

Sicherung in der Endlagerung

Sicherung in der Endlagerung

Ole Gerber

Juni 2021

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) unter dem Förderkennzeichen 4718R01611 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des BMU übereinstimmen.

Deskriptoren

Anlagensicherung, Endlager, Endlagersicherung, Kernbrennstoffe, Regelwerk, Schutzziele, Sicherung

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Überblick Endlagerung.....	3
3	Internationales Regelwerk	5
4	Bestehende Sicherungskonzepte in Deutschland	9
4.1	Entsorgungskonzept in Deutschland.....	10
4.2	Beispiel Konrad	11
4.3	Beispiel Asse II	12
4.4	Beispiel Gorleben	14
4.5	Beispiel Morsleben	15
4.6	Zusammenfassung der Vorgehensweisen	16
5	Internationale Endlagerprojekte	17
5.1	Finnisches Endlager Olkiluoto.....	17
6	Regelungsgrundlagen für die Endlagersicherung	21
6.1	Schutzziele	22
6.1.1	Freisetzung.....	22
6.1.2	Entwendung von Kernbrennstoff.....	24
6.1.3	Freisetzung nach Entwendung.....	25
6.2	Relevante Aspekte.....	25
6.3	Konsequenzen für Regelungen zur Endlagersicherung	29
	Literaturverzeichnis.....	31
	Abbildungsverzeichnis.....	35
	Abkürzungsverzeichnis.....	37

1 Einleitung

Das Vorhaben „Erfassung, Auswertung und Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft, Technik und Erkenntnis zur Sicherung von Kernbrennstoffen“ wurde in /GRS 18/ beschrieben. Der vorliegende Bericht stellt eine Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse der in Arbeitspaket 1 (AP 1) des Vorhabens angesiedelten Thematik des Standes von Wissenschaft, Technik und Erkenntnis hinsichtlich der Sicherung von Endlagern dar.

Nach dem Atomgesetz (AtG) ist es für kerntechnische Anlagen eine Genehmigungsvoraussetzung, dass der erforderliche Schutz gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD) gewährleistet ist. Diese Voraussetzung des Schutzes gegen SEWD gilt auch für Endlager.

Die Suche nach einem Endlager für hochradioaktive Abfälle wurde mit dem Standortauswahlgesetz auf eine gesetzliche Grundlage gestellt. Die technische und planerische Kompetenz für die Endlagerung wurde mit der Schaffung der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) mbH gebündelt. Das Verfahren der Auswahl eines Standortes zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle hat begonnen.

Für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen und anderen radioaktiven Abfällen soll der Sicherheitsbedarf für relevante Endlagerkonzepte auf der Ebene von generischen, standortunabhängigen Anforderungen an die Sicherung und zugehörigen geeigneten Sicherungsmaßnahmen, auch unter Berücksichtigung internationaler Konzepte und Erfahrungen, ermittelt werden. Für den Schutz der Endlager gegen SEWD fehlt bisher eine über den Einzelfall hinausgehende Entwicklung und Bewertung möglicher, vom jeweiligen Endlagerkonzept abhängiger generischer Sicherheitskonzepte.

In diesem Bericht werden die Arbeiten und Resultate des Vorhabens dargestellt. In Kapitel 2 wird ein Überblick über Konzepte für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle gegeben. Die Ergebnisse von Recherchen im internationalen Regelwerk zu den Grundlagen für die Sicherung von Endlagern werden in Kapitel 3 dargestellt. Ergänzend werden in Kapitel 4 bestehende und ehemalige Sicherheitskonzepte von Endlagern in Deutschland betrachtet. Da sich in anderen Ländern bereits Endlager für hochradioaktive Abfälle in Planung und Bau befinden, wird in Kapitel 5 am Beispiel von Finnland das dort vorgesehene allgemeine Sicherheitskonzept dargelegt und untersucht, welche As-

pekte sich auf Endlagerkonzepte in Deutschland übertragen lassen. Abschließend erfolgt in Kapitel 6 auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen und den in diesem Bericht dargestellten Sachverhalten eine Bewertung der für die Sicherung von Endlagern relevanten Aspekten. Darauf folgt eine ergänzende Einschätzung dazu, wie auf Grundlage der aufgeführten Erkenntnisse das weitere Vorgehen bei der Entwicklung eines Regelwerks zur Endlagerung aussehen könnte beziehungsweise welche Aspekte hierbei beachtet werden sollten.

2 Überblick Endlagerung

Die folgenden Informationen zum Überblick über die Anforderungen und Konzepte zur Endlagerung hochradioaktiver Materialien stammen aus /GRS 09/. Die Anforderungen an die Endlagerung radioaktiver Abfälle unterscheiden sich abhängig von der Halbwertszeit, der Radioaktivität und der damit verbundenen Zerfallswärme der Abfälle. Um den verschiedenen Anforderungen gerecht zu werden, gibt es eine Einteilung der radioaktiven Abfälle in Klassen. Diese Klassifizierung unterscheidet sich je nach Land und Institution. Eine Unterscheidung zwischen schwach- und mittelradioaktiven sowie hochradioaktiven Abfällen oder eine zweiteilige Unterscheidung zwischen wärmeerzeugenden Abfällen und Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeerzeugung ist dabei üblich. In diesem Bericht werden Sicherheitsberichte und Erkenntnisse bezüglich der Endlagerung von unterschiedlichen Arten von radioaktiven Abfällen mit einbezogen. Mit Blick auf eine Nutzung der in diesem Bericht dargestellten Erkenntnisse für die Entwicklung des Regelwerks liegt der Fokus auf den hochradioaktiven beziehungsweise wärmeerzeugenden Abfällen, bei denen es sich zumeist um konditionierte Abfälle aus Wiederaufbereitungsanlagen oder abgebrannte Brennelemente handelt. Konditionierte Brennelemente sind Kernbrennstoff enthaltende Bauteile, welche in einen chemisch stabilen und möglichst wasserunlöslichen Zustand überführt wurden. Durch dieses Verfahren werden die bei der Endlagerung auftretenden Risiken minimiert.

Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle stellt eine Herausforderung aufgrund des Gefahrenpotentials dar. Dieses ergibt sich aus der Gesundheits- und Umweltgefährdung sowie der Langlebigkeit der Abfälle. Darüber hinaus besteht bei Kernmaterial die Gefahr von SEWD hinsichtlich der Proliferation und, wie auch bei jeglicher Art von radioaktiven Stoffen, durch Einwirkungen vor Ort oder durch anderweitige missbräuchliche Nutzung beziehungsweise Freisetzung nach einer Entwendung. Daher ist eine dauerhafte, sichere und gesicherte Entsorgungsstrategie erforderlich. Die zentrale Anforderung an eine nachhaltige Entsorgung ist die Isolation gegenüber Menschen und Umwelt. Als Endlagerkonzept, welches diese Anforderungen erfüllen kann, hat sich weltweit die geologische Tiefenlagerung durchgesetzt.

Durch die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen soll der sichere Einschluss der Abfälle zur Ver- und Behinderung von Radionuklidfreisetzungen gewährleistet werden. Außerdem soll durch die schwere Erreichbarkeit eine Vorsorge gegen die Möglichkeit von unbeabsichtigtem menschlichem Eindringen in das Endlager und die damit verbundenen Auswirkungen gegeben sein. Im Sinne einer Synergie von Sicherheits- und

Sicherungsmaßnahmen bietet ein solches Konzept gleichzeitig auch einen Schutz gegen SEWD.

Als Wirtsgestein für Endlager sind verschiedene Gesteinsarten in der Diskussion, wobei vor allem Steinsalz, Ton und Kristallingestein in Frage kommen. Die Anforderungen an das Gestein sind dabei die Isolation der Radionuklide über sehr lange Zeiträume sowie ein sicherer Bau, Betrieb und Verschluss des Endlagers. Die physischen Eigenschaften des Gesteins sowie die Lage und Struktur der gesamten Gesteinsschicht sind dabei ausschlaggebend.

In den meisten Ländern ist die Rückholbarkeit der hochradioaktiven Abfälle eine weitere Kategorie, welche bei der Endlagerung beachtet werden muss. So müssen abhängig vom Endlagerkonzept die hochradioaktiven Abfälle in einer definierten Anfangszeit ohne unverhältnismäßig großen Aufwand rückholbar sein. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass zukünftige Generationen variabel auf neuste Erkenntnisse zur Endlagerung sowie weitere Änderungen des Stands von Wissenschaft und Technik reagieren können.

Insgesamt sind die größten Herausforderungen bezüglich der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle, nach der Lokalisierung geeigneter Gesteinsformationen, die Gewährleistung der Rückholbarkeit für einige hundert Jahre und der anschließende sichere Verschluss für bis zu eine Million Jahre.

3 Internationales Regelwerk

Während letztendlich die Verantwortung für die nukleare Sicherung bei einem Staat selbst liegt, besteht die Notwendigkeit einer regionalen und internationalen Zusammenarbeit bei Fragen der Sicherung aufgrund internationaler Transporte und globaler Vernetzungen. Seit Anfang der 70er Jahre spielt die Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) als autonome Organisation innerhalb des Systems der Vereinten Nationen (UN) eine immer größere Rolle bei diesen Thematiken. Die IAEO unterstützt Staaten auf Anfrage dabei, ihre nationalen Rechtsstrukturen und physischen Schutzsysteme zu stärken. Außerdem werden regionale und internationale Bemühungen zur Verbesserung der nuklearen Sicherung, einschließlich Maßnahmen zum Schutz vor Nuklearterrorismus, durch die supranational agierende IAEO erleichtert. So entstand ein internationaler Rechtsrahmen für die nukleare Sicherung und ein darauf aufbauendes Regelwerk.

Das IAEO-Regelwerk enthält zum jetzigen Zeitpunkt keine Dokumente, welche sich spezifisch mit der Sicherung von Endlagern auseinandersetzen. Die generelle Handhabung von radioaktiven Abfällen wird jedoch in verschiedenen Dokumenten thematisiert. Daher werden die sich daraus ergebenden Konsequenzen für die Endlagerung näher betrachtet.

In der IAEO-Publikation zu den generellen Zielen bei der Handhabung von radioaktivem Abfall Nuclear Energy Series (NES) NW-0 /IAE 11a/ wird die Relevanz der Sicherung herausgestellt. Hochradioaktive Quellen und abgebrannte Kernbrennstoffe stellen ein potenzielles Ziel für terroristische und kriminelle Gruppen dar, welche diese mit schädlicher Absicht verwenden könnten. Die Themen verstärkter Kontroll-, Buchhaltungs- und Sicherungsmaßnahmen werden daher in einem umfangreichen IAEO-Regelwerk der Sicherung, den Nuclear Security Series (NSS), in Form von Grundsätzen (Fundamentals), Empfehlungen (Recommendations), Umsetzungs-Anleitungen (Implementing Guides) und Leitlinien (Technical Guidance) behandelt. Dieser Aufbau, der als eine Art Regelwerkspyramide betrachtet werden kann, ist in Abb. 3.1 dargestellt. Die Inhalte dieser Veröffentlichungen basieren auf einer Reihe grundlegender Sicherungsprinzipien und einer Methodik, die die Folgen sicherungsrelevanter Ereignisse in Bezug auf die Einschätzung des Staates zur aktuellen Bedrohungslage berücksichtigt. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei ein integriertes Konzept von Sicherheits- und Sicherungsmaßnahmen, so dass diese sich nicht gegenseitig beeinträchtigen, sondern sich durch Synergieeffekte soweit wie möglich gegenseitig unterstützen und verstärken.

Im internationalen Regelwerk wird hauptsächlich die Entsorgung von radioaktivem Abfall im Allgemeinen thematisiert. Auf die Sicherung von Endlagern mit hochradioaktiven Abfällen wie etwa abgebrannten Brennelementen wird nicht explizit eingegangen. Insbesondere in Deutschland werden die abgebrannten Brennelemente, nachdem sie zum Abklingen der Radioaktivität und Wärmeproduktion zwischengelagert wurden, konditioniert. Die grundlegenden Anforderungen, die an so behandelte Abfälle gestellt werden, können aus den grundlegenden Anforderungen für radioaktive Abfälle im Allgemeinen abgeleitet werden.

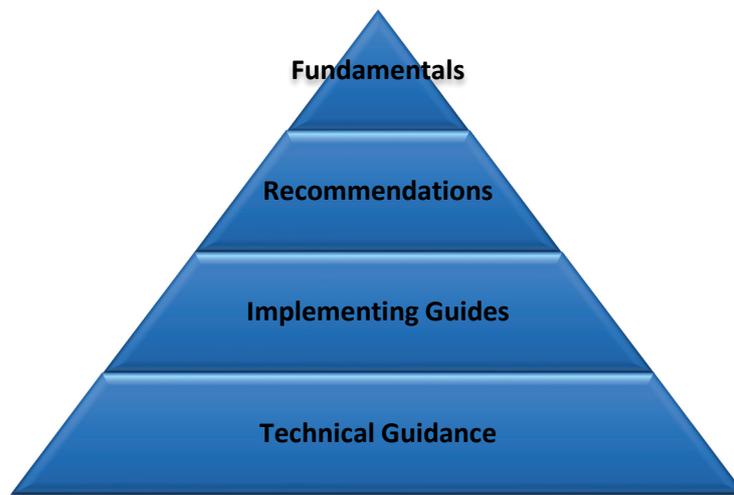


Abb. 3.1 Schematische Darstellung der Regelwerkspyramide der IAEA zur Sicherung radioaktiver Stoffe

Das IAEA-Regelwerk NSS lässt sich, neben grundlegenden Vorgaben wie dem „Code of Conduct“ /IAE 04/, als eine Regelwerkspyramide auffassen. Wobei die Grundlagen mit „Objective and Essential Elements of a State’s Nuclear Security Regime“ NSS 20 /IAE 13/ die Spitze bilden, auf der die Anforderungen sowie die spezielleren Umsetzungs-Anleitungen und Leitlinien aufbauen. Hierbei sind für die Sicherung von radioaktiven Abfällen auf Ebene der Anforderungen vor allem „Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Facilities“ NSS 13 /IAE 11b/ und „Nuclear Security Recommendations on Radioactive Material and Associated Facilities“ NSS 14 /IAE 11c/ relevant. Auf Ebene der Umsetzungs-Anleitungen sind das vor allem die Teile „Security of Radioactive Material in Use and Storage and of Associated Facilities“

NSS 11-G /IAE 19/¹ für alle radioaktiven Stoffe sowie “Physical protection of nuclear material and nuclear facilities” NSS 27-G /IAE 18/ für Kernmaterial.

Die IAEA definiert in NSS 13 /IAE 11b/ Entwendung (zur Herstellung einer kritischen Anordnung), Freisetzung vor Ort und Freisetzung an einem anderen Ort nach Entwendung als die drei Risikotypen bezüglich SEWD. Die Kategorisierung erfolgt für die Aspekte Sabotage, also Einwirkungen mit dem Ziel einer Freisetzung, und Entwendung mit dem Ziel der Herstellung einer kritischen Anordnung separat, wobei das daraus resultierende Sicherungssystem beide Kategorien integrieren soll. Die Kategorisierung bezüglich Entwendung, basierend auf Anhang II des „Übereinkommen vom 26. Oktober 1979 über den physischen Schutz von Kernmaterial“ /IAE 79/, benennt drei Kategorien. Bestrahlter Kernbrennstoff wird hierbei grundsätzlich der Kategorie II zugeordnet. Diese Kategorisierung für bestrahlte Kernbrennstoffe wird als Empfehlung angegeben, die es den Staaten unter Berücksichtigung der jeweiligen Umstände freistellt, eine andere Kategorie des physischen Schutzes anzuwenden. In /IAE 18/ wird diese Kategorisierung näher erläutert: Die Strahlung von bestrahltem Brennstoff beträgt ohne Abschirmung in einem Meter Abstand in der Regel mehr als 1 Gy/h, so dass aufgrund der Eigengefährdung durch den Täter immer eine Abstufung von Kategorie I möglich ist. Der Aspekt Freisetzung wird auf Grundlage einer Analyse der Konsequenzen einer Freisetzung bewertet. Damit ergeben sich getrennte Sicherheitsanforderungen bezüglich Entwendung und Freisetzung. Die Sicherheitsmaßnahmen werden darauf basierend jedoch in einem integrierten Konzept ausgelegt, bei dem die jeweils strengeren Anforderungen als Maßstab gelten.

Die Anforderungen an die Sicherung von radioaktiven Abfällen sind in NSS 11-G /IAE 19/ und speziell für abgebrannte Kernbrennstoffe in NSS 13 /IAE 11b/ und NSS 27-G /IAE 18/ näher beschrieben. Die IAEA teilt den radioaktiven Abfall in folgende drei generelle Kategorien ein: hoch- (HAW), mittel- (MAW) und schwachradioaktive Abfälle (LAW). Aus diesen Kategorien lassen sich die Anforderungen an die Sicherung auf Basis von Sicherungsstufen ableiten. Durch die Eigenschaften der Form und Verpackung von radioaktiven Abfällen lässt sich eine Reduzierung der zugewiesenen Siche-

¹ Aktuelle Revision von “Security of Radioactive Sources” NSS 11 /IAE 09/ und dessen vorläufiger Überarbeitung NST048 „Security of radioactive material in use and storage and of associated facilities“ /IAE 16/.

rungsstufe rechtfertigen, da die Eigenschaften des Materials eine Senkung der Attraktivität für SEWD bewirken können. Vor allem die Rückholbarkeit, die Anfälligkeit für Verbreitung sowie die Art des Abfallbehälters spielen hier eine Rolle. Radioaktive Stoffe können in einer festen Abfallmatrix (z.B. einem Betonblock) enthalten sein, was die Rückholbarkeit stark einschränkt. Radioaktive Abfälle, die in einer Abfallmatrix enthalten sind, sind nicht ohne weiteres anfällig für Verbreitung. Bestimmte Arten von Abfallbehältern haben zusätzliche Anforderungen an das Gewicht, was die Entwendung der radioaktiven Abfälle erschwert, da sie den Einsatz von schwerem Gerät und viel Zeit erfordern.

Gemäß NSS 11-G /IAE 19/ können sich, je nach den behördlichen Anforderungen und der Infrastruktur des Staates, radioaktive Abfälle in der Zwischenlagerung am Standort der Kernkraftwerke, in einem dafür vorgesehenen Zentrallager oder in einer zentralen Entsorgungseinrichtung befinden. Innerhalb einer Entsorgungsanlage gibt es typischerweise zwei Hauptbereiche: (1) einen Betriebsbereich, der aktiv Abfälle aufnimmt und die Abfälle einlagert, und (2) einen Bereich für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Radioaktive Abfälle im Betriebsbereich sollten auf dem gleichen Sicherungsniveau wie radioaktive Stoffe an anderen Orten geschützt werden. Im Gegensatz dazu beinhalten radioaktive Abfälle, die im Bereich für die Endlagerung deponiert werden, oft von Natur aus eine oder mehrere physische Barrieren und haben eine sehr begrenzte Anzahl an Zugangspunkten. So könnte beispielsweise ein Täter, der versucht, radioaktive Abfälle aus einem Endlager oder Bohrloch zu entfernen, leichter erkannt werden. Infolgedessen können abgeschwächte Sicherungsmaßnahmen im Vergleich zu einer oberirdischen Lagerung ausreichend sein. Die Genehmigungsbehörde kann auch einen anderen Ansatz für die Zuweisung einer Sicherungsstufe für radioaktive Abfälle in einem Entsorgungsgebiet beziehungsweise -anlage anwenden, da die radioaktiven Abfälle, die sich im Entsorgungsgebiet befinden, möglicherweise nicht attraktiv für eine Entwendung durch Täter sind. In diesem Fall kann die Genehmigungsbehörde beschließen, Sicherungsniveaus festzulegen, indem sie das Potenzial für eine radiologische Kontamination nach einer möglichen Sabotage eines Lagers für radioaktive Abfälle berücksichtigt.

4 Bestehende Sicherungskonzepte in Deutschland

In Deutschland gibt es mit der Schachanlage Asse II und dem Endlager Morsleben zwei Bergwerke, in denen bereits schwach- und mittelradioaktive Abfälle eingelagert wurden. Im Jahr 2007 wurde außerdem das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) beauftragt, den Schacht Konrad zu einem Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle auszubauen. Für hochradioaktive Abfälle wurde die Suche nach einem Endlager begonnen, welche bis zum Jahre 2031 abgeschlossen sein soll. Eine nationale Richtlinie zur Sicherung von Endlagern gegen SEWD existiert bisher nicht, soll aber erstellt werden. Bei der Untersuchung der Lage in Deutschland sind daher insbesondere der Umgang mit bestrahltem Kernbrennstoff, die Sicherung von Zwischenlagern gegen SEWD und bestehende Sicherungskonzepte für Endlager mit leicht- und mittelradioaktiven Abfällen relevant.

In Deutschland werden radioaktive Abfälle zum einen nach ihrer radiologischen Relevanz in schwach-, mittel- und hochradioaktive Abfälle untergliedert, aber zum anderen auch nach ihrer Wärmeentwicklung. So stellt eine hohe Wärmeentwicklung eine zusätzliche Belastung für das Wirtsgestein eines Endlagers dar. Es wird daher zwischen wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung unterschieden. Bei Letzteren handelt es sich um alle schwachradioaktiven sowie einen Großteil der mittelradioaktiven Abfälle. Bei wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen handelt es sich um einen Teil der mittelradioaktiven Abfälle sowie die hochradioaktiven Abfälle, zu denen abgebrannter Kernbrennstoff und aus Wiederaufbereitungsanlagen stammende Materialien zählen.

Das Einteilen in Sicherungskategorien für Kernmaterial erfolgt in Deutschland anders als dies bei der IAEA der Fall ist. So werden in Deutschland von vornherein die beiden Aspekte Entwendung und Freisetzung zusammen betrachtet, um darauf basierend eine Kategorisierung vorzunehmen. Die gemeinsame Sicherungskategorie wird damit durch den Aspekt mit dem größten Gefahrenpotential bestimmt.

In der „Richtlinie zur Sicherung von Zwischenlagern gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD)“ /BMU 12/ wird auf die im Anhang II des „Übereinkommen vom 26. Oktober 1979 über den physischen Schutz von Kernmaterial“ /IAE 79/ angegebene Kategorisierung verwiesen. Die dort angeführte Kategorisierung der Kernbrennstoffe wird gemeinsam mit der Bewertung des Gefahrenpotentials hinsichtlich einer möglichen Freisetzung nach SEWD kombiniert.

4.1 Entsorgungskonzept in Deutschland

Um eine Übertragbarkeit von bestehenden Sicherungskonzepten auf ein Endlager in Deutschland prüfen zu können, müssen die grundlegenden Rahmenbedingungen des Entsorgungskonzepts in Deutschland betrachtet werden. Dieses Entsorgungskonzept basiert zunächst auf einer Optimierung der Sicherheit, hat jedoch auch starke Auswirkungen auf ein mögliches Sicherungskonzept. Die wesentlichen Aspekte des Entsorgungskonzepts in Deutschland werden auf Grundlage von /GRS 09/, /KOM 16/ und /BGE 20/ in diesem Unterkapitel kurz aufgeführt und im weiteren Bericht teilweise detaillierter betrachtet.

Die vier grundlegenden Prinzipien des deutschen Entsorgungskonzepts für hochradioaktive Abfälle sind Konzentration, Isolation, Nachsorgefreiheit und der Verschluss in großer Tiefe. Eine Isolation soll durch geologische, technische und geotechnische Barrieren realisiert werden, die unter anderem wasserundurchlässig sind. Für die geologischen Barrieren werden in Deutschland Steinsalz, Kristallingestein und Tonstein als geeignete Gesteinsarten untersucht, welche zwischen 300 m und 1500 m unter Tage liegen. Der Einschluss der Abfälle soll über einen Nachweiszeitraum von einer Million Jahren in einem Bergwerk, welches sich in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich befindet, gewährleistet werden. Jedoch muss während der Betriebszeit des Endlagers die Rückholbarkeit der radioaktiven Abfälle möglich sein. Im Notfall müssen die Behälter auch bis zu 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers rückgeholt werden können. All diese Maßnahmen basieren auf den allgemeinen Schutzziele, welche einen zeitlich unbegrenzten Schutz von Menschen und Umwelt sowie keine unzumutbaren Lasten heutiger und zukünftiger Generationen gewährleisten sollen.

Welche Behältertypen für die Endlagerung verwendet werden, steht zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht fest. Jedoch sind vor allem zwei Behältertypen mit einer jeweils danach angepassten Lagerungsmethode in der Diskussion. Zum einen Kokillen, welche in Bohrlöchern innerhalb des Stollens eingelagert werden. Die hochradioaktiven Abfälle aus Wiederaufbereitungsanlagen liegen bereits in der Form von Glaskokillen vor. Diese wurden erzeugt, indem der Abfall in Edelstahlbehälter verfüllt und verglast wurde. Bei dieser Lagerungsmethode ergeben sich jedoch starke Probleme bezüglich der Gewährleistung der Rückholbarkeit. Die andere Entsorgungsmöglichkeit ist die Streckenlagerung in POLLUX-Behältern. Hierbei würden die hochradioaktiven Abfälle in Behälter, welche innen aus Schmiedestahl und außen aus Gusseisen mit Kugelgraphit bestehen, eingefüllt.

Die mehr als 65 t schweren POLLUX-Behälter würden anschließend in einer Kaverne gelagert werden. /GRS 09/

Bei Betrachtung der im Regelwerk der Sicherung üblichen allgemeinen Schutzziele „Freisetzung“ (von radioaktiven Stoffe vor Ort), „Entwendung“ (von Kernbrennstoffen) und „Freisetzung nach Entwendung“ (von radioaktiven Stoffe an einem anderen Ort), wird ersichtlich, dass diese für das in Deutschland erdachte Konzept der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen aufgrund der Grundvoraussetzungen andere Konsequenzen für die Sicherung ergeben. Insbesondere aufgrund der Tiefenlagerung sowie der Abfallbehandlung wird die Entwendung stark erschwert und die Möglichkeit als auch die Folgen einer Freisetzung vor Ort verringert. Weitere Betrachtungen zu den Konsequenzen für die Sicherung auf Grundlage der Rahmenbedingungen der Endlagerung in Deutschland erfolgen in Kapitel 6.

4.2 Beispiel Konrad

Das Genehmigungsverfahren für das Endlager Konrad in Salzgitter in Form eines atomrechtlichen Planfeststellungsverfahrens wurde im Jahre 1995 begonnen. Nachdem dieses im Jahr 2002 abgeschlossen war, beauftragte das Bundesumweltministerium (BMU) im Jahr 2007 das BfS mit der Einrichtung des Schachts Konrad, in den schwach- und mittelradioaktive Abfälle eingelagert werden sollen. Der Umbau des ehemaligen Eisenerzbergwerks findet momentan (2021) statt und ist für die Lagerung von bis zu 303.000 Kubikmetern radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung genehmigt.



Abb. 4.1 Bauarbeiten für das Endlager Konrad an der Schachtanlage 2 mit dem Förderturm²

² Quelle: BGE Magazin Einblicke, <https://einblicke.de/geschichte>, Abgerufen: 17.03.2021

Im „Plan Sicherung“ /BFS 97/ wird zunächst festgestellt, dass der Planfeststellungsbeschluss für Einrichtung und Betrieb von Anlagen des Bundes gemäß §9a Abs. 3 AtG nur dann erteilt wird, wenn der Schutz gegen SEWD gewährleistet ist. Die Sicherungsmaßnahmen gegen SEWD sind für das Endlager Konrad im Plan Sicherung /BFS 97/ dargelegt. Wie im „Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes Konrad in Salzgitter“ /NMU 02/ aufgeführt wird, decken die im Plan Sicherung behandelten Sicherungsmaßnahmen auch Eingriffe unbefugter Tätergruppen und Einzelpersonen in terroristischer Absicht ab. Die Schutzziele für das Endlager Konrad sind der Schutz vor der Entwendung von Kernbrennstoffen (Entwendung) und vor der Freisetzung einer erheblichen Menge radioaktiver Stoffe durch gewaltsame Einwirkung Dritter (Freisetzung vor Ort) /NMU 02/. Die im Plan Sicherung geplanten Sicherungsmaßnahmen wurden von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) im Jahre 1984 /GRS 84/ begutachtet und in den Jahren 1994 und 2000 bestätigt. Auf Grundlage des im Plan Sicherung /BFS 97/ weiter dargelegten Sachverhaltes orientieren sich gemäß /NMU 02/ die Sicherungsmaßnahmen gegen SEWD an der Kategorie III gemäß Anhang II des „Übereinkommen vom 26. Oktober 1979 über den physischen Schutz von Kernmaterial“ /IAE 79/.

4.3 Beispiel Asse II

In der Schachtanlage Asse II im Landkreis Wolfenbüttel, Niedersachsen, wurden von 1967 bis 1978 schwach- und mittelradioaktive Abfälle gemäß Bergrecht eingelagert. Seit dem Jahre 2009 steht die Anlage unter Atom- und Bergrecht und seit 2013 ist die Rückholung der radioaktiven Abfälle innerhalb von Asse II per Gesetz beschlossen.

In dem „Sicherungsbericht – Schachtanlage Asse II“ /BFS 10/ vom 20.10.2010 (BfS) sind die Anforderungen an die Anlagensicherung und die daraus resultierenden Sicherungsmaßnahmen, die den erforderlichen Schutz gegen SEWD gewährleisten sollen, beschrieben.



Abb. 4.2 Die Maschinenhalle der Schachanlage Asse II mit dem Förderturm des Bergwerks im Hintergrund³

Als allgemeine Schutzziele auch bei SEWD werden in /BFS 10/ definiert:

- Eine Gefährdung von Leben und Gesundheit infolge erheblicher Direktstrahlung oder infolge der Freisetzung einer erheblichen Menge radioaktiver Stoffe muss verhindert werden können (Freisetzung)
- Eine einmalige oder wiederholte Entwendung von Kernbrennstoff in Mengen, mit denen ohne Rückwirkung oder Wiederaufbereitung oder Anreicherung die Möglichkeit der unmittelbaren Herstellung einer kritischen Anordnung gegeben ist, muss verhindert werden können (Entwendung)

Auf Basis des eingelagerten Inventars an Kernmaterial wird die Schachanlage Asse II gemäß /BFS 10/ in die Kategorie III, Anforderungsstufe 2 eingestuft, weshalb sich die Sicherungseinrichtungen und Sicherungsmaßnahmen an der Richtlinie für den Schutz von kerntechnischen Anlagen mit Kernmaterial der Kategorie III orientieren.

³ Quelle: Homepage BGE, <https://www.bge.de/de/bge/presse/pressebilder/schachanlage-asse-ii/>, Abgerufen: 14.12.2020

4.4 Beispiel Gorleben

Der Salzstock Gorleben wurde mit mehrjährigen Unterbrechungen seit 1977 erkundet, um die Eignung als Endlager für hochradioaktive Abfälle bewerten zu können. Im Zuge des Standortauswahlgesetzes von 2013 wurden die Erkundungsarbeiten eingestellt. Aufgrund von geowissenschaftlichen Abwägungskriterien ist der Salzstock Gorleben seit der Veröffentlichung des Zwischenberichtes Teilgebiete im Jahr 2020 /BGE 20/ kein Teilgebiet in der weiteren Standortauswahl für ein Endlager. Daher wird in Zukunft der Salzstock Gorleben nicht länger als ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland in Frage kommen.

Im „Sicherungskonzept für die Anlagen zur Sicherstellung und Endlagerung radioaktiver Abfälle“ /KWU 81/ der Kraftwerksunion von März 1981 ist ein Konzept für den Schutz vor SEWD für ein mögliches Endlager dargelegt. Als allgemeine Schutzziele auch bei SEWD werden in /KWU 81/ Entwendung und Freisetzung (vor Ort) definiert. Außerdem wird eine Unterscheidung zwischen verschiedenen zeitlichen Stufen mit verschiedenen Anforderungen thematisiert.

4.5 Beispiel Morsleben



Abb. 4.3 Containerhalle des Endlagers Morsleben ⁴

Im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) wurden zwischen 1971 und 1991 sowie von 1994 bis 1998 schwach- und mittelradioaktive Abfälle in einem ehemaligen Kali- und Steinsalzbergwerk eingelagert. Momentan läuft das Genehmigungsverfahren zur Stilllegung des ERAM mit Verbleib der eingelagerten Abfälle. Informationen zur Sicherung des ERAM liegen in Form verschiedener Berichte vor. Die Informationen bezüglich der Anlagensicherungen stammen größtenteils aus der „Bewertung der sachlich-technischen Gegebenheiten des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) aus Sicht der Anlagensicherung“ der GRS vom Oktober 1994 /GRS 94/. Bei der Kategorisierung wurde sich am Endlager Konrad orientiert, wobei für das ERAM die einzulagernden Abfälle und die anlagenspezifischen Verhältnisse berücksichtigt werden müssen. Bei der Betrachtung des Sicherungsniveaus wurden die Schutzziele Entwendung und Freisetzung (vor Ort) betrachtet.

⁴ Quelle: Homepage BGE, <https://www.bge.de/de/bge/presse/pressebilder/endlager-morsleben/>, Abgerufen: 14.12.2020

4.6 Zusammenfassung der Vorgehensweisen

In vorliegenden Sicherungskonzepten wurde jeweils eine Sicherungskategorie der zu schützenden radioaktiven Stoffe innerhalb des Endlagers festgelegt oder ermittelt, auf deren Basis sich dann der Bewertungsmaßstab aus den Grundlagen des jeweils geltenden SEWD-Regelwerks zusammensetzt.

Für die Anlagen wurden jeweils zunächst die Schutzziele aufgeführt. Diese sind die Freisetzung vor Ort und die Entwendung von Kernmaterial zur anschließenden Herstellung einer kritischen Anordnung. Die Aspekte der Entwendung und Freisetzung wurden für eine Einstufung in eine Sicherungskategorie jeweils getrennt betrachtet und bewertet. Aufgrund von Besonderheiten des Endlagers für hochradioaktive Abfälle, werden die sich aus den Sicherungskategorien ergebenden Maßnahmen teilweise zu einem darüberhinausgehenden Sicherungsniveau erweitert.

5 Internationale Endlagerprojekte

Für schwach- und mittelradioaktive Abfälle sind in vielen Ländern bereits Endlager errichtet worden. Für hochradioaktive Abfälle aus der Kerntechnik ist weltweit noch kein Endlager in Betrieb. In den USA wurde in Salzformationen das Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) errichtet und im März 1999 zur Entsorgung von Transuranabfällen aus der Rüstungsindustrie in Betrieb genommen. In verschiedenen Ländern befinden sich Endlagerprojekte für hochradioaktive Abfälle in unterschiedlichen Phasen der Realisierung. Dabei sind Finnland, mit dem im Bau befindlichen Endlager Olkiluoto, und Schweden, mit der geplanten Erweiterung des Endlagers SFR Forsmark, besonders weit fortgeschritten in der Planung. Es besteht ein weltweiter Konsens darin, dass ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen eingerichtet werden soll, um den Ansprüchen an die Sicherheit gerecht zu werden. Bei der Auswahl der Gesteinsformationen und der konkreten Einlagerungstechnik bestehen weltweit jedoch Unterschiede.

5.1 Finnisches Endlager Olkiluoto

Im Jahr 2000 wurde der Standort Olkiluoto als finnisches Endlager für hochradioaktive Abfälle ausgewählt und seit Ende 2015 finden in 400–500 m Tiefe die Bauarbeiten zur Errichtung statt. Das Endlager wird von der finnischen Firma Posiva errichtet, welche die von der Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB) entwickelte Einlagerungsmethode KBS-3 nutzen wird. Eine schematische Darstellung dieser Methode ist in Abb. 5.1 zu finden. Die Entsorgung des radioaktiven Abfalls in der Anlage soll in den 2020er Jahren starten. Damit wäre das Endlager Olkiluoto weltweit das erste Endlager für hochradioaktive Abfälle aus der Kerntechnik in tiefen geologischen Formationen. Daher ist die Betrachtung des Sicherungskonzepts für dieses Endlager besonders relevant.

Gemäß den finnischen Sicherungsgrundlagen für Nuklearanlagen /STU 14/ erfolgt die Kategorisierung des radioaktiven Abfalls in Sicherungskategorien auf Basis der internationalen Übereinkünfte /IAE 79/ und /IAE 18/ nach den finnischen Kategorien 1 bis 3. Bestrahlter Kernbrennstoff kann der Kategorie 1 – der höchsten Kategorie bezüglich Entwendung – zugeordnet werden, wenn die Menge des darin enthaltenen Kernmaterials eine Strahlungsintensität von 1 Gy/h in 1 m Entfernung nicht überschreitet. Kategorie 2 kommt zur Anwendung für bestrahlten Kernbrennstoff und für radioaktiven Abfall ohne Kernmaterial mit einer Aktivität von mehr als 10^{15} Bq. Kategorie 3 kommt zur Anwendung

für radioaktiven Abfall ohne Kernmaterial mit einer Aktivität zwischen 10^{12} Bq und 10^{15} Bq.

Die finnische Behörde für Strahlenschutz und nukleare Sicherheit (STUK) ist verantwortlich für das Erstellen des Sicherungskonzepts für das Endlager Olkiluoto. In einer Stellungnahme und Sicherheitsbewertung des Endlagers Olkiluoto /STU 15/ werden auch grundlegende Aspekte der Sicherung angesprochen.

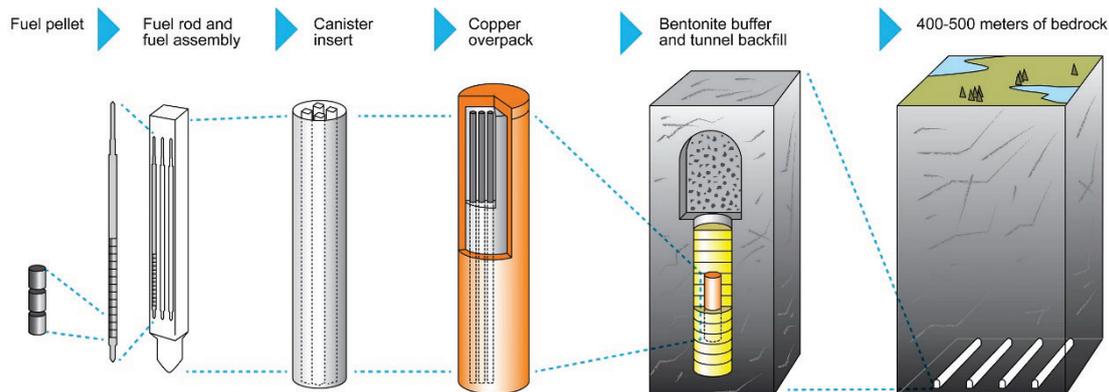


Abb. 5.1 Das von der finnischen Firma Posiva genutzte sogenannte KBS-3 Einlagerungskonzept für die Endlagerung⁵

Gemäß /STU 15/ wird das Sicherungskonzept für das Endlager Olkiluoto mit der IAEO koordiniert. Da Olkiluoto weltweit das erste Endlager dieser Art sein wird, ist die Problematik der Sicherungssysteme noch nicht endgültig geklärt und es besteht zu diesem Zeitpunkt noch kein finales Sicherungskonzept.

Gemäß /STU 15, Kap.8/ unterscheiden sich die Maßnahmen für das Endlager in zwei Zeitabschnitten. Der erste Zeitabschnitt ist während der Errichtung und dem Betrieb der Anlage. Für diesen Zeitabschnitt sind dieselben Prinzipien anzuwenden, wie bei der Errichtung eines Kernkraftwerks. Der zweite Zeitabschnitt ist nach dem Verschluss der Anlage. Die Anlage bleibt unter Aufsicht der IAEO, bis es praktisch unmöglich ist den nuklearen Abfall zurückzugewinnen. Der bestrahlte Kernbrennstoff ist schlecht verwendbar für die Produktion von Nuklearwaffen. Jedoch verbessert sich die Verwendbarkeit durch die Zerfallsprozesse nach einigen tausend Jahren, weshalb eine Langzeitsicherung notwendig ist.

⁵ Quelle: Homepage Posiva, http://www.posiva.fi/en/final_disposal/basics_of_the_final_disposal, Abgerufen 14.12.2020

In /STU 15, Kap. 10/ wird weiter auf die Unterschiede vor und nach dem Verschluss des Endlagers eingegangen. So müssen die Sicherungsmaßnahmen während der Einlagerung höher sein als nach dem Verschluss, da die Risiken bezüglich Freisetzung und Entwendung deutlich höher sind. Basierend auf Anforderungen, die sich unter anderem aus dem internationalen Regelwerk /IAE 18/ ergeben, hat Posiva Lastannahmen und Risikoanalysen entworfen. Auf dessen Grundlage wurden Pläne für ein Sicherungskonzept erstellt, welches klassische Prinzipien der Sicherung, wie Defence-In-Depth, Einsatz eines Objektsicherungsdienstes, Zugangskontrollsysteme und Zuverlässigkeitsüberprüfungen, beinhaltet. Genauere Informationen zu den Lastannahmen, den Risikoanalysen sowie dem genauen Sicherungskonzept sind als vertraulich beziehungsweise geheim eingestuft. Im Rahmen dieses Berichts können diese also nicht detailliert betrachtet werden.

Um sicherzustellen, dass die notwendigen technischen Sicherungsinstrumente zum Zeitpunkt der Fertigstellung des Endlagers zur Verfügung stehen, hat STUK ein nationales Forschungs- und Entwicklungsprogramm GOSSER (Geological Disposal and Security R&D) ins Leben gerufen. Gemäß /ESA 18/ ist das Hauptziel von GOSSER die Fertigstellung des finnischen Sicherungskonzepts für die Endlagerung. Dieses Konzept und die damit verbundenen Forschungsarbeiten werden mit Posiva, der Europäischen Kommission und der IAEO abgestimmt. Die Aktivitäten von GOSSER umfasst bisher vor allem die Forschung an Schutzmaßnahmen (safeguard systems). So wurde bislang an der Forschung und Entwicklung robuster, zuverlässiger und genauer Methoden zur Überprüfung abgebrannter Kernbrennstoffe vor der Endlagerung mitgewirkt, außerdem an der Teilnahme am Safeguards-by-Design-Prozess des Endlagers.

6 Regelungsgrundlagen für die Endlagersicherung

Die Anforderungen und Maßnahmen für die Sicherung von Endlagern, welche in Regelwerksform festgehalten werden könnten, ergeben sich auf Grundlage von Lastannahmen und den darauf aufbauenden Schutzzielen. Die Lastannahmen werden durch die zuständigen Behörden auf Grundlage von Gefährdungslagebildern der Sicherheitsbehörden und deren Bewertung in einer Bedrohungsanalyse festgelegt. Der dem zugrunde liegende Prozess der Entwicklung beziehungsweise des Aufbaus von Richtlinien der Sicherung ist in der folgenden Grafik schematisch dargestellt.

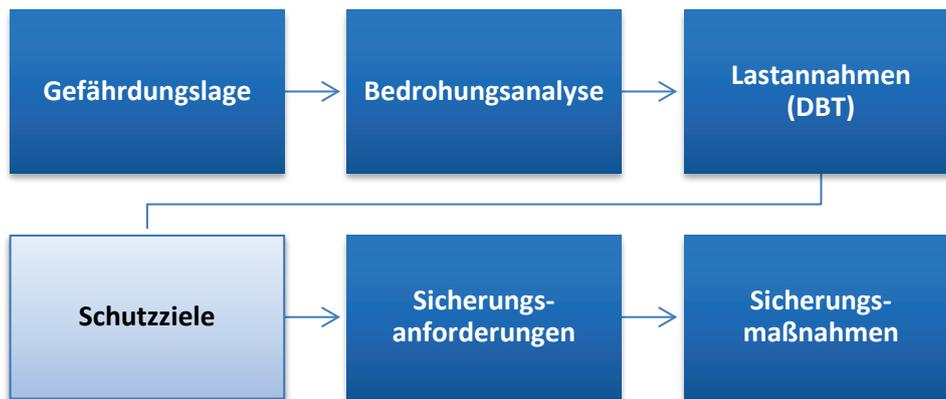


Abb. 6.1 Schematische Darstellung des Aufbaus des deutschen Sicherungssystems

Auch wenn einige in diesem Kapitel diskutierte Aspekte sicherlich auch bei der Festlegung der Lastannahmen ihre Relevanz haben, gehen die folgenden Betrachtungen von den drei allgemeinen Schutzzielen der Anlagensicherung aus. Als Schutzziele der Anlagensicherung werden im SEWD-Regelwerk normalerweise „Freisetzung“, „Entwendung“ und „Freisetzung nach Entwendung“ angesetzt. Welche Sicherheitsanforderungen und -maßnahmen sich aufgrund dieser Schutzziele für ein Endlager ergeben, ist von den Rahmenbedingungen der Endlagerung abhängig.

Im Folgenden wird auf Grundlage der im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Recherchen und dem in diesem Bericht aufgeführten Sachverhalt eine Einordnung der relevanten Aspekte für die Sicherung von Endlagern durchgeführt. Zunächst werden dabei die zuvor erwähnten Schutzziele und die für diese Schutzziele relevanten Einflussgrößen der Endlagerung aufgeführt. Anschließend werden diese Aspekte näher betrachtet und einige allgemeinen Herausforderungen bei der Sicherung von Endlagern aufgeführt. Zum Schluss erfolgt eine Betrachtung der Konsequenzen dieser Betrachtungen für ein mögliches Regelwerksteil.

6.1 Schutzziele

Bei Betrachtung der allgemeinen Schutzziele wird ersichtlich, dass bei einem Endlager hinsichtlich der Sicherung zwischen verschiedenen zeitlichen Phasen unterschieden werden muss. Hierbei erscheint es sinnvoll, basierend auf dem in Kap. 4.1 dargelegten Entsorgungskonzept für Deutschland und auf den im „Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ /KOM 16/ aufgeführten Etappen, hinsichtlich unterschiedlicher Phasen zu unterscheiden. Hierfür wird der für die Sicherung relevante Zeitraum im Anschluss an das Standortauswahlverfahren und die bergtechnische Erschließung des Standortes betrachtet:

1. Phase der Einlagerung – Zeitraum in dem die Einlagerung der radioaktiven Abfälle in das Endlagerbergwerk realisiert wird.
2. Phase der Rückholbarkeit – Zeitraum nachdem die letzten Abfälle in das Endlager eingelagert wurde, aber noch eine Rückholbarkeit gegeben ist. In Deutschland soll diese Phase 500 Jahre dauern.
3. Phase der dauerhaften Lagerung – Zeitraum nach dem finalen Verschluss des Endlagers.

In diesen drei Phasen unterscheiden sich die Rahmenbedingungen, welche für die Sicherung relevant sind, signifikant voneinander. In der ersten Phase sind alle Zugänge des Endlagerbergwerks noch geöffnet, wodurch es in vielen Aspekten einem Zwischenlager ähnelt. Durch die Methode der Lagerung und vor allem auch die unterirdische Position des Bergwerks bestehen jedoch auch nennenswerte Unterschiede zu Zwischenlagern. In der zweiten Phase sind die Abfälle theoretisch noch rückholbar, jedoch ist das Endlagerbergwerk selbst bereits verschlossen. In der dritten Phase, der dauerhaften Lagerung, existiert lediglich noch eine „grüne Wiese“ mit den als nicht mehr rückholbar geltenden Abfällen in einigen hundert Metern Tiefe.

6.1.1 Freisetzung

Für eine Freisetzung vor Ort müssen die Täter auf einen Behälter so einwirken, dass Radioaktivität freigesetzt wird, die anschließend an festgelegten Aufpunkten einen bestimmten Grenzwert überschreitet. In der SEWD-Berechnungsgrundlage /BMU 14/ sind die Grundlagen für die Ermittlung der Strahlenexposition in der Umgebung von Kernanlagen nach einer Freisetzung von radioaktiven Stoffen in der Atmosphäre als Folge der

zu unterstellenden SEWD festgehalten. Die wichtigsten Punkte werden im Folgenden kurz aufgeführt und im Kontext von Endlagern betrachtet:

- Nachweis einer effektiven Folgedosis von nicht mehr als 100 mSv als Summe von Inhalation und 7 Tagen äußerer Bestrahlung am Aufpunkt.

Die effektive Folgedosis ist ein für Freisetzungsberechnungen festgelegter Grenzwert, der auch bei Endlagern Anwendung finden könnte. Eine nähere Betrachtung muss jedoch im Bezug zu den hier unterstellten Expositionspfaden erfolgen. Da die Freisetzung unterirdisch erfolgt, unterscheiden sich die Annahmen für die Berechnung der Strahlenexposition von denen bei einer oberirdischen Freisetzung.

- Nachweis durch deterministische oder probabilistische atmosphärische Ausbreitungsrechnungen und nachfolgender radiologischer Konsequenzanalyse.

Eine atmosphärische Ausbreitungsrechnung ist für eine unterirdisch erfolgte Freisetzung nicht sinnvoll. Wie beim Punkt zuvor muss auch hier geprüft werden, wie eine mögliche Freisetzung aussehen könnte.

- Aufpunkte sind alle im Rechengebiet befindlichen Wohnbebauungen und Arbeitsstätten außerhalb des Anlagengeländes. Das Rechengebiet umfasst das kreisförmige Gebiet um den Ort der Quelle, dessen Radius das 50-fache der effektiven Emissionshöhe, mindestens aber 5 km beträgt.

Die Definition der Aufpunkte über die Emissionshöhe ist unter Betrachtung der zuvor aufgeführten Argumente nicht sinnvoll, da hierbei eine überwiegend atmosphärische Ausbreitung angenommen wird. Die Entfernung von Aufpunkten hat darüber hinaus eine durch die Tiefenlagerung bedingte Mindestentfernung. So muss die Tiefe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gemäß der geowissenschaftlichen Mindestanforderung des Standortauswahlgesetzes mindestens 300 m betragen. Außerdem befindet sich insbesondere in der ersten Phase der Endlagerung unmittelbar über den radioaktiven Abfällen Teile des Anlagengeländes und keine sonstigen Wohnbebauungen und Arbeitsstätten. Der Abstand zu vorhandenen bebauten Flächen von Wohngebieten ist darüber hinaus auch als eine der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien beim deutschen Auswahlverfahren im Standortauswahlgesetz festgeschrieben und wird ab einer Entfernung von mindestens 1000 m als günstig bewertet.

Eine Berechnungsgrundlage für die Ermittlung der Strahlenexposition in der Umgebung von Endlagern nach einer Freisetzung von radioaktiven Stoffen als Folge der zu unterstellenden SEWD müsste diese Aspekte beachten. Dafür ist zunächst die grundlegende Frage zu beantworten, wie eine Freisetzung konkret aussehen könnte.

Damit Täter eine Freisetzung vor Ort in einem Endlager realisieren können, müssen diese zunächst in das Endlagerbergwerk eindringen, um zu den Behältern zu gelangen, und anschließend eine Freisetzung im Endlager erzeugen. Für einen freisetzungsrelevanten Vorgang muss diese Freisetzung anschließend an Aufpunkten eine relevante Dosis bewirken.

6.1.2 Entwendung von Kernbrennstoff

Für eine Entwendung von Kernbrennstoff müssen die Täter in das Endlager eindringen und anschließend einen Behälter oder den Inhalt von Behältern aus dem Endlager abtransportieren. Anschließend muss der Kernbrennstoff aus dem Abfallgebinde gewonnen und aufbereitet werden. Dies ist abhängig vom Behältertyp und der Einbringung der radioaktiven Abfälle in diesen Behälter beliebig aufwendig. Hierzu sind neben den technischen Voraussetzungen zum Eindringen in ein einige hundert Meter tiefes Lager insbesondere die technischen Voraussetzungen zur Bergung und zum Transport nötig. Da sich die hochradioaktiven Abfälle in ihrer Zusammensetzung voneinander unterscheiden, ist darüber hinaus für die gezielte Entwendung bestimmter Stoffe die Kenntnis der genauen Position relevanter Behälter notwendig. Die Konditionierung der eingelagerten Abfälle erschwert das Gewinnen von Kernbrennstoff deutlich und macht daher das gesamte Vorgehen unattraktiver für Täter.

Der für ein solches Vorgehen notwendige Aufwand und die Realisierbarkeit unterscheiden sich in den zuvor definierten drei zeitlichen Phasen stark voneinander. In der Phase der Einlagerung sind vor Ort die Infrastruktur und die Gerätschaften für den Transport eines Behälters aus dem Endlagerbergwerk vorhanden. Nach dem Verschluss des Endlagers müsste eine solche Infrastruktur von den Tätern erst geschaffen werden. Ob der Zeitrahmen bis zu einem Entdecken eines solchen Vorgehens ausreichend für Täter wäre, und inwiefern der erforderliche Aufwand für die Vorbereitungsarbeiten zu einem rechtzeitigen Entdecken führen würde, ist bei der Bewertung zu berücksichtigen.

6.1.3 Freisetzung nach Entwendung

Das Vorgehen und die relevanten Aspekte bei einer Freisetzung nach Entwendung entsprechen für die dafür erforderliche Entwendung zu großen Teilen denen bei einer Entwendung von Kernbrennstoff. Ein Unterschied liegt hier vor allem darin, dass die Menge des zu entwendenden Materials variabler ist und keine umfangreiche Aufbereitung des Materials aus dem Abfallgebinde notwendig ist, um dies missbrauchen zu können.

6.2 Relevante Aspekte

In diesem Unterkapitel werden die Rahmenbedingungen der Endlagerung und deren Einfluss auf die Sicherung aufgeführt. Die Anforderungen an die Sicherung eines Endlagers und die Maßnahmen, die darauf basierend ergriffen werden müssen, sind von diesen Rahmenbedingungen abhängig. Die Lage des Bergwerks, die Behälter, die Lagerdauer, die Verarbeitung der Abfälle und weitere Parameter sind damit für die Vorgaben in einer Regelung zu beachtenden Größen. Die meisten dieser Parameter stehen noch nicht definitiv fest, daher erfolgt an dieser Stelle eine generische Betrachtung dieser Aspekte.

Sicherheit und Sicherung

Bei den existierenden Grundlagen und Forschungsvorhaben bezüglich der Endlagerung hochradioaktiver Stoffe steht die Sicherheit klar im Fokus. So werden sämtliche Endlager-Konzepte auf Basis der Sicherheit bewertet und entwickelt. Jedoch besteht auch eine Synergie zwischen der Sicherheit und der Sicherung von Endlagern.

Die geologische Tiefenlagerung, welche sich aufgrund von Sicherheitsüberlegungen als präferiertes Endlager-Konzept herausgebildet hat, bietet gleichzeitig auch eine natürliche Sicherung. Eine Entwendung sowie eine gezielte Freisetzung können wohl nur nach einem Eindringen in die Stollen des Endlagers erfolgen. Das Eindringen in einen mehrere hundert Meter tiefen verschlossenen Stollen ist stark erschwert, jedoch liegt der Zustand eines komplett verschlossenen Stollens zunächst noch weit in der Zukunft. In der Phase der Einlagerung sowie in der Phase, in der die Rückholbarkeit gegeben sein muss, ist das Eindringen zumindest denkbar, wenn dies auch durch die logistischen Hindernisse, welche das Eindringen in einen mehrere hundert Meter tiefen Stollen bieten, stark erschwert wird. Daraus wird auch ersichtlich, dass ein Sicherungskonzept für ein Endlager zeitlich anpassbar sein sollte.

Bei einer gezielten Freisetzung von radioaktiven Stoffen vor Ort kann nicht ohne weiteres eine kritische Menge an Radioaktivität an Aufpunkten herbeigeführt werden.

Der Zustand der radioaktiven Abfälle in mehrere Tonnen schweren Gebinden und Behältern erschwert die Entwendung enorm. Durch die Konditionierung und Vermischung der Abfälle in Stoffen wie Zement oder Glas sowie ein Einschweißen in Metallbehälter ist eine Trennung vor Ort sehr stark erschwert. Daher müssten ganze Behälter entwendet werden.

Insgesamt besteht bei der Endlagerung ein sehr starkes Zusammenspiel zwischen der Sicherheit und der Sicherung. Dieses Zusammenspiel ist durch die Tiefenlagerung, die geologischen Barrieren und die geplanten Zeiträume signifikanter als bei anderen Anlagen. Bei der Betrachtung von Sicherheitsanforderungen und -maßnahmen sollte daher ein genauer Blick auf die Sicherheitsanforderungen und -maßnahmen sowie auf mögliche Synergien geworfen werden. In vielen Fällen könnte von Aspekten der Sicherheit, wie beispielsweise der Tiefenlagerung und den geologischen Barrieren, Kredit für die Sicherung genommen werden.

Rückholbarkeit

Gemäß dem Standortauswahlgesetz ist die Rückholbarkeit für die Dauer der Betriebsphase des Endlagers und die Möglichkeit einer Bergung für 500 Jahre nach dem geplanten Verschluss des Endlagers vorzusehen.

Theoretisch besteht daher auch für diesen Zeitraum die Möglichkeit einer Entwendung. Durch diese Anforderung an ein Endlager ist nicht ausgeschlossen, dass eine Rückholung oder Bergung auch nach einem Zeitraum von 500 Jahren noch möglich ist. Jedoch sollte an dieser Stelle eine Überlegung stattfinden, ob diese tatsächlich noch zu unterstellen ist oder ob die Dauer der Rückholbarkeit nicht auch den Zeitrahmen für Sicherungsmaßnahmen hinsichtlich einer Entwendung vorgeben könnte.

Konditionierung

Radioaktive Abfälle werden für die Endlagerung aufbereitet und verpackt. Dies wird als Konditionierung bezeichnet. Die Abfälle werden dabei in einen chemisch stabilen und in Wasser nur schwer löslichen Zustand überführt. Es werden hierbei unterschiedliche Methoden für die verschiedenen Arten von Abfällen angewandt. So werden beispielsweise die hochradioaktiven Spaltproduktlösungen, die in Wiederaufbereitungsanlagen angefallen sind, in Glas eingeschmolzen und anschließend in Edelstahlbehälter verfüllt.

Es sollte geprüft werden, inwieweit die hochradioaktiven Abfälle in einem Zustand vorliegen, in dem eine Entwendung der Abfälle mit dem Ziel, Kernbrennstoff für die Herstellung einer kritischen Anordnung zu gewinnen, überhaupt zu unterstellen ist.

Für eine Freisetzung nach Entwendung ist dieser Aufwand deutlich reduziert. Auch dies sollte näher untersucht werden.

Behälter

An die verwendeten Behälter besteht gemäß /KOM 16/ der Anspruch, dass deren Langzeitintegrität für einige hundert Jahre bestehen bleibt. Das bedeutet unter anderem, dass eine langfristige Dichtheit gewährleistet werden muss sowie eine Abschirmungsfunktion und ein Wärmeabfuhrvermögen besteht. Es bestehen in Deutschland bereits Behälterkonzepte für die Endlagerung wie Brennstabkokillen und Pollux Behälter, die jedoch für Salzgestein konzipiert wurden und mittlerweile teilweise veraltet sind. Die Behältertypen stehen momentan daher noch nicht fest, da sie letztendlich vom Wirtsgestein und dem Stand von Wissenschaft und Technik zum Beginn der Einlagerung abhängig sind.

Größe und Gewicht der Behälter sind bei einer Entwendung entscheidende Einflussgrößen. Die Barrierewirksamkeit der Behälterwand ist wiederum eine entscheidende Einflussgröße bei Freisetzungsszenarien. Die Art und Weise, mit der die Abfälle in die Behälter verfüllt werden, ist, wie beim Punkt „Konditionierung“ bereits angesprochen, ein weiterer wichtiger Aspekt. Der Behältertyp ist demnach insgesamt bei der Sicherung ein relevanter Aspekt.

Lage

Die Endlagerung findet in geologischen Strukturen innerhalb eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches in Tiefen zwischen 300 m und 1500 m statt. Hinsichtlich der geologischen Anforderungen besteht eine Vielfalt an weiteren Anforderungen.

Die genaue Tiefe und die genauen geologischen Gegebenheiten sollten jedoch keine entscheidenden Faktoren für die Sicherung von Endlagern darstellen. Die Barrierewirksamkeit bei einer Tiefenlagerung ist in jedem Fall so groß, dass ein relevantes Einwirken von außerhalb ausgeschlossen werden kann und nach Verschluss ein Eindringen ebenfalls stark erschwert ist. Vor dem Verschluss kann das Endlagerbergwerk daher im Prinzip wie ein Gebäude mit sehr begrenzten Zugängen angesehen werden, auf deren Inventar von außen nicht eingewirkt werden kann.

Wirtsgestein

Für die Endlagerung kommen die Wirtsgesteine Ton, Steinsalz und kristallines Gestein in Frage. Wie bereits beim Aspekt „Lage“ angesprochen, sind die spezifischen geologischen Parameter, zu denen auch die Art des Wirtsgesteins gehört, aufgrund der enormen Größe der geologischen Barriere keine relevanten Einflussgrößen für die Sicherung. Da jedoch die Art der Lagerung und des Behälters vom Wirtsgestein abhängig ist, ist dies implizit auch ein relevanter Aspekt.

Radioaktiver Zerfall

In hochradioaktiven Abfällen enthaltene Nuklide wie Cs-137 und Sr-90, welche zum Zeitpunkt der Einlagerung den größten Anteil an Wärmeentwicklung und Radioaktivität ausmachen, sind nach wenigen hundert Jahren beinahe vollständig zerfallen. Nachdem die leichteren Radionuklide zerfallen sind, dominieren vor allem noch die Transurane, welche eine deutlich geringere Radioaktivität aufweisen. Dadurch erhöht sich die Attraktivität für eine Entwendung der Abfälle, da eine geringere Eigengefährdung vorliegt und das Herauslösen von spaltbarem Material einfacher ist.

Zeitraum

Mögliche Tatmotive sowie der Stand von Wissenschaft und Technik verändern sich zeitlich. Eine variable Anpassung der Sicherungsmaßnahmen an die Gefährdungslage ist nur durch eine aktive Aufsichtsbehörde möglich. Dies über einen langen Zeitraum zu gewährleisten stellt eine große gesellschaftliche Herausforderung dar.

Wie zu Beginn dieses Kapitels bereits erwähnt, sind die Gefährdungslage (Erkenntnisse der Sicherheitsbehörden) und aufbauend darauf die Lastannahmen ein entscheidender Faktor bei der Entwicklung eines Regelwerksteils. Gemäß /KOM 16/ wären „bereits in der Planung spezifische, von heutigen Annahmen ggf. abweichende Lastannahmen als Auslegungsgrundlage neu festzulegen, aufgrund des langen Betrachtungszeitraum verbunden mit der Verpflichtung diese in regelmäßigen Abständen und bei erkanntem Bedarf durch die zuständigen Behörden zu evaluieren. Ob langfristig eine hieraus folgende regelmäßige Ertüchtigung der Sicherungsmaßnahmen technisch möglich ist, kann aus heutiger Sicht nicht prognostiziert werden.“

Die Lastannahmen müssen daher stetig an die bestehende Bedrohung (Bewertung der Erkenntnisse der Sicherheitsbehörden), aber auch den Stand von Wissenschaft und Technik angepasst werden. Die möglichen Veränderungen in Technik und Gesellschaft

für den Zeitraum einer sicheren Verwahrung von hochradioaktiven Abfällen abzuschätzen ist nicht möglich. Eine stetige Anpassung der Lastannahmen und damit der Anforderungen kann jedoch im Sinne der Generationengerechtigkeit, die ein grundlegender Aspekt für Konzepte der Endlagerung in Deutschland darstellt, nur schwer gefordert werden und für den Zeitraum einer sicheren Verwahrung nicht garantiert werden, insbesondere innerhalb eines Zeitraums von 1 Millionen Jahre, in denen es zu kriegerischen Auseinandersetzungen, Änderungen des Staatsgebietes und politischen Systems und ähnlichen fundamentalen Veränderungen kommen kann – und in Anbetracht des Zeitraums vermutlich auch kommen wird.

6.3 Konsequenzen für Regelungen zur Endlagersicherung

Einer der wichtigsten Aspekte, die bei Regelvorgaben für Endlager beachtet werden muss, ist der Zeitraum, für den dieses ausgelegt sein soll. Bei der Sicherung eines Endlagers gibt es grundlegende Unterschiede abhängig von der zeitlichen Phase der Lagerung. So unterscheiden sich Sicherungskonzepte für Endlager, welche auf den gleichen Schutzziele aufbauen, für die Phase der Einlagerung, für den Zeitraum der Rückholbarkeit und für die langfristige Lagerung. Eine der Grundfragen ist darüber hinaus der Zeitraum, für den eine Sicherung gewährleistet werden soll. Die Sicherheit eines deutschen Endlagers soll für eine Millionen Jahre gewährleistet sein. Konkrete Überlegungen zu der zeitlichen Abhängigkeit der Risiken von Entwendung und Freisetzung könnten hier förderlich sein.

Bei der Entwicklung einer Regelung für die Sicherung von Endlagern müssen Anforderungen und Maßnahmen definiert werden. Um diese zu entwickeln müssen jedoch zunächst die Lastannahmen und die Schutzziele für die Endlagerung abgeleitet werden. Die Lastannahmen sind dabei, vor allem was die langfristige Perspektive angeht, die größte Herausforderung. Zu den möglichen Schutzziele wurde im Unterkapitel 6.1 bereits einiges aufgeführt. Die in Unterkapitel 6.1.2 angefangenen Betrachtungen sollten weiter vertieft werden.

Bei den auf Grundlage der Schutzziele zu entwickelnden Anforderungen und vor allem den dadurch bedingten Maßnahmen sind die im Unterkapitel 6.2 aufgeführten konkreten Rahmenbedingungen der Endlagerung relevant. Hier sollte eine starke Mitbetrachtung der bestehenden Anforderungen und Maßnahmen hinsichtlich der Sicherheit erfolgen.

Demzufolge könnte das Endlagerbergwerk vor dem Verschluss wie eine kerntechnische Anlage betrachtet werden, welches eine limitierte Anzahl an Zugängen hat und auf dessen Inventar von außen nicht eingewirkt werden kann. Auf dieser Betrachtung aufbauend könnten dann bestehende Sicherheitskonzepte für kerntechnische Anlagen an diese Rahmenbedingungen angepasst werden.

Literaturverzeichnis

- /BFS 97/ Bundesamt für Strahlenschutz, Plan Sicherung – Endlager für radioaktive Abfälle Schachtanlage Konrad in Salzgitter; Dezember 1986 in der Fassung vom Februar 1997, VS-NfD
- /BFS 10/ Bundesamt für Strahlenschutz, Sicherheitsbericht Schachtanlage Asse II, Stand 20.10.2010, Rev. 0, VS-NfD
- /BGE 20/ Bundesgesellschaft für Endlagerung, Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG, Stand 28.09.2020, Revision 0
- /BMU 12/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Richtlinie zur Sicherung von Zwischenlagern gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD), Stand: 10.05.2012, RS I 6-13151 -6/22, VS-NfD
- /BMU 14/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Berechnungsgrundlage zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge von Störmaßnahmen oder sonstigen Einwirkungen Dritter (SEWD) auf kerntechnische Anlagen und Einrichtungen (SEWD-Berechnungsgrundlage), Stand 04. Juli 2014, GMBI. 2014, Nr. 64, S. 1315
- /ESA 18/ European Safeguards Research and Development Association (ASARDA), Bulletin No. 56, June 2018, STUK: GOSSER - Geological Safeguards and Security R&D Project in Finland - How STUK prepares itself for the Final Disposal in Finland
- /GRS 84/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS), Ermittlung der Sicherheitskategorie für die Schachtanlage Konrad als Endlager des Bundes, erstellt im Auftrag des PTB, Offenbach, 05.11.1984, VS-NfD
- /GRS 94/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS), Bewertung der sachlich-technischen Gegebenheiten des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) aus Sicht der Anlagensicherung, erstellt im Auftrag des BfS, Oktober 1994, VS-NfD

- /GRS 09/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), GRS Akademie, Grundkurs Fachwissen, Endlagerung, März 2009
- /GRS 18/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Erfassung, Auswertung und Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft, Technik und Erkenntnis zur Sicherung von Kernbrennstoffen, AG-Nr. 4055, VOT/WZU, 28.11.2018, Rev. 1
- /IAE 79/ Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO), Übereinkommen vom 26. Oktober 1979 über den physischen Schutz von Kernmaterial, Wien, 26.10.1979
- /IAE 04/ Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO), Code of Conduct on the safety and security of radioactive sources, Wien, 2004
- /IAE 09/ Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO), Security of Radioactive Sources, Implementing Guide, IAEA Nuclear Security Series No. 11, Wien, 2009
- /IAE 11a/ Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO), Radioactive Waste Management Objectives, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-0, Wien, 2011
- /IAE 11b/ Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO), Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Facilities, Recommendations, IAEA Nuclear Security Series No. 13, Wien, 2011
- /IAE 11c/ Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO), Nuclear Security Recommendations on Radioactive Material and Associated Facilities, Recommendations, IAEA Nuclear Security Series No. 14, Wien, 2011
- /IAE 13/ Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO), Objective and Essential Elements of a State's Nuclear Security Regime, Nuclear Security Fundamentals, IAEA Nuclear Security Series No. 20, Wien, 2013

- /IAE 16/ Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO), Security of radioactive material in use and storage and of associated facilities, Revision of NSS 11, Draft Implementing Guide, NST048, Draft, 2016
- /IAE 18/ Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO), Physical protection of nuclear material and nuclear facilities (Implementation of INFCIRC/225/Revision 5), Implementing Guide, IAEA Nuclear Security Series No. 27-G, Wien, 2018
- /IAE 19/ Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO), Security of Radioactive Material in Use and Storage and of Associated Facilities, Implementing Guide, IAEA Nuclear Security Series No. 11-G, Rev. 1, Wien, 2019
- /KOM 16/ Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. 268, 05.07.2016
- /KWU 81/ Kraftwerk Union (KWU), Sicherungskonzept für die Anlagen zur Sicherstellung und Endlagerung radioaktiver Abfälle, KWU/VRS 14/Hn/Wi, März 1981, VS-NfD
- /NMU 02/ Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (NMU), Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes Konrad in Salzgitter – als Anlage zur Endlagerung fester und verfestigter radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, 22.05.2002
- /STU 14/ STUK (Radiation and Nuclear Safety Authority, Finland), Security of a nuclear facility, Helsinki, 2014
- /STU 15/ STUK (Radiation and Nuclear Safety Authority, Finland), STUK's statement and safety assessment in the construction of the Olkiluoto encapsulation plant and disposal facility for spent nuclear fuel, Helsinki, November 2015

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Schematische Darstellung der Regelwerkspyramide der IAEO zur Sicherung radioaktiver Stoffe.....	6
Abb. 4.1	Bauarbeiten für das Endlager Konrad an der Schachtanlage 2 mit dem Förderturm.....	11
Abb. 4.2	Die Maschinenhalle der Schachtanlage Asse II mit dem Förderturm des Bergwerks im Hintergrund.....	13
Abb. 4.3	Containerhalle des Endlagers Morsleben	15
Abb. 5.1	Das von der finnischen Firma Posiva genutzte sogenannte KBS-3 Einlagerungskonzept für die Endlagerung	18
Abb. 6.1	Schematische Darstellung des Aufbaus des deutschen Sicherungssystems.....	21

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
AtG	Atomgesetz
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
GOSSER	Geological Disposal and Security R&D
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit
ERAM	Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben
HAW	Hochradioaktive Abfälle
IAEO	Internationale Atomenergie-Organisation
KWU	Kraftwerksunion
LAW	Schwachradioaktive Abfälle
MAW	Mittelradioaktive Abfälle
NES	Nuclear Energy Series
NSS	Nuclear Security Series
SEWD	Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter
SKB	Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company
STUK	Finnische Behörde für Strahlenschutz und nukleare Sicherheit
UN	United Nations / Vereinte Nationen
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum
Boltzmannstraße 14
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de