

Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland

Anhang Strahlenexposition

Radiologische Auswirkungen eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle



30.09.2008

Bearbeiter:
Küppers, C.

**Braunschweig / Darmstadt
September 2008**

**Anhang zu GRS-247
ISBN 978-3-939355-22-9**

Das diesem Bericht zugrunde liegende FE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter den Kennzeichen 02E9783 und 02E9793 durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Strahlenexposition des Betriebspersonals im Endlager.....	4
2.1	Im Endlager einzurichtende Strahlenschutzbereiche.....	5
2.2	Bauliche, technische und administrative Maßnahmen zur Gewährleistung des Strahlenschutzes des Betriebspersonals.....	8
2.3	Strahlenschutzüberwachung zum Schutz des Betriebspersonals.....	10
2.4	Zulässige und zu erwartende Strahlenexposition des Betriebspersonals im bestimmungsgemäßen Betrieb.....	11
3	Radiologische Auswirkungen des Endlagerbetriebs auf die Umgebung im bestimmungsgemäßen Betrieb.....	14
4	Störfallauslegung im Betrieb des Endlagers.....	15
5	Radiologische Auswirkungen in der Nachbetriebsphase.....	19
5.1	Grundsätzliches Vorgehen zur Begrenzung möglicher radiologischer Auswirkungen in der Nachbetriebsphase.....	19
5.2	Dosiskriterium bei Sicherheitsanalysen für das ERA Morsleben.....	20
5.3	Dosiskriterien nach den RSK/SSK-Stellungnahmen zur Fortschreibung der Endlager-Sicherheitskriterien /RSK 02/ und zum GRS-Bericht „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen“ /RSK 08/.....	21
5.4	Risikobasiertes Vorgehen bei der Sicherheitsbeurteilung.....	21
5.5	Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Schweiz.....	23
5.6	Schutzziele für die Endlagerung abgebrannter Brennelemente in Finnland.....	24
5.7	Schutzziele für die Endlagerung in Schweden.....	25
5.8	Vorgehen bei der Ermittlung der Dosis.....	25
5.9	Gewährleistung des Schutzes der Umwelt in der Nachbetriebsphase.....	28

6	Zusammenfassende Schlussfolgerungen	29
7	Literatur.....	31
8	Weiterführende Literatur	33

1 Einleitung

Gebinde mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen enthalten radioaktive Stoffe mit hoher Aktivität. Diese sind in Behältern eingeschlossen, ein kleinerer Teil der von diesen Stoffen ausgehenden Strahlung durchdringt aber Abfallmatrix und Behälter. Von den Gebinden geht daher eine nicht der Freisetzung von radioaktiven Stoffen verbundene sogenannte Direktstrahlung aus, durch die Personen, die sich in der Nähe aufhalten, einer Strahlenexposition ausgesetzt werden. Dies betrifft vor allem das Betriebspersonal des Endlagers. Wegen des dichten Einschlusses kommt es dagegen normalerweise nicht zu einer Freisetzung von radioaktiven Stoffen aus den Behältern und zur Ableitung von radioaktiven Stoffen in die Umgebung.

In einem Endlager sind daher Maßnahmen zum Strahlenschutz erforderlich. Diese sind zwar erst dann in einem Endlager durchzuführen, wenn erstmals radioaktive Stoffe angenommen werden, in der Planung des Endlagers müssen sie aber bereits berücksichtigt werden. Die in der Betriebsphase und der Nachbetriebsphase eines Endlagers erforderlichen Strahlenschutzmaßnahmen sind von Art und notwendigem Aufwand her sehr unterschiedlich.

Kapitel 2 befasst sich mit dem Strahlenschutz des Betriebspersonals in der Betriebsphase des Endlagers und den erforderlichen Strahlenschutzmaßnahmen. Kapitel 3 behandelt Maßnahmen zum Strahlenschutz in der Umgebung in der Betriebsphase im bestimmungsgemäßen Betrieb, Kapitel 4 die Störfallauslegung im Betrieb des Endlagers. Kapitel 5 befasst sich mit den radiologischen Auswirkungen in der Nachbetriebsphase. In Kapitel 6 werden zusammenfassende Schlussfolgerungen gezogen.

2 Strahlenexposition des Betriebspersonals im Endlager

Die Strahlenexposition des Betriebspersonals eines Endlagers ist mit der Strahlenexposition des Betriebspersonals bestehender kerntechnischer Anlagen grundsätzlich vergleichbar.

Das Betriebspersonal des Endlagers ist dem Strahlenfeld von endzulagernden Gebinden ausgesetzt, wenn diese Gebinde hantiert werden oder Tätigkeiten in deren Nähe durchzuführen sind. Daraus resultiert eine äußere Strahlenexposition durch Gamma- und Neutronenstrahlung. Eine Inkorporation radioaktiver Stoffe ist für das Betriebspersonal nur dann möglich, wenn es zu Undichtigkeiten an Gebinden und einer Freisetzung von radioaktiven Stoffen aus den Gebinden kommt, was aber nur nach schweren Störfällen möglich wäre. Nach Verschluss des Endlagers können Arbeiten an oberflächennahen Teilen oder beispielsweise der Rückbau von Gebäuden erfolgen, ohne dass von einer Strahlenexposition des Personals ausgegangen werden muss, sofern keine Kontaminationen aus Ereignissen mit Freisetzung radioaktiver Stoffe vorliegen. Eine Strahlenexposition des Betriebspersonals ist darüber hinaus durch die Inhalation natürlicher radioaktiver Stoffe möglich, wie sie – abhängig vom Gehalt natürlicher radioaktiver Stoffe im Wirtsgestein - vor allem in den untertägigen Bereichen des Endlagers vorhanden sein können.

Es bestehen Anforderungen an die Begrenzung der Dosisleistung (Abschirmung) und der nicht festhaftenden Oberflächenkontamination der Behälter sowie an deren Dichtigkeit, die bereits bei der vorherigen Zwischenlagerung an einem anderen Standort eingehalten werden müssen. Desweiteren ergeben sich Anforderungen an die Begrenzung der Dosisleistung sowie der nicht festhaftenden Oberflächenkontamination und der Widerstandsfähigkeit der Behälter gegen unfallbedingte Einwirkungen beim Transport aus dem Verkehrsrecht. Diese Anforderungen führen dazu, dass die in einem Endlager angenommenen Abfälle bereits hohe Anforderungen erfüllen, die auch wesentlich zum Strahlenschutz des Betriebspersonals im Endlager beitragen.

Die Anforderungen an die Dichtigkeit der Endlagergebäude führen dazu, dass – abgesehen von schweren Störfällen – die Inhalation von aus den Gebinden freigesetzten radioaktiven Stoffen für die Strahlenexposition des Betriebspersonals von sehr untergeordneter Bedeutung ist. Entsprechende Überwachungs- und Schutzmaßnahmen

dienen daher dem Strahlenschutz im Falle von Ereignissen mit massiven Beschädigungen an Abfallgebinden.

In Kapitel 2.1 werden die Strahlenschutzmaßnahmen beschrieben, die sich aus der Einrichtung von Strahlenschutzbereichen nach der Strahlenschutzverordnung /SSV 01/ ergeben, in Kapitel 2.2 bauliche, technische und administrative Maßnahmen des Strahlenschutzes. Kapitel 2.3 geht auf die Strahlenschutzüberwachung des Betriebspersonals ein, Kapitel 2.4 auf die Höhe der zu erwartenden Strahlenexposition.

2.1 Im Endlager einzurichtende Strahlenschutzbereiche

Ein wichtiges Instrument zur Gewährleistung des Strahlenschutzes des Betriebspersonals in Anlagen, in denen mit radioaktiven Stoffen umgegangen wird, ist die Einrichtung von sogenannten Strahlenschutzbereichen, nämlich von Überwachungsbereichen, Kontrollbereichen und Sperrbereichen. Aus diesen Strahlenschutzbereichen ergeben sich spezifische Zugangsbeschränkungen und Schutzvorkehrungen, die der Optimierung des Strahlenschutzes dienen. Die Einteilung erfolgt abhängig von der Dosis, die bei Tätigkeiten in den jeweiligen Bereichen erreicht werden kann.

Definitionen und relevante Randbedingungen dieser Bereiche, die sich aus der Strahlenschutzverordnung ergeben, sind in Tabelle 2-1 zusammengestellt.

Tab. 1: Strahlenschutzbereiche – Definition und Anforderungen

Bezeichnung	Definition	wichtige Anforderungen
Überwachungsbereich	nicht zum Kontrollbereich gehörender betrieblicher Bereich, in dem Personen im Kalenderjahr eine höhere effektive Dosis als 1 mSv (oder bestimmte Organdosen) erhalten können*	Zutrittsbeschränkungen
Kontrollbereich	Bereich, in dem Personen im Kalenderjahr eine höhere effektive Dosis als 6 mSv (oder bestimmte Organdosen) erhalten können*	Kennzeichnung; Zutrittsbeschränkungen, insbesondere Aufenthalt nur zur Durchführung oder Aufrechterhaltung der Betriebsvorgänge
Sperrbereich	Bereich des Kontrollbereichs, in dem die Ortsdosisleistung 3 mSv/h überschreiten kann	Kennzeichnung; Absicherung gegen unkontrolliertes Hineingelangen; Zutrittsbeschränkungen, insbesondere Aufenthalt nur zur Durchführung oder Aufrechterhaltung der Betriebsvorgänge; Aufenthalt nur unter Kontrolle

* maßgeblich ist eine Aufenthaltszeit von 2000 Stunden im Kalenderjahr, soweit keine anderen begründeten Angaben über die Aufenthaltszeit vorliegen

Oberirdischer Teil des Endlagers

Im oberirdischen Teil eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle werden das Betriebsgelände und darauf befindliche Gebäude aufgrund des Umgangs mit radioaktiven Stoffen entweder vollständig oder zu wesentlichen Teilen als Überwachungsbereich auszuweisen sein. Dies entspricht der gängigen Praxis bei kerntechnischen Anlagen.

Kontrollbereiche sind aufgrund der von den Abfallgebinden ausgehenden Direktstrahlung im oberirdischen Teil alle Bereiche, in denen mit Abfallgebinden umgegangen wird. Dies können auch Bereiche im Freien sein, beispielsweise Transportwege und gegebenenfalls Lagerflächen. Ebenfalls Kontrollbereich sind die Gebäude oder Räume, in denen Kontrollen an Abfallgebinden vorgenommen werden, in denen eine Verladung zum Transport in den Einlagerungsbereich erfolgt oder in denen Verpackungen der Gebinde entfernt werden.

Sperrbereiche, die immer Teile des Kontrollbereichs sind, wären dort einzurichten, wo die Überschreitung einer Dosisleistung von 3 mSv/h möglich ist. Im oberirdischen Teil des Endlagers kann sich die Notwendigkeit zur Einrichtung von Sperrbereichen dann ergeben, wenn Bereiche geschaffen werden, in denen mehrere Behälter gleichzeitig in unmittelbarer Nähe zueinander aufbewahrt werden (z. B. in einem Pufferlager).

Untertägiger Teil des Endlagers

Der gesamte untertägige Teil eines Endlagers sollte als Kontrollbereich ausgewiesen sein. Ausgenommen werden können nur getrennte Schachtanlagen, in denen noch keine Einlagerung radioaktiver Abfälle erfolgt. Dies ergibt sich nicht nur aus den zu erwartenden möglichen Strahlenexpositionen sondern schon aus Gründen der Praktikabilität, da an Übergängen zwischen Kontroll- und Überwachungsbereichen Maßnahmen zur Kontaminationskontrolle und zur Vermeidung von Kontaminationsverschleppungen (z. B. Kleidungs- und Schuhwechsel) zu ergreifen sind. Diese Maßnahmen müssen in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle nicht sehr umfangreich sein, da normalerweise wegen des Einschusses der radioaktiven Stoffe in den Gebinden von keinen Kontaminationen auszugehen ist. Ein gewisser Umfang an Schutzmaßnahmen ist aber schon zur Beweissicherung sinnvoll.

Für den regelmäßig zu begehenden oder zu befahrenden Teil des Endlagers ist nicht zu erwarten, dass die Ausweisung von Sperrbereichen erforderlich würde. Dort wo Endlagergebäude aus einem Transferbehälter entladen werden und wo diese bis zum Einlagerungsort befördert werden ist aus Strahlenschutzgründen nur noch eine fernbediente Handhabung bzw. eine automatisierte Beförderung möglich. Ein Zugang zu solchen Bereichen ist dann nicht erforderlich.

Die Erfahrung mit kerntechnischen Anlagen zeigt, dass sich im Laufe einer Betriebszeit von Jahren und Jahrzehnten durch bauliche und technische Veränderungen auch Randbedingungen für die Einrichtung der Strahlenschutzbereiche ändern können. Die Zuordnung von Bereichen im oberirdischen Teil des Endlagers zu den verschiedenen Arten von Strahlenschutzbereichen ist daher mit der Inbetriebnahme nicht unveränderlich. Im untertägigen Teil ist mit keinen wesentlichen Änderungen der Zuordnung von Bereichen zu rechnen, da dies zwar abhängig von der aktuellen Nutzung von Strecken möglich aber wenig praktikabel wäre. Die Aufhebung und Einrichtung von Sperr- oder Kontrollbereichen ist mit administrativem Aufwand verbunden und an den neu entste-

henden Grenzen können zusätzliche Maßnahmen erforderlich werden (Kontaminationskontrolle, Kleiderwechsel etc.).

2.2 Bauliche, technische und administrative Maßnahmen zur Gewährleistung des Strahlenschutzes des Betriebspersonals

Der Strahlenschutz des Betriebspersonals erfordert einerseits die Einhaltung der Dosisgrenzwerte der Strahlenschutzverordnung, andererseits eine Minimierung der Strahlenexposition gemäß § 6 der Strahlenschutzverordnung /SSV 01/. Zur Erreichung dieser Ziele sind verschiedene bauliche und technische Maßnahmen möglich, die in einem Endlager umgesetzt werden können. Nachfolgend wird bei der Darstellung der Schutzmaßnahmen zwischen dem oberirdischen und dem untertägigen Teil des Endlagers unterschieden.

Oberirdischer Teil des Endlagers

Folgende Maßnahmen zur Gewährleistung des Strahlenschutzes des Betriebspersonals sind im oberirdischen Teil des Endlagers erforderlich:

- Die Endlagerbehälter der zum Endlager verbrachten radioaktiven Abfälle selbst weisen bereits eine massive Abschirmung auf. Von Lagerbereichen ausgehende Direktstrahlung oder Direktstrahlung an häufig frequentierten Transportwegen kann zusätzlich durch mobile Abschirmungen (Bleisteine, Wände aus Schwerbeton o. ä.) begrenzt werden. Die besondere Abschirmung kann sich auch auf bestimmte Arbeitsplätze beziehen, beispielsweise Abschirmung von Fahrzeugen oder von Orten, an denen regelmäßiger Aufenthalt von Personen erforderlich ist.
- Die Endlagergebäude und die Betriebsabläufe können so gestaltet werden, dass sich höhere Dosisleistungen nur in solchen Bereichen ergeben, in denen tatsächlich mit Abfallgebinden umgegangen werden muss. Eine Strahlenexposition bei Tätigkeiten, die nicht mit dem direkten Umgang mit Abfallgebinden in Zusammenhang stehen, kann dagegen vermieden werden. Die technische Umsetzung erfolgt durch die Auslegung von Gebäudestrukturen im Hinblick auf die abschirmende Wirkung sowie auf die räumliche Trennung.
- Durch Trennung der Führung der Raumluft können Bereiche, in denen radioaktive Stoffe luftgetragen freigesetzt werden können, von solchen getrennt werden, in denen dies nicht möglich ist. Dies dient dem Schutz des Betriebspersonals bei

Störfällen mit deutlicher Beschädigung von Abfallgebinden. Außerdem wären nach einem entsprechenden Ereignis die kontaminierten – und damit zu dekontaminierenden - Bereiche weniger ausgedehnt.

- Eine automatisierte oder fernbediente Handhabung von Gebinden trägt ebenfalls zur Minimierung der Strahlenexposition des Betriebspersonals bei.
- Eine Überwachung der Raumluft im Hinblick auf künstliche Radioaktivität ist möglich. Bei erhöhter Raumluftaktivität, also nach schweren Störfällen mit Freisetzung von Radioaktivität, können zusätzliche Maßnahmen des Strahlenschutzes ergriffen werden (Tragen von Atemschutz, vorübergehende Räumung eines Anlagenbereichs etc.).

Untertägiger Teil des Endlagers

Im untertägigen Teil des Endlagers sind folgende Maßnahmen zur Gewährleistung des Strahlenschutzes des Betriebspersonals erforderlich:

- Die automatisierte oder fernbediente Handhabung von Gebinden hat im untertägigen Teil besondere Bedeutung. Bei der Einlagerung von radioaktiven Abfällen mit Transferbehältern, die an der Bohrlochsleuse entladen werden, ist eine automatisierte oder fernbediente Handhabung wegen der extrem hohen Dosisleistung zwingend erforderlich.
- Unabhängig von der Frage des Umgangs mit radioaktiven Stoffen ist im untertägigen Teil eines Endlagers eine gerichtete Luftströmung zu gewährleisten, da dies eine allgemeine Anforderung aus dem Bergbau ist. Diese kann – im Hinblick auf mögliche Freisetzungen radioaktiver Stoffe bei schweren Störfällen – so gestaltet werden, dass Abwetter aus möglichen Freisetzungsbereichen nicht unnötig durch unkontaminierte Bereiche geleitet wird.
- Wie im oberirdischen Teil auch, können die Wetter überwacht werden und bei störfallbedingt erhöhter Radioaktivität können zusätzliche Maßnahmen des Strahlenschutzes ergriffen werden (Tragen von Atemschutz, vorübergehende Räumung eines Anlagenbereichs etc.).

Alle genannten Schutzmaßnahmen sind Stand der Technik und werden in kerntechnischen Anlagen routinemäßig zur Gewährleistung des Strahlenschutzes genutzt.

Grundsätzlich neue Anforderungen an solche Maßnahmen ergeben sich bei einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle nicht.

2.3 Strahlenschutzüberwachung zum Schutz des Betriebspersonals

Es ist eine Strahlenschutzüberwachung erforderlich, mit der zum einen die radiologische Situation überwacht wird, um stets frühzeitig die Notwendigkeit von Maßnahmen zum Schutz des Betriebspersonals zu erkennen. Zum anderen müssen beim Betriebspersonal die personenbezogenen Dosen überwacht werden, da entsprechende Dosisgrenzwerte einzuhalten sind. Der Umfang der Strahlenschutzüberwachung ergibt sich aus der Strahlenschutzverordnung sowie einschlägigem untergesetzlichem Regelwerk. Nach Stand von Wissenschaft und Technik umfasst die Strahlenschutzüberwachung die folgenden Bestandteile:

- Überwachung von Ortsdosis und Ortsdosisleistung.

Ortsdosis und Ortsdosisleistung müssen überwacht werden, um die mögliche Dosis von Personen, die bestimmte Bereiche betreten, einschätzen zu können. Zur Überwachung von Ortsdosis und Ortsdosisleistung können fest installierte und mobile Geräte eingesetzt werden. Messwerte können angezeigt sowie übertragen werden und bei erhöhter Ortsdosisleistung kann eine Alarmierung erfolgen. Die Überwachung sollte sich auf die Bereiche mit hoher oder häufig wechselnder Dosisleistung konzentrieren (Lagerbereiche, Transportstrecken etc.).

- Kontaminationsüberwachung.

Die Kontaminationsüberwachung dient vor allem der Beweissicherung und muss daher im Routinebetrieb nicht mit großer Intensität erfolgen. Nach Störfällen können zusätzliche gezielte Kontrollen durchgeführt werden, um den Erhalt der Integrität von Behältern zu überprüfen. Die Überwachung von Kontaminationen kann durch Direktmessung oder Wischprobenahme erfolgen. Vorrangig sind Messungen an Arbeitsplätzen und Verkehrsflächen.

- Überwachung von Raumluft (oberirdischer Teil) und Wettern (untertägiger Teil).

Die Überwachung von Raumluft und Wettern dient der Detektierung von bei einem schweren Störfall freigesetzten radioaktiven Stoffen sowie in einem solchen Fall der Ermittlung der freigesetzten Menge an radioaktiven Stoffen. Raumluft und Wetter können in einem Bypass über einen Sammelfilter geführt werden, dessen Akti-

vitätsbelastung kontinuierlich überwacht werden kann. Außerdem kann eine nuklid-spezifische Auswertung von Filtern im Labor erfolgen, aus der sich die mittlere Aktivitätskonzentration in Wetter und Raumluft errechnen lässt.

- Personenüberwachung und Maßnahmen an der Kontrollbereichsgrenze.

An der Kontrollbereichsgrenze kann zur Vermeidung von Verschleppungen radioaktiver Stoffe eine Kontaminationskontrolle der Personen erfolgen, die den Kontrollbereich verlassen. Hierzu sind festinstallierte Schleusen, ergänzt um mobile Geräte einsetzbar. Diese Maßnahmen werden in kerntechnischen Anlagen routinemäßig durchgeführt, auch wenn keine Kontamination erwartet wird.

- Ermittlung der beruflichen Strahlenexposition.

Bei Personen, die im Kontrollbereich eines Endlagers tätig sind, ist deren Dosis zu ermitteln, um die Einhaltung der Dosisgrenzwerte zu überwachen. Es sind Dosimeter verfügbar, durch die Gamma- und Neutronenstrahlung erfasst wird. Die äußere Strahlenexposition wird zweckmäßigerweise sowohl mit betrieblichen, direkt ablesbaren Personendosimetern als auch mit amtlichen Dosimetern ermittelt. Zur Ermittlung einer störfallbedingten Dosis durch Inhalation können erforderlichenfalls neben Daten der Überwachung der Raumluftaktivität auch die Resultate von Ausscheidungsanalysen herangezogen werden.

Alle genannten Maßnahmen zur Strahlenschutzüberwachung sind verfügbar und werden in kerntechnischen Anlagen routinemäßig genutzt. Grundsätzlich neue Anforderungen an solche Maßnahmen ergeben sich für ein Endlager nicht.

2.4 Zulässige und zu erwartende Strahlenexposition des Betriebspersonals im bestimmungsgemäßen Betrieb

Die Strahlenexposition von Beschäftigten in einem Endlager ist durch die Strahlenschutzverordnung begrenzt. Personen, die regelmäßig Kontrollbereiche betreten, sind beruflich strahlenexponierte Personen. Für diesen Personenkreis bestehen bestimmte Anforderungen im Hinblick auf die arbeitsmedizinische Vorsorge, regelmäßige Unterweisungen und die zentrale Erfassung der Dosis in einem Register. Die Strahlenschutzverordnung begrenzt die effektive Dosis einer beruflich strahlenexponierten Person auf 20 mSv im Kalenderjahr und auf 400 mSv im Berufsleben. Ausnahmen sind nur unter bestimmten Voraussetzungen zugelassen; für gebärfähige und für schwang-

gere Frauen gelten besondere Schutzbestimmungen. Auch Dosen für Einzelorgane sind begrenzt, wobei diese Begrenzung bei der in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle im bestimmungsgemäßen Betrieb maßgeblichen äußeren Exposition durch Direktstrahlung der Abfallgebinde von untergeordneter Bedeutung ist.

Für Personen, die in einem Endlager beschäftigt sind und nicht als beruflich strahlenexponierte Personen gelten, ist nach Strahlenschutzverordnung ein Grenzwert von 1 mSv im Kalenderjahr für die effektive Dosis einzuhalten. Solche Personen sind beispielsweise Beschäftigte in der Verwaltung. Zu deren Schutz müssen die Abläufe auf dem Betriebsgelände so gestaltet sein, dass die Dosisgrenzwerte durch Aufenthalt am Arbeitsplatz und Betreten des Betriebsgeländes nicht überschritten werden können.

Zusätzlich zu den Dosisbegrenzungen fordert die Strahlenschutzverordnung in § 6, dass die Strahlenexposition des Betriebspersonals unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik sowie unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls so gering wie möglich zu halten ist. Dies ist erforderlich, da keine Wirkungsschwelle der Strahlenexposition bekannt ist. Die Einhaltung der Dosisgrenzwerte verhindert akute Strahlenschäden und begrenzt das Risiko für Spätfolgen. Mit der Regelung des § 6 Strahlenschutzverordnung wird das Risiko für Spätfolgen möglichst gering gehalten.

Die höchsten zu erwartenden Strahlenexpositionen des Betriebspersonals in einem Endlager ergeben sich im bestimmungsgemäßen Betrieb für Personen, die regelmäßig mit Annahme, Umladung und Verbringung in die Einlagerungsbereiche von Abfallgebinden befasst sind. Werden Tätigkeiten nicht fernbedient oder automatisiert ausgeführt, muss die Strahlenexposition vorrangig durch kurze Umgangszeiten und Abschirmung gering gehalten werden. Zeitabläufe lassen sich z. B. durch eine optimierte Lagerstrategie, bei der räumlich schwierig gestaltete Transportvorgänge vermieden werden, reduzieren oder durch den Einsatz von Spezialgeräten, mit denen eine schnelle Abwicklung möglich wird. Abschirmungen können insbesondere an Transportfahrzeugen und Bedienungsplätzen von Hebezeugen sowie in Form mobiler Abschirmwände zur Dosisminimierung beitragen.

