

Radioactive Waste SECURITY

- Bericht zur Sicherheit der Atommüllagerung

Wien, 29. Dezember 2010

erstellt von
Universität für Bodenkultur
Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften

Im Auftrag der
Wiener Umweltschutz



Wiener Umweltschutz
Muthgasse 62
A-1190 Wien

post@wua.wien.gv.at
<http://wua-wien.at/home/>



Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften
Borkowskigasse 4
A-1190 Wien
www.risk.boku.ac.at

Autoren:

v. Brodowski Rolf¹, Drapalik Markus¹, Gepp Christian¹, Gufler Klaus¹, Sholly Steven¹;
Qualitätssicherung: Kromp Wolfgang¹;

¹ Universität für Bodenkultur, Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften

Herausgeber:

Wiener Umweltschutz

Muthgasse 62

A-1190 Wien

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	4
2	ALLGEMEIN	5
2.1	Arten des radioaktiven Abfalls.....	5
2.2	Radioaktive Abfälle.....	5
2.3	Physikalischer Zustand.....	5
2.4	Enthaltene Radionuklide	6
2.5	Lagerung	6
2.6	Endlagerung.....	6
3	ANFORDERUNGEN DER REGULIERUNGSBEHÖRDE	8
3.1	Sicherheitsaspekte tiefegeologischer Endlagerung am Beispiel Deutschland	8
3.2	Sicherheitsaspekte tiefegeologischer Endlagerung am Beispiel USA (Yucca Mountain)	9
3.3	Sicherheitsaspekte von Endlagern an der Oberfläche	11
3.4	Sicherheitsaspekte von oberflächennahen Endlagern.....	12
4	AUSGEWÄHLTE BEDROHUNGSSZENARIEN	13
4.1	Bedrohung eines Lagers für abgebrannte Brennelemente.....	13
4.2	Sicherheitsbedrohungen bei HLW	13
4.3	Gefährdung durch nicht mehr genutzte Strahlenquellen.....	14
4.4	Sicherheitsbedrohungen in Verbindung mit LILW	14
4.5	Unfallbedingte Gefahren.....	15
5	BESTEHENDE UND ZUKÜNFTIGE ENDLAGERSTÄTTEN	16
5.1	Yucca Mountain	16
5.2	COVRA - Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval	16
5.3	Forsmark.....	16
5.4	Schacht Konrad	17
5.5	Jordan Radioactive Storage Facility	17
5.6	Wiederaufbereitungsanlage La Hague	17
5.7	Vergleich von Konzepten	18
6	LITERATURVERZEICHNIS	20

1 Einleitung

In einer Zeit, in der vielfach von einer Renaissance der Kernenergie die Rede ist, stellt sich unweigerlich auch vermehrt die Frage nach der sicheren und zeitgemäßen Lagerung der damit einhergehenden radioaktiven Abfälle. Klar ist, dass die sichere Unterbringung dieser Abfallstoffe über hunderttausende bis Millionen Jahre gewährleistet werden muss, um nicht nachfolgende Generationen mit schwerwiegenden Umweltproblemen und Gesundheitsrisiken zu belasten. Im Wesentlichen dreht sich die Diskussion um zwei Konzepte; der tiefengeologischen unzugänglichen Endlagerlösung auf der einen Seite und der zugänglichen erdoberflächennahen Auslegung auf der anderen.

Diese Arbeit soll den Fragen nachgehen, welche Sicherheitsansprüche an ein Lager für radioaktive Abfälle gestellt werden müssen, welche grundlegenden Probleme damit verbunden sind und welche legislativen Regelwerke und Vorkehrungen dafür existieren. Wie der Titel schon deutlich macht, liegt der Fokus dieser Arbeit auf Aspekten die dem Security-Bereich – also der Sicherheit gegenüber dem Einwirken Dritter – zugeordnet werden können und von Safety-Maßnahmen zur Verbesserung der technischen Sicherheitsaspekte zu unterscheiden sind. In diesem Rahmen finden Ereignisse wie menschliches Eindringen in bewachte Anlagen Erwähnung, wogegen z.B. eine geologische Betrachtung zur Erdbebensicherheit nicht diskutiert wird.

Aus einer Vielzahl von Gründen gerät die Betrachtung von Security in öffentlichen Endlagerdiskussionen vermehrt in den Hintergrund, da u.a. terroristische Gefahren als vernachlässigbares Risiko oder gut kalkulierbar eingeschätzt werden. Abhängig von der Art der Lagerung müssen dennoch verschiedene Security-Aspekte berücksichtigt werden.

Seit den Ereignissen vom 11. September 2001 ist der Zugriff auf einschlägiges Quellenmaterial, wie sicherheitstechnische Analysen und Beschreibungen von Lagerstätten, deutlich erschwert, weshalb dieser Arbeit eine aufwändige Literaturrecherche vorausging.

2 Allgemein

2.1 Arten des radioaktiven Abfalls

Je nachdem, wofür radioaktive Materialien verwendet werden, wird nach verschiedenen Kriterien unterschieden, nämlich nach dem Gehalt an radioaktiven Stoffen, der Wärmeentwicklung, dem physikalischen Zustand und den enthaltenen Radionukliden.

2.2 Radioaktive Abfälle

werden international in *low-*, *intermediate-* und *high-level waste* eingeteilt:

- **low-level-waste (LLW)**
fällt in der Industrie, in Krankenhäusern und im nuclear fuel cycle (Brennstoffkreislauf) an und besteht u.a. aus kontaminierten Filtern, Kleidung, Papier und Reinigungsgeräten. In der Regel enthält er nur geringe Mengen von, in der Mehrheit kurzlebigen, radioaktiven Stoffen (z.B. Cobalt-60, Technetium-99, Iod-129, Strontium-90). Eine passende Abschirmung ist zum Teil nur beim Transport notwendig. LLW wird häufig in oberflächennahen Lagern deponiert.
- **intermediate-level-waste (ILW)**
enthält einen größeren Anteil an zum Teil höher radioaktiven Elementen und erfordert daher entsprechende Abschirmung. Er besteht u.a. aus Granulat, mit Chemikalien versetzten Schlamm und dekommissionierten Bauteilen. ILW kann in Beton oder Asphalt gebunden werden. Kurzlebiger Abfall wird grundsätzlich in oberflächennahen Deponien gelagert, während langlebiger Abfall in tiefengeologische Lagerstätten transportiert wird.
- **high-level-waste (HLW) und verbrauchter („abgebrannter“) Brennstoff**
wird in Kernreaktoren produziert. Sie enthalten Produkte der Kernspaltung und transurane Elemente. HLW + verbrauchter Brennstoff ist im Allgemeinen hochradioaktiv und heiß. Sie stellen 95% des radioaktiven Abfalls dar, welcher bei Erzeugung von elektrischer Energie durch Kernspaltungsreaktoren entsteht. Hierfür wird derzeit vorzugsweise tiefengeologische Lagerung angestrebt.

In Deutschland wird im Hinblick auf die geplanten Endlager in Gorleben (für wärmeentwickelnde Abfälle) und Konrad (alle anderen) zusätzlich eine Unterscheidung in wärmeentwickelnde und nicht wärmeentwickelnde Abfälle vorgenommen. Die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung werden als wärmeentwickelnd eingestuft, da in ihnen zu großen Teilen die hochaktiven (und damit eher kurzlebigen) Spaltprodukte enthalten sind.

2.3 Physikalischer Zustand

Vorwiegend fallen radioaktive Abfälle als Feststoffe an, in geringerem Umfang (z.B. bei der Wiederaufbereitung und in der Forschung) auch als Flüssigkeiten. Vor einer Endlagerung müssen Flüssigkeiten in eine chemisch stabile, feste Form überführt werden (Konditionierung). Radioaktive Gase wie Radon werden nicht in dieser Form gelagert, sondern in der Regel in anderen Stoffen physikalisch oder chemisch gebunden sowie auch in verdünnter Form freigesetzt.

2.4 Enthaltene Radionuklide

An Radionukliden kommen in radioaktiven Abfällen und verbrauchtem Brennstoff aus Kernkraftwerken im Wesentlichen die folgenden Elemente vor:

- Spaltprodukte, also die bei der Kernspaltung entstehenden Abfallstoffe. Diese sind zum größten Teil sehr kurzlebig (z.B. Iod-131), jedoch sind auch einige längerlebig (z. B. Cäsium-137, Strontium-90) oder langlebige (z. B. Iod-129) darunter.
- Aktivierungsprodukte, dies sind ursprünglich nichtradioaktive Materialien aus dem Reaktor oder dessen Umgebung, die durch Neutroneneinfang von Spalt-Neutronen in radioaktive Nuklide umgewandelt wurden (prominentestes Nuklid ist hier Cobalt-60).
- Erbrütete Materialien, z.B. Plutonium-239, Plutonium-241, sowie Neptunium-237, welches dadurch entsteht, dass Uran-235 durch Neutroneneinfang nicht gespalten wird, sondern das entstehende Uran-236 sich durch einen weiteren Neutroneneinfang in Uran-237 umwandelt, das sich anschließend durch Betazerfall in das Neptuniumisotop umwandelt. Ein weiteres Beispiel ist Americium-241, das durch mehrfachen Neutroneneinfang aus Plutonium-239 über Plutonium-240 und -241 mit nachfolgendem Betazerfall entsteht.
- Unverbrauchter Brennstoff (Uran-235, Plutonium-239 und -241)
- Als Hauptanteil verbrauchten Brennstoffes nicht in Plutonium umgewandeltes Uran-238.

Wiederaufbereitungsanlagen sollen unverbrauchten und erbrüteten Brennstoff zur Wiederverwendung vom radioaktiven Abfall bzw. vom abgebrannten Brennstoff trennen. Der Gehalt an Radionukliden und deren Mischungsverhältnis ist von vielen Faktoren, insbesondere von der Art, Herkunft und Vorgeschichte des Abfalls abhängig.

2.5 Lagerung

Bisher ist die Entsorgung radioaktiven Abfalls weltweit nur unbefriedigend gelöst, obwohl seit Jahrzehnten technische Verfahren zur Konditionierung und Endlagerung erprobt werden. Insbesondere mittel- und hochradioaktive Abfälle stellen große Herausforderungen an die Entsorgung. Aufgrund der langen Halbwertszeiten vieler radioaktiver Substanzen und deren hohen Radioaktivität, welche neben der toxikologischen Wirkung der meisten Stoffe das eigentliche Gefahrenpotential trägt, muss eine absolut sichere Lagerung gewährleistet werden. Beispielsweise beträgt die Halbwertszeit von Plutonium-239 rund 24.000 Jahre. In Europa warten 8000 m³ HLW in Zwischenlagern auf die Endlagerung, jährlich werden es 280 m³ mehr.

2.6 Endlagerung

Aufgrund der langen Zeiträume, sowie der Strahlenