimmt.*

- 9.5 Die Handhabung und ggf. erforderliche Lagerung von Abfallbinden im Einlagerungsbetrieb ist möglichst vollständig von den für die Auffahrung erforderlichen Arbeiten zu trennen.
- 9.6 Das Endlager ist in Einlagerungsfelder mit einzelnen Einlagerungsbereichen zu untergliedern. Die Anzahl der offenen Einlagerungsbereiche ist gering zu halten. Diese sind zügig zu beladen, anschließend zu verfüllen und sicher gegen das Grubengebäude zu verschließen.
- 9.7 Die Sicherheit des Endlagers nach seiner Stilllegung ist durch ein gestaffeltes Barrierensystem sicherzustellen, das seine Funktionen passiv und wartungsfrei erfüllt.

*Der langfristige Einschluss muss im Wesentlichen durch die geotechnischen und geologischen Barrieren sichergestellt werden. Allerdings müssen auch technische Barrieren für einen gewissen Zeitraum wichtige Sicherheitsfunktionen übernehmen.*

- 9.8 Ein robustes Barrierensystem muss seine Funktionstüchtigkeit selbst für den Fall in ausreichendem Maße beibehalten, dass einzelne Barrieren nicht ihre volle Wirkung entfalten. Das Einschlussvermögen des Barrierensystems darf nur dann weitgehend von einer Barriere abhängen, falls das Versagen dieser Barriere den außergewöhnlichen Entwicklungen zugeordnet werden kann.

*Unsicherheiten in der Leistungsfähigkeit einzelner Barrieren aufgrund begrenzter Prognostizierbarkeit des Langzeitverhaltens oder begrenzter Genauigkeit der Beschreibbarkeit der Barrieren sind zu kompensieren. Z. B. sind in der Anfangsphase nach Stilllegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich hohlraumnahe Auflockerungszonen vorhanden, die durch die Auffahrung und Offenhaltung des Endlagers bedingt sind. In dieser Phase sind die Integrität und das Einschlussvermögen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im notwendigen Umfang durch Verschlussbauwerke zu gewährleisten, die diesen Sachverhalt berücksichtigen. Einbarrierensysteme müssen höhere Anforderungen an die Zuverlässigkeit des Einschlusses erfüllen, da im Versagensfall keine Redundanz vorhanden ist.*

- 9.9 Vor Inbetriebnahme des Endlagers muss ein umsetzbares und geprüftes Stilllegungskonzept vorliegen. Es muss dafür gesorgt sein, dass die personellen, finanziellen und technischen Gegebenheiten eine eventuell notwendige kurzfristige Umsetzung des Stilllegungskonzeptes ermöglichen.

*Insbesondere das Konzept zum Verschluss der Schächte des Endlagerbergwerks ist im Rahmen der alle zehn Jahre stattfindenden Sicherheitsüberprüfungen entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik fortzuentwickeln. Im Planfeststellungsverfahren muss anhand der Sicherheitsanalysen für die Betriebsphase festgelegt werden, innerhalb welchen Zeitraumes der Verschluss des Endlagers möglich sein muss. Der Zeitraum muss deutlich kleiner als die anfänglich geplante Einlagerungsdauer sein.*

- 9.10 Der Betreiber des Endlagers hat die Organisation seines Betriebs so auszugestalten, dass
- eine atomrechtlich verantwortliche Person für Errichtung, Leitung und Beaufsichtigung des Betriebs der Anlage im Sinne des § 7 Absatz 2 Nr. 1 AtG sowie eine atomrechtlich verantwortliche Person als Leiter der Produktkontrolle bestellt werden, die mindestens über die in Anlage 2 angegebenen Qualifikationen verfügen,

- von der atomrechtlich verantwortlichen Person für die Errichtung, Leitung und Beaufsichtigung weitere atomrechtlich verantwortliche Personen bestellt werden, deren erforderliche Fachkunde nach § 7 Abs. 2 Nr. 1 AtG sich auf deren vorgesehene Tätigkeitsbereiche bezieht. Aufgaben und Befugnisse dieser atomrechtlich verantwortlichen Personen sind eindeutig und lückenlos festzulegen,
- jederzeit ausreichend fach- und sachkundiges Personal für die wahrzunehmenden Aufgaben vorhanden ist, bei der Erledigung aller atomrechtlich relevanten Arbeiten nur zuverlässiges und fachkundiges Personal zum Einsatz kommt und dieses durch atomrechtlich verantwortliche Personen beaufsichtigt wird sowie
- Unfälle vermieden und eventuelle Unfallfolgen begrenzt werden.

Anforderungen an die Fachkunde atomrechtlich verantwortlicher Personen sind von der jeweils zuständigen Behörde festzulegen.

- 9.11 Die Verfahrensbeteiligten müssen im jeweils erforderlichen Umfang über ein Managementsystem verfügen, das die Qualität sicherheitstechnisch relevanter Arbeiten und Prozesse mit hoher Zuverlässigkeit gewährleistet (Vier-Augen-Prinzip).
- 9.12 Die markscheiderischen Daten des Endlagers, die sicherheitstechnisch bedeutsamen Eigenschaften der Abfälle, die technischen Maßnahmen bei Errichtung, Einlagebetriebsbetrieb und Stilllegung des Endlagers, die Ergebnisse des Messprogramms sowie der Langzeitsicherheitsnachweis sind zu dokumentieren. Insbesondere ist darzulegen, welcher Bereich in der Umgebung des Endlagerbergwerks vor menschlichen Eingriffen in den tiefen Untergrund geschützt werden muss bzw. welche Eingriffe mit besonderen Auflagen versehen werden müssen. Vollständige Dokumentsätze sind sowohl bei den für die Zulassung von Eingriffen in den tiefen Untergrund zuständigen Behörden als auch bei einer Behörde des Bundes aufzubewahren.

### **Zusammenstellung zu klassifizierender Entwicklungen**

Als mögliche, hinsichtlich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit zu klassifizierende Entwicklungen (Szenarien), die die Langzeitsicherheit eines Endlagers beeinträchtigen können, sind mindestens zu betrachten:

1. Geologische Entwicklungen mit Veränderung der Geometrie des Endlagersystems ( z. B. Verformung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, Veränderungen des Deckgebirges, Aufstieg)
2. Erdbeben, Vulkanismus
3. Kalt- und Warmzeiten
4. Veränderungen der Dichtheit, der Transporteigenschaften und des Rückhaltevermögens technischer und natürlicher Barrieren (z. B. durch Eindringen von Gasen, Lösungsprozesse, Alterung)

Ob eine bestimmte Entwicklung als wahrscheinlich oder als außergewöhnlich einzustufen ist oder ob sie nicht weiter zu betrachten ist, wird weitgehend durch die geologischen Gegebenheiten und die topografische Lage des Endlagerstandorts bestimmt. Die Langzeitsicherheit eines Endlagers kann auch durch menschliches Eindringen und durch Wasserbewirtschaftung beeinträchtigt werden. Derzeit sind weder die menschliche Entwicklung, menschliche Lebensweisen oder das menschliche Verhalten für die zu betrachtenden Zeiträume fundiert prognostizierbar. Daher können in den Leitlinien zur Modellierung der Biosphäre gemäß Abschnitt 8.3.2 und zum menschlichen Eindringen gemäß Abschnitt 8.7 lediglich ausgewählte Szenarien betrachtet werden, denen die heute absehbaren Möglichkeiten zugrunde gelegt werden.

*Ausführliche Darstellungen zu dieser Thematik sind in den Veröffentlichungen „Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste - An International Database, OECD/NEA, Paris, 2000“ und „Scenario Development Methods and Practice, OECD/NEA, Paris, 2001“ enthalten.*

### **Prüfwerte für die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs**

Die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bei Salinar- und Tongesteinen ist anhand folgender Kriterien zu prüfen:

- Dilatanzkriterium  
Die zu erwartenden Beanspruchungen dürfen die Dilatanzfestigkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht überschreiten.
- Fluidruckkriterium  
Die zu erwartenden Fluiddrücke dürfen die Fluiddruckbelastbarkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht in einer Weise überschreiten, die zu einem Zutritt von Grundwässern in das Endlager führt.
- Temperaturkriterium  
Durch die Temperaturentwicklung darf es nicht zu Mineralumwandlungen kommen, die die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs unzulässig beeinflussen. Als Indikator zukünftiger zulässiger Temperaturen ist die Dauer und Höhe der Temperaturbelastung heranzuziehen, die die Gesteine in ihrer geologischen Geschichte erfahren haben.

*Der Nachweis der Integrität des ewG und des Einschlusses der Abfälle im ewG kann in Deutschland voraussichtlich nur für geeignete Salinar- oder Tongesteine geführt werden. Sicherheitsanforderungen an die technischen Barrieren eines Endlagers in Kristallingestein werden durch diese Sicherheitsanforderungen nicht festgelegt. Für Kristallingesteine wird nach dem allgemeinen Kenntnisstand der geologischen Verhältnisse in Deutschland davon ausgegangen, dass hinreichend ausgedehnte Gesteinskörper aufgrund ihrer Klüftigkeit - zumindest teilweise - am hydrogeologischen Kreislauf teilnehmen. Die Langzeitsicherheit eines Endlagers in Kristallingestein wäre in diesem Fall im Wesentlichen durch technische Barrieren sicherzustellen.*

*Grundsätzliche quantitative und qualitative Kriterien zur Bewertung der Integrität von Gesteinskörpern haben der Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) sowie die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) entwickelt. Zentraler Aspekt des Integritätsnachweises ist es zu zeigen, dass diese Integritätsanforderungen und damit die Barriereigenschaften über den Nachweiszeitraum erhalten bleiben.*