Einschlägige Erfahrungen mit der Strahlenexposition von Betriebspersonal, das mit Abfallgebinden umgeht, liegen in Deutschland aus der Zwischenlagerung sowie aus dem Forschungsbergwerk Asse und dem ERA Morsleben vor. Dort war und ist es möglich, Überschreitungen der zulässigen Dosisgrenzwerte beim Betriebspersonal zu vermeiden. Solange gleichartige Gebinde bzw. Gebinde in gleichartiger abschirmender Ver-

packung gehandhabt werden, sind diese Erfahrungen auf ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle übertragbar.

Es ist daher davon auszugehen, dass der Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle so gestaltet werden kann, dass die Dosisgrenzwerte beim Betriebspersonal im bestimmungsgemäßen Betrieb deutlich unterschritten werden. Bei der Planung der baulichen Gegebenheiten und der Betriebsabläufe ist ein entsprechender Nachweis, so wie bei anderen kerntechnischen Anlagen auch, zu führen.

3 Radiologische Auswirkungen des Endlagerbetriebs auf die Umgebung im bestimmungsgemäßen Betrieb

Die Dosis von Personen in der Umgebung eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle ist nach der Strahlenschutzverordnung auf 1 mSv effektive Dosis im Kalenderjahr begrenzt. Im bestimmungsgemäßen Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle ist die Strahlenexposition in der Umgebung im wesentlichen auf Direktstrahlung beim Antransport von Gebinden mit radioaktiven Abfällen sowie bei der oberirdischen Lagerung auf dem Betriebsgelände zurück zu führen.

Die Direktstrahlung beim Antransport von Gebinden ist vergleichbar mit bisherigen Transporten radioaktiver Stoffe, da hinsichtlich zulässiger Dosisleistung an den Gebinden und Wagen die gleichen Anforderungen gelten. Eine Minimierung der Strahlenexposition ist durch Vermeidung längerer Standzeiten in der Nähe von Orten mit längerer Aufenthaltszeit von Personen der Bevölkerung, insbesondere durch die Gestaltung der Transportroute, möglich.

Die Direktstrahlung von Gebinden, die sich bereits in oberirdischen Gebäuden des Endlagers befinden, erfordert eine Abschirmung der Direktstrahlung durch die Gebäudestrukturen. Bei deren Auslegung ist – wie beispielsweise auch bei Zwischenlagern für wärmeentwickelnde Abfälle – nachzuweisen, dass auch bei Daueraufenthalt am Zaun des Betriebsgeländes keine Überschreitung der Dosisgrenzwerte möglich ist.

Sobald Abfallgebände in den untertägigen Teil des Endlagers verbracht sind, ist davon auszugehen, dass diese aufgrund der weiteren Abschirmung der Direktstrahlung durch das Endlager nicht mehr zu einer Dosis außerhalb des Betriebsgeländes beitragen.

Aus der Erfahrung mit dem Transport und der Zwischenlagerung wärmeentwickelnder Abfälle ist bekannt, dass sich die Strahlenexposition von Personen der Bevölkerung im bestimmungsgemäßen Betrieb deutlich unterhalb der einschlägigen Dosisgrenzwerte halten lässt. In der Planungsphase des Endlagers sind die Voraussetzungen dafür zu schaffen, dass dies auch dort gewährleistet ist.

4 Störfallauslegung im Betrieb des Endlagers

Endlager müssen, wie andere kerntechnische Anlagen auch, so geplant, errichtet und betrieben werden, dass während des Betriebs Störfälle ausgeschlossen oder in ihren Auswirkungen so begrenzt sind, dass entsprechende Schutzziele eingehalten sind. Das Schutzziel ist in § 49 der Strahlenschutzverordnung /SSV 01/ als Störfallplanungswert festgelegt. Durch Störfallplanungswerte wird die Strahlenexposition einer Person der Bevölkerung begrenzt; die Störfallplanungswerte beziehen sich auf die Planung (Feststellung ausreichender Vorsorge), stellen aber kein Schutzziel dar, das im Falle eines tatsächlichen Störfalls maßgeblich ist.

Die Abfallgebinde sowie technische Einrichtungen des Endlagers müssen in ihrer Kombination so angelegt sein, dass die Störfallplanungswerte bei den zu unterstellenden Störfällen eingehalten werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Abfallgebinde und Behälter schon unabhängig von den im Endlager möglichen Störfällen einen deutlichen Schutz gegen die Freisetzung radioaktiver Stoffe bieten, da schon zuvor die sichere Zwischenlagerung sowie die Beförderung auf öffentlichen Verkehrswegen gewährleistet und endzulagernde Abfälle auf bestimmte Weise konditioniert sein müssen.

Die möglichen Inventare radioaktiver Stoffe in den Abfallgebinden sind so groß, dass bei Störfällen nur ein sehr geringer Teil des Inventars aus dem Behälter entweichen darf. Dies ist durch entsprechende Auslegung sicherzustellen. Darüber ist das Endlager so auszulegen, dass durch einen Störfall nicht eine große Zahl an Gebinden gleichzeitig betroffen wird und in der Summe eine zu große Menge radioaktiver Stoffe freigesetzt würde.

Störfälle werden in der Kerntechnik unterschieden nach Störfällen, die durch Vorgänge in der Anlage selbst („Einwirkungen von Innen“) und in der Umgebung der Anlage („Einwirkungen von Außen“) ausgelöst werden. In Tabelle 4-1 sind wichtige zu berücksichtigende Einwirkungen von Innen zusammengestellt. Wegen der unterschiedlichen Auswirkungen auf die Umgebung ist in die Bereiche der oberirdischen Anlage, der Schachtförderanlage und der untertägigen Anlage unterschieden. In Tabelle 4-2 sind wichtige zu berücksichtigende Einwirkungen von Außen zusammengestellt. Mögliche Maßnahmen, die der Reduzierung von Freisetzungen und damit auch von Strahlenex-

positionen in der Umgebung bei den jeweiligen Störfällen dienen, sind in den Tabellen ebenfalls genannt.

Einen vorgegebenen Katalog zu berücksichtigender Einwirkungen bei Endlagern gibt es in Deutschland bisher nicht; für bestimmte Arten kerntechnischer Anlagen existieren dagegen solche Festlegungen. Die Zusammenstellung in den Tabellen 4-1 und 4-2 beruht daher im wesentlichen auf der bisherigen Praxis bei deutschen Endlagern (insbesondere Schachanlage Konrad). Die Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) und Strahlenschutzkommission (SSK) sehen in /RSK 08/ insofern Regelungsbedarf, als das untergesetzliche Regelwerk für die Betriebsphase von Endlagern keine zu berücksichtigenden Auslegungsstörfälle festschreibt. Eine solche Regelung kann nach /RSK 08/ in einer Leitlinie zur Identifikation und Bewertung sicherheitstechnisch bedeutsamer Ereignisse in der Betriebsphase erfolgen.

Tab. 2: Wichtige zu berücksichtigende Störfälle beim Betrieb eines Endlagers (Einwirkungen von Innen)

Bereich	Störfall	Mögliche Maßnahmen zur Begrenzung der Freisetzung*
Oberirdische Anlage	Absturz eines Behälters mit radioaktivem Abfall	Widerstandsfähigkeit des Behälters, Einbindung der radioaktiven Stoffe in die Abfallmatrix, Begrenzung der maximal möglichen Fallhöhe, Auslegung der Transportmittel
	Absturz schwerer Lasten auf einen Behälter mit radioaktivem Abfall	
	Brand eines Fahrzeugs	Minimierung der Brandlast (bei Fahrzeugen auch Auswahl des Treibstoffs und vorhandene Treibstoffmenge), Einrichtung von Brandabschnitten, Brandmeldeeinrichtungen, Brandbekämpfungsmaßnahmen, Auslegung der Abfallgebinde gegen thermische Einwirkungen
	Sonstiger anlageninterner Brand	
	Leckagen mit kontaminierten Wässern (möglich z. B. im Bereich eines Betriebsabwassersammelsystems)	Auslegung von Behältern und Leitungen, Auffangwannen, Sümpfe
Schachtförderanlage	Absturz von Abfallgebinden (bei Beschickung des Förderkorbs und bei der Förderung)	wie in der oberirdischen Anlage (siehe oben)
	Absturz von Lasten auf Abfallgebinde	
	Brand	
Untertägige Anlage	Absturz von Abfallgebinden	wie in der oberirdischen Anlage (siehe oben)
	Absturz von Lasten auf Abfallgebinde	
	Aufprall von Gestein auf Abfallgebinde	Widerstandsfähigkeit des Behälters, Einbindung der radioaktiven Stoffe in die Abfallmatrix, Sicherungsmaßnahmen im Grubengebäude
	Brand eines Fahrzeugs	wie in der oberirdischen Anlage (siehe oben)
	Sonstiger anlageninterner Brand	

* Die Maßnahmen müssen in großem Umfang unabhängig von den Störfallszenarien des Endlagers getroffen sein, es muss aber gezeigt werden, dass sie die Störfallszenarien des Endlagers abdecken

Tab. 3: Wichtige zu berücksichtigende Störfälle und sonstige Einwirkungen beim Betrieb eines Endlagers (Einwirkungen von Außen)

Störfall	Mögliche Maßnahmen zur Begrenzung der Freisetzung*
Witterungsbedingte Einwirkungen (Sturm, Regen, Schnee, Frost und Blitzschlag)	Auslegung der oberirdischen Gebäude
Hochwasser	Standortauswahl, Konstruktion und Höhenlage der Gebäude
Erdbeben	Standortauswahl, Auslegung von Gebäuden/Hebezeugen/Förderkörben, Stapelhöhe, Widerstandsfähigkeit von Behältern und Abfallmatrix
Bergschäden	
Flugzeugabsturz	Standortauswahl, Auslegung von Gebäuden, Widerstandsfähigkeit von Behältern und Abfallmatrix
Druckwelle aus einer chemischen Explosion	
Terroristischer Angriff von Außen	Auslegung von Gebäuden, Widerstandsfähigkeit von Behältern und Abfallmatrix

* Die Maßnahmen müssen in großem Umfang unabhängig von den Störfallszenarien des Endlagers getroffen sein, es muss aber gezeigt werden, dass sie die Störfallszenarien des Endlagers abdecken

In der Störfallanalyse ist das Schadensbild und der Quellterm (Menge der in die Umgebung freigesetzten radioaktiven Stoffe) zu ermitteln. Für die Berechnung der Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung kann auf übliche Berechnungsverfahren zurückgegriffen werden (Störfallberechnungsgrundlagen /SSK 03/). Unter konservativen Annahmen kann dann geprüft werden, ob der Störfallplanungswert nach § 49 StrlSchV eingehalten ist.

Die bisherige Erfahrung in Deutschland (Planfeststellungsverfahren Schachanlage Konrad, ERA Morsleben, diverse Zwischenlager) lässt erwarten, dass eine entsprechende Auslegung eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle möglich ist. Im Planfeststellungsverfahren ist dies nachzuweisen.

5 Radiologische Auswirkungen in der Nachbetriebsphase

Mögliche radiologische Auswirkungen in der Nachbetriebsphase eines Endlagers müssen begrenzt werden. In diesem Zusammenhang sind Schutzziele und das Vorgehen bei der Ermittlung möglicher radiologischer Auswirkungen festzulegen.

Im folgenden Kapitel wird zunächst auf das grundsätzliche Vorgehen zur Begrenzung möglicher radiologischer Auswirkungen in der Nachbetriebsphase eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle eingegangen (Kapitel 5.1). Anschließend werden beispielhaft radiologische Schutzziele und Dosiskriterien aus verschiedenen Ländern dargelegt (Kapitel 5.2 bis 5.7). Kapitel 5.8 behandelt die Frage der Ermittlung der Strahlenexposition von in ferner Zukunft lebenden Personen aus möglichen Einträgen radioaktiver Stoffe in die Biosphäre. Kapitel 5.9 geht auf den Aspekt des Schutzes der Umwelt ein.

5.1 Grundsätzliches Vorgehen zur Begrenzung möglicher radiologischer Auswirkungen in der Nachbetriebsphase

Im Hinblick auf die radiologischen Auswirkungen eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle in der Nachbetriebsphase ist das vorrangige Ziel die möglichst effektive und langandauernde Isolation der radioaktiven Abfälle von der Biosphäre (siehe auch /RSK 08/). Die Radionuklide sollen soweit als möglich zerfallen sein, bevor ein Eintrag in die Biosphäre möglich werden kann. Ein Eintrag in die Biosphäre ist dann allenfalls noch für Radionuklide mit extrem langen Halbwertszeiten möglich, deren Anteil an der in ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle einzubringenden Menge radioaktiver Stoffe sehr klein ist.

Dadurch ergibt sich als wesentlicher „Rückhaltefaktor“ die Zeitverzögerung bis zu einem möglichen Eintrag in die Biosphäre. Bei der Entsorgung von Schadstoffen, die stabil sind, sich also insbesondere nicht durch radioaktiven Zerfall umwandeln, kann von einem solchen Effekt kein Kredit genommen werden. Von der Abfallmatrix oder der Verpackung wird im Hinblick auf den Eintrag in die Biosphäre in der Langzeitsicherheitsanalyse je nach Endlagerkonzept ein unterschiedlich starker Kredit genommen, Anforderungen in dieser Hinsicht ergeben sich aber insbesondere aus der Störfallanalyse für die Betriebsphase des Endlagers.

Anders als bei der Genehmigung heute emittierender Anlagen spielt eine scharfe Abgrenzung der Genehmigungsfähigkeit eines Endlagers anhand einer Begrenzung der Strahlenexposition (Dosis) keine tragende Rolle, unabhängig davon, ob sich um einen Richt- oder Grenzwert sowie um eine individuelle oder kollektive Dosis handelt. Grenzwerte sind dort sinnvoll, wo ihre Einhaltung überwacht werden kann und bei einer Überschreitung Konsequenzen gezogen werden können. Die Frage, ob sich in der Langzeitsicherheitsanalyse für ein Endlager eine Unter- oder Überschreitung eines festgelegten Dosisrichtwerts in der Nachbetriebsphase ergibt, ist gemessen an anderen für die Langzeitsicherheit wichtigen Fragestellungen von untergeordneter Bedeutung. Das Dosiskriterium kann jedoch als Maß für die Güte eines Endlagers in der Nachbetriebsphase gelten (Sicherheitsindikator).

Unterschieden werden meist zwei Dosiskriterien, die in ihrer Höhe unterschiedlich festgelegt werden:

- Ein Dosiskriterium betrifft die Dosis, die aufgrund der vorliegenden Erkenntnisse über die Formation und ihre Eigenschaften und der darauf aufbauenden Modellierung (wahrscheinliche Entwicklungen) langfristig erwartet wird.
- Ein zweites Dosiskriterium bezieht sich auf weniger wahrscheinliche Entwicklungen, für die eine maximal zulässige Wahrscheinlichkeit über einen bestimmten Zeitraum festgelegt werden kann (z. B. Eintrittswahrscheinlichkeit maximal 0,1 über eine Million Jahre).

Für sehr lange Zeiträume (z. B. mehr als eine Million Jahre) kann erwartet werden, dass nur noch qualitative Aussagen über die Rückhaltung im Endlager getroffen werden können. Für solche Zeiträume ist es dann nicht sinnvoll, Dosiskriterien vorzugeben. Ein wichtiges Kriterium für die Qualität eines Endlagers ist aber, dass keine Anzeichen für eine abrupte Änderung sicherheitsrelevanter Veränderungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorliegen.

Nachfolgend werden einige Beispiele für bisher angewendete oder empfohlene Dosiskriterien genannt.

5.2 Dosiskriterium bei Sicherheitsanalysen für das ERA Morsleben

Für das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) wurden Sicherheitsanalysen durchgeführt. Als Dosiskriterium wurde dabei der Wert 0,3 mSv für die effektive

Dosis verwendet. Dieser Wert entspricht dem Grenzwert für die Strahlenexposition der Bevölkerung durch Ableitungen radioaktiver Stoffe im bestimmungsgemäßen Betrieb von Anlagen und Einrichtungen nach § 47 StrlSchV. Dieser Grenzwert gilt nach Strahlenschutzverordnung für die Betriebsphase eines Endlagers, nicht aber für die Nachbetriebsphase, für die die Strahlenschutzverordnung keinen Grenzwert festlegt.

5.3 Dosiskriterien nach den RSK/SSK-Stellungnahmen zur Fortschreibung der Endlager-Sicherheitskriterien /RSK 02/ und zum GRS-Bericht „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen“ /RSK 08/

In einer gemeinsamen Stellungnahme RSK und der SSK zur Fortschreibung der Endlager-Sicherheitskriterien /RSK 02/ werden die folgenden Dosisrichtwerte empfohlen:

- 0,1 mSv effektive Dosis pro Jahr für wahrscheinliche Szenarien,
- 1 mSv effektive Dosis pro Jahr für weniger wahrscheinliche Szenarien (Eintrittswahrscheinlichkeit < 0,1 über den gesamten betrachteten Zeitraum der Nachbetriebsphase).
- Eine zusätzliche Begrenzung der Kollektivdosis wird nicht empfohlen.

Der gleiche radiologische Bewertungsmaßstab, ausgedrückt als „Indikator effektive Individualdosis“ wird von RSK und SSK in /RSK 08/ empfohlen.

Für Zwecke des Strahlenschutzes geht man üblicherweise von einem linearen Zusammenhang zwischen Dosis und Wirkung aus, außerdem davon, dass keine Schwelle existiert, unterhalb der keine Schäden mehr möglich sind. Es ist dann gleichwertig, ein Schutzziel als Individualdosis oder als Risikowert auszudrücken. Wegen der Schwierigkeit der Vermittlung des Risikoansatzes und der Quantifizierung sehen SSK und RSK es als einfacher und ausreichend an, für die zu untersuchenden Szenariengruppen mit Dosiswerten als Schutzziel zu arbeiten /RSK 02, RSK 08/.

5.4 Risikobasiertes Vorgehen bei der Sicherheitsbeurteilung

In einem allein risikobasierten Ansatz würde für eine zukünftige Person oder Personengruppe ein bestimmtes zusätzliches Risiko durch Freisetzungen radioaktiver Stoffe

aus dem Endlager zugelassen. Bei der Festlegung des maximal zuzulassenden Risikos sind verschiedene Aspekte einzubeziehen:

- Die Betroffenen haben von der Verursachung des Risikos keinen Nutzen gehabt (eingeschränkte Rechtfertigung).
- Das zusätzliche Risiko kann über einen im Vergleich zur üblichen Betriebsdauer einer kerntechnischen Anlage sehr langen Zeitraum bestehen bleiben.
- Die zusätzlichen Risiken können – in unterschiedlichem Ausmaß – eine sehr große Gruppe der Bevölkerung betreffen.
- Es wird voraussichtlich keine geeigneten technischen Gegenmaßnahmen zur deutlichen Herabsetzung des Risikos für die zukünftig Betroffenen geben.
- Das Risiko sollte nicht größer sein als Risiken, die – auch in anderen Bereichen des Umweltschutzes – der Bevölkerung zugemutet werden.

Ein objektiv begründbares quantitatives Risikokriterium lässt sich schwerlich ableiten, wenn sämtliche der genannten Aspekte angemessen berücksichtigt werden sollen. Insbesondere sind neben naturwissenschaftlich bewertbaren Aspekten auch ethische Fragen zu berücksichtigen. Der letztgenannte Aspekt, der Vergleich mit anderen Risikobegrenzungen im Umweltschutz, bedeutet einen Vergleich mit nicht einheitlichem Vorgehen und bedarf eines genauen Vergleichs jeweiliger Randbedingungen.

Hinzu kommen Schwierigkeiten der Ermittlung des tatsächlichen Risikos, da dazu sowohl die Eintrittswahrscheinlichkeiten der in der Langzeitsicherheitsanalyse zu berücksichtigenden Vorgänge und Ereignisse mindestens auf eine Größenordnung genau ermittelt werden müssten, als auch die zukünftige Dosis realistisch zu bestimmen sein müsste (was z. B. Kenntnisse über Lebensgewohnheiten und Nutzungsszenarien in 1 Million Jahre voraussetzen würde).

Es ist augenscheinlich, dass die Risikoermittlungen stets mit gewissen Unsicherheiten verbunden sein werden. Würden diese durch konservative Ansätze abgedeckt, müsste zur Begrenzung des Risikos ein sehr niedriger Dosiswert eingehalten werden, der wahrscheinlich wenig mit den Verhältnissen in ferner Zukunft zu tun hat. Dieses „Risiko“ könnte dann nicht mehr ohne Weiteres mit anderen Risiken verglichen werden, z. B. aus den Bereichen Trinkwasserschutz oder Luftreinhaltung. Wird der Gehalt einer Noxe, z. B. aufgrund bekannter Wirkmechanismen, im Trinkwasser begrenzt, so wird

die Einhaltung dieses Grenzwerts unmittelbar im Trinkwasser überprüft. Als einzige unsichere Größe bei der Risikoermittlung verbleibt der unterstellte Trinkwasserkonsum. Die Unsicherheiten der Transportvorgänge in der Umwelt, die schließlich zu einer bestimmten Kontamination im Trinkwasser führen, spielen in einer solchen Betrachtung dagegen keine Rolle.

RSK und SSK halten es in /RSK 08/ für sinnvoll, für die Nachbetriebsphase eines Endlagers die Dosis als Kriterium zur Beurteilung radiologischer Auswirkungen heranzuziehen. Die Verwendung eines Risikoäquivalents würde demgegenüber keinen Vorteil bieten, was die Beurteilung der Expositionen durch ionisierende Strahlung betrifft. RSK und SSK halten es aber für sinnvoll, dosisbasierte Prüfwerte auch auf Basis der Kenntnisse zum Strahlenrisiko abzuleiten.

5.5 Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Schweiz

In der Richtlinie HSK-R-21 der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) vom November 1993 /HSK 93/ sind die „Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle“ festgelegt. In der Richtlinie werden die wesentlichen Prinzipien und Schutzziele genannt:

- Geringe zusätzliche Strahlenexposition der Bevölkerung (Bruchteil der natürlichen Strahlenexposition):
 - bei realistischere anzunehmenden Vorgängen und Ereignissen limitiert auf 0,1 mSv pro Jahr,
 - bei unwahrscheinlichen Vorgängen und Ereignissen Begrenzung des Risikos auf 10^{-6} pro Jahr,
- Gewährleistung des Schutzes der Umwelt so, dass die Artenvielfalt nicht gefährdet und die Nutzung von Bodenschätzen nicht unnötig eingeschränkt wird,
- keine Risiken für Mensch und Umwelt außerhalb der Schweiz und in Zukunft, die höher sind als dies derzeit in der Schweiz zulässig ist.

Die zu schützende Person wird in /HSK 93/ als durchschnittliches Individuum der meist betroffenen Bevölkerungsgruppe definiert. Es soll sich dabei in Anlehnung an die ICRP-81 /ICR 98/ um eine „begrenzte Personenzahl“ handeln. Bei überregionalen Auswirkungen und wenn gleichzeitig ein großer Personenkreis betroffen wäre, können

die Sicherheitsbehörden strengere Limite festlegen, bei der Betroffenheit von sehr wenigen Personen aber auch weniger strenge.

5.6 Schutzziele für die Endlagerung abgebrannter Brennelemente in Finnland

In einem finnischen Regierungsbeschluss vom 25. März 1999 /COS 99/ sind die folgenden radiologischen Kriterien für die Langzeitsicherheit eines Endlagers für abgebrannte Brennelemente genannt:

- Zu keiner Zeit sollen in der Langzeitbetrachtung Auswirkungen auf die Gesundheit oder die Umwelt auftreten, die höher sind als die bei der Einrichtung des Endlagers als akzeptabel angesehenen Auswirkungen.
- Für die Phase, in der die Entwicklung im Hinblick auf die Strahlenexposition von Personen vorhersagbar ist und die mindestens einige 1000 Jahre betragen soll, gelten die folgenden Dosiskriterien:
 - eine effektive Dosis von 0,1 mSv pro Jahr soll für die höchstexponierte Person nicht überschritten werden,
 - die mittlere jährliche effektive Dosis für die übrigen Personen soll geringfügig sein („insignificantly low“).
- Für den über diese Phase hinausgehenden Zeitraum sollen nuklidspezifische Richtwerte durch die finnische nukleare Aufsichtsbehörde STUK so festgelegt werden, dass
 - im ungünstigsten Zeitraum die Auswirkungen durch Strahlenexposition durch das Endlager vergleichbar mit denen durch natürliche radioaktive Stoffe sind,
 - über einen langen Zeitraum betrachtet die Auswirkungen geringfügig sind („insignificantly low“).
- Unwahrscheinliche Entwicklungen sollen abgeschätzt werden und, soweit praktikabel, bewertet werden, ob die Auswirkungen und möglichen Strahlenexpositionen im Verhältnis zu den oben genannten Richtwerten akzeptabel sind.

5.7 Schutzziele für die Endlagerung in Schweden

Von der schwedischen Strahlenschutzbehörde Statens strålskyddsinstitut (SSI) wurden in /SSI 98/ die folgenden radiologischen Anforderungen an die Endlagerung von abgebrannten Brennelementen und radioaktivem Abfall festgelegt:

- Außerhalb Schwedens sollen keine Auswirkungen auftreten, die ungünstiger sind als die innerhalb Schwedens akzeptierten.
- Die Kollektivdosis soll für die innerhalb der nächsten 1000 Jahre erwarteten Entwicklung insgesamt ermittelt werden, über 10.000 Jahre als jährliche Kollektivdosis. Einzuhaltende Kollektivdosiswerte sind nicht festgelegt.
- Das Risiko für Gesundheitsschäden bei einem repräsentativen Individuum in der Personengruppe mit dem höchsten Risiko soll 10^{-6} (bezogen auf den Risikoeffizienten nach ICRP-60) in der Langzeitphase nicht überschreiten.
- Biodiversität und der nachhaltige Gebrauch biologischer Ressourcen sollen geschützt sein.

5.8 Vorgehen bei der Ermittlung der Dosis

Im Hinblick auf die Anforderung an die Dichtheit eines Endlagers ist alleine ein Grenz- oder Richtwert der Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung kein eindeutiges Kriterium. Von größerer Bedeutung ist das Modell, mit dem die Dosis ermittelt wird. Modelle, die für die Dosisberechnung durch den Betrieb kerntechnischer Anlagen verwendet werden, weisen im internationalen Vergleich sehr unterschiedliche Konservativitäten von Modellannahmen und Parameterwerten auf. Große Unterschiede gibt es auch innerhalb der Länder der Europäischen Union, beispielsweise zwischen Deutschland und Frankreich oder Großbritannien. Im Endresultat können je nach Maß der Konservativität der Dosisermittlung um Größenordnungen verschiedene Strahlenexpositionen bei gleichen Freisetzungen radioaktiver Stoffe in die Biosphäre errechnet werden.

Für die Nachbetriebsphase eines Endlagers gibt die deutsche Strahlenschutzverordnung keinen Dosisgrenz- oder -richtwert für Personen der Bevölkerung vor. Auch ein Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Dosis aus der sich in der Langzeitsicherheitsanalyse ergebenden Kontamination der Biosphäre ist, anders als für den Betrieb kerntechnischer Anlagen, in Deutschland nicht verbindlich festgelegt.

Für die Nachbetriebsphase eines Endlagers sollte die Dosis so weit als möglich realistisch ermittelt werden. Die Ermittlung einer realistischen Dosis stößt allerdings bereits heute, bezogen auf Berechnungen von Auswirkungen von Ableitungen radioaktiver Stoffe durch den Betrieb kerntechnischer Anlagen, an Grenzen. In Deutschland wird daher in diesem Anwendungsbereich für die Planung und Genehmigung bisher ein sehr konservativer Ansatz bei der Modellierung und Parameterfestlegung gewählt /AVV 90/ (neuer Entwurf /AVV 05/). Sehr konservative Annahmen nach /AVV 90/ und /AVV 05/ sind beispielsweise der dauernde Aufenthalt im Freien an der ungünstigsten Einwirkungsstelle in der Umgebung der Anlage und der Bezug aller Lebensmittel (Verzehrmengen entsprechend etwa dem 95. Perzentil der deutschen Bevölkerung) von dieser Einwirkungsstelle. Die konservative Herangehensweise nimmt dabei von den realen Bedingungen in der Umgebung keinen Kredit, was den Vorteil hat, dass kein Zwang besteht, diese Bedingungen über die Betriebszeit weiter zu verfolgen und Berechnungen gegebenenfalls anzupassen. Eine realistischere Modellierung und Parameterwahl erfolgt in Deutschland für die Ermittlung von Freigabewerten, bei deren Unterschreitung radioaktive Stoffe etc. aus dem Geltungsbereich des Atomgesetzes, darauf beruhender Rechtsverordnungen sowie verwaltungsbehördlicher Entscheidungen entlassen werden können.

Im Hinblick auf die radiologische Nachweisführung für die Nachbetriebsphase haben RSK und SSK in /RSK 02, RSK 08/ darauf hingewiesen, dass dazu eine eigene Leitlinie zweckmäßig ist. Es wird dort empfohlen, die zu erstellende Leitlinie unter Berücksichtigung des Charakters des Langzeitsicherheitsnachweises auf die für das Endlager relevanten Expositionspfade zu begrenzen.

Bei einer prognostischen Dosisermittlung für Personen, die in extrem ferner Zukunft leben, stößt die Festlegung realistischer Lebensgewohnheiten, aber auch anderer relevanter Parameterwerte, auf besondere Probleme. Dies soll an folgenden Faktoren beispielhaft verdeutlicht werden:

- Transferfaktoren radioaktiver Stoffe in als Nahrungsmittel verwendeten Biomedien, die u. a. von Eigenschaften des Bodens abhängen, können sich über längere Zeiträume durch natürliche oder zivilisatorische Einflüsse verändern.
- Die als Nahrungsmittel verwendeten Biomedien variieren auch heute in verschiedenen Kulturkreisen stark und können sich darüber hinaus schon innerhalb weniger Jahrtausende durch natürliche genetische Entwicklung deutlich verändern.

Anhang Strahlenexposition

- Verzehraten verschiedener Lebensmittel unterliegen ebenfalls bereits heute in verschiedenen Kulturkreisen einer großen Variation.
- Anteile der lokal produzierten (kontaminierten) Lebensmittel an der Gesamtversorgung können sich verändern.
- Der Prozess der Zubereitung von Lebensmitteln führt zu einer mehr oder weniger ausgeprägten Dekontamination der Lebensmittel. Der übliche Zubereitungsprozess kann erheblichen langfristigen Änderungen unterliegen.

Verbindlich festzulegen ist auch, wie die Person oder Personengruppe definiert wird, für die ein (noch festzulegender) Dosiswert eingehalten sein soll. Die Person, für die in Deutschland die Dosisgrenzwerte durch den Betrieb kerntechnischer Anlagen eingehalten werden müssen, wird als „Referenzperson“ bezeichnet. Es handelt sich dabei um keine reale Person, sondern eine Person, deren wesentliche Lebensgewohnheiten in der Strahlenschutzverordnung festgelegt sind. Es gibt Länder, in denen die Festlegungen nicht einheitlich getroffen sind, sondern grundsätzlich standortspezifische Betrachtungen erfolgen (z. B. Frankreich, Großbritannien). Dabei wird eine tatsächlich existierende „kritische Gruppe“ der Bevölkerung (Gruppe mit der höchsten individuellen Strahlenexposition) ermittelt und für diese die Dosis bestimmt.

In /ICR 07/ werden für zu schützende repräsentative Person die folgenden Randbedingungen und Vorgehensweisen empfohlen:

- Die Lebensgewohnheiten müssen vernünftig, tragfähig und ausgewogen festgelegt sein.
- Es können zunächst einfache deterministische Modelle angewandt und in einem iterativen Prozess untersucht werden, welche Expositionspfade und Bereiche relevant sind, um für diese die Modellierung differenzierter auszugestalten.
- Es wird eine Personengruppe identifiziert, von der erwartet wird, dass sie die höchste Dosis erhält. Die mittleren Eigenschaften der Personen dieser Gruppe werden herangezogen, um die Dosis des repräsentativen Individuums abzuschätzen.
- Das so ermittelte hypothetische Individuum soll für höchstens einige zehn Personen repräsentativ sein. Es sollen nicht Lebensgewohnheiten einer einzelnen Person abgedeckt werden (außer wenn eine solche Person bekannt ist und davon ausgegangen werden kann, dass sie ihre Gewohnheiten beibehält).

Trotz der Schwierigkeit der Ermittlung einer realistischen Dosis für in ferner Zukunft lebende Personen sollte dies nicht dazu führen, konservative Ansätze in der Dosisermittlung zu wählen. Die bei der Dosisermittlung bestehenden Unsicherheiten unterstreichen vielmehr die relativ untergeordnete Bedeutung eines Dosiskriteriums. Eine zu konservative Dosisermittlung wäre auch nicht notwendigerweise sicherheitsgerichtet, da sie in einem Endlagerauswahlverfahren wegen einer nicht gerechtfertigten Überbetonung des Dosiskriteriums dazu führen könnte, dass nicht der geeignetste Standort für ein Endlager ausgewählt würde. RSK und SSK empfehlen in /RSK 08/ Parameterwerte so realistisch wie möglich oder im Sinne bester Schätzwerte anzusetzen und ein standardisiertes Biosphärenmodell festzulegen.

5.9 Gewährleistung des Schutzes der Umwelt in der Nachbetriebsphase

Die bisherigen Erkenntnisse über Strahlenwirkungen auf die belebte Umwelt (z. B. /ERI 07, FAS 04/) zeigen, dass die Umwelt dort geschützt ist, wo auch der Mensch geschützt ist. Dies hängt zum Einen mit der im allgemeinen sehr viel geringeren Empfindlichkeit von Tieren und Pflanzen gegenüber ionisierender Strahlung zusammen. Zum Anderen unterscheidet sich auch das Schutzziel, da beim Schutz von Tieren und Pflanzen nicht der Schutz eines Individuums vor gesundheitlichen Auswirkungen angestrebt wird, sondern das Fortbestehen einer Population und der Erhalt der Artenvielfalt.

Sofern ein geologisches Endlager an einem Standort eingerichtet wird, der von Menschen besiedelt ist oder zumindest besiedelt werden kann, ergeben sich keine zusätzlichen Anforderungen aus dem Schutz der Umwelt, da dieser durch den zu gewährleistenden Schutz des Menschen abgedeckt ist. Für alle in Deutschland denkbaren Standorte eines Endlagers ist eine menschliche Besiedlung der Umgebung zu berücksichtigen.

Zusätzliche Untersuchungen zum Schutz der Umwelt würden dann erforderlich, wenn ein Endlager an einem Standort geplant würde, an dem Auswirkungen auf Menschen nicht möglich wären oder erst nach einem längeren Transport radioaktiver Stoffe innerhalb der Biosphäre eintreten können, die belebte Natur aber dennoch einer Strahlenexposition ausgesetzt würde (z. B. bei einer Endlagerung in der Antarktis).

6 Zusammenfassende Schlussfolgerungen

Abfallgebinde eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle enthalten ein großes Inventar radioaktiver Stoffe in hoher Konzentration. Daher sind im Betrieb Maßnahmen zum Schutz vor der davon ausgehenden Strahlung für Personal sowie Bevölkerung im normalen Betrieb sowie bei Störfällen erforderlich.

Hohe Anforderungen an die Begrenzung der Dosisleistung von Abfallgebinden, an deren äußere Kontamination, an deren Dichtigkeit sowie an ihre Widerstandsfähigkeit von unfallbedingten Einwirkungen bestehen schon für deren Zwischenlagerung und die Beförderung zum Endlager. Darauf aufbauend sind weitere Schutzmaßnahmen im Endlager möglich.

Im normalen Betrieb entweichen aus den Abfallgebinden keine radioaktiven Stoffe, so dass sich die Schutzmaßnahmen auf den Schutz vor Direktstrahlung konzentrieren müssen. Die von den Abfallgebinden ausgehende Direktstrahlung muss gegenüber dem Betriebspersonal soweit abgeschirmt sein, dass dessen Dosis ausreichend begrenzt ist. Entsprechendes wird auch durch fernbediente und automatisierte Abläufe im Endlager erreicht.

Die Abfallgebinde müssen so beschaffen sein, dass auch bei Störfällen nur ein so geringer Teil an radioaktiven Stoffen aus den betroffenen Gebinden und dem Endlager entweichen kann, dass die Störfallplanungswerte eingehalten sind. Das Endlager ist daher so auszulegen, dass nur ein minimaler Bruchteil (weit weniger als ein Milliardenstel) des radioaktiven Inventars störfallbedingt freigesetzt werden kann.

Für die Nachbetriebsphase ist die Isolation der Abfälle entscheidend, während die Ermittlung einer möglichen Strahlenexposition die Funktion eines Sicherheitsindikators erfüllt. Im Hinblick auf die Höhe der zulässigen Dosis sowie auf das zu deren Ermittlung anzuwendende Berechnungsverfahren gibt es in Deutschland eine Reihe von Empfehlungen (0,1 mSv effektive Dosis im Jahr bei der wahrscheinlichen Entwicklung und 1 mSv effektive Dosis im Jahr bei weniger wahrscheinlichen Entwicklungen), aber noch keine verbindliche Festlegung. Festzulegen ist ebenfalls noch die Modellierung, mit der der Nachweis der Einhaltung des Dosiskriteriums erreicht werden soll. Diese soll möglichst realistische Parameterwerte aufweisen.

Anhang Strahlenexposition

Die Verwendung eines Risikoäquivalents bei der Beurteilung der radiologischen Auswirkungen eines Endlagers ist nicht erforderlich, dosisbasierte Prüfwerte sollten aber auch auf Basis der Kenntnisse zum Strahlenrisiko abgeleitet sein.

7 Literatur

Hinweis: Dieses Literaturverzeichnis enthält alle in diesem Anhang zitierte Literatur.

- /AVV 90/ Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen, 21.2.1990, Bundesanzeiger Nr. 64 a
- /AVV 05/ Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen. – Entwurf, Stand 13.05.2005
- /COS 99/ Council of State: Government Decision on the safety of disposal of spent nuclear fuel. - 25.03.1999, Decision 478/1999; Helsinki 1999
- /ERI 07/ Environmental Risk from Ionising Contaminants: Assessment and Management (ERICA). Projekt des sechsten Rahmenprogramms der EU, Contract No. FI6R-CT-2004-508847 (<http://www.ERICA-project.org/>)
- /FAS 04/ Framework for the Assessment of Environmental Impact (FASSET): Final Report. - Projekt des fünften Rahmenprogramms der EU, Contract No. FIGE-CT-2000-00102; Stockholm, Mai 2004
- /HSK 93/ Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK): Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. - Richtlinie für schweizerische Kernanlagen, HSK-R-21/d; Villigen, November 1993
- /ICR 98/ 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; 1998

Anhang Strahlenexposition

- /ICR 07/ International Commission of Radiological Protection (ICRP): Assessing Dose of The Representative Person for the Purpose of Radiation Protection of The Public and the Optimisation of Radiological Protection. – ICRP Publication 101, 2007
- /RSK 02/ Reaktor-Sicherheitskommission (RSK), Strahlenschutzkommission (SSK): Gemeinsame Stellungnahme der RSK und der SSK betreffend BMU-Fragen zur Fortschreibung der Endlager-Sicherheitskriterien. - Stellungnahme der RSK und SSK, verabschiedet in der 182. Sitzung der SSK am 04.-06. Dezember 2002
- /RSK 08/ Reaktor-Sicherheitskommission/Strahlenschutzkommission (RSK/SSK): Stellungnahme zu den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen. - Veröffentlichung vorgesehen.
- /SSK 03/ Strahlenschutzkommission (SSK): Störfallberechnungsgrundlagen zu § 49 StrlSchV Neufassung des Kapitels 4: Berechnung der Strahlenexposition, Empfehlung SSK, verabschiedet in der 186. Sitzung der SSK am 11. September 2003
- /SSI 98/ Statens strålskyddsinstitut (SSI): The Swedish Radiation Protection Institute's Regulations on the Protection of Human Health and the Environment in connection with the Final Management of Spent Nuclear Fuel and Nuclear Waste. - SSI FS 1998:1; Stockholm 28.09.1998
- /SSV 01/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierenden Strahlen (StrlSchV - Strahlenschutzverordnung), vom 20. Juli 2001, BGBl. I Nr. 38 vom 26.07.2001, S. 1714; zuletzt geändert durch Artikel 3 § 15 des Gesetzes vom 13. Dezember 2007 (BGBl. I, Nr. 65, S. 2930)

8 Weiterführende Literatur

Hinweis: Dieses Verzeichnis enthält als Ergänzung wichtige weiterführende Literatur zum Thema dieses Anhangs, die in diesem Anhang nicht explizit zitiert wurde. Zitierte Literatur findet sich im Literaturverzeichnis.

Bundesamt für Strahlenschutz: Plan Endlager für radioaktive Abfälle Schachanlage Konrad Salzgitter; 9/86 in der Fassung 4/90

Bundesamt für Strahlenschutz: Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle – Wirtsgesteine im Vergleich. – Synthesebericht BfS-17/05, Salzgitter, November 2005

International Atomic Energy Agency: Geological Disposal of Radioactive Waste. – Safety Requirements No. WS-R-4, Wien, 2006

Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra): Projekt Opalinuston – Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers – Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. – Wettingen, Dezember 2002 (Kapitel 6 „Betriebssicherheit und Strahlenschutz“)

OECD/Nuclear Energy Agency: Post-Closure Safety Case for Geological Repositories – Nature and Purpose. – NEA-3679, Paris 2004

Reaktor-Sicherheitskommission: RSK-Stellungnahme zum Synthesebericht des BfS „Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle – Wirtsgesteine im Vergleich“. – 13.09.2006 (395. Sitzung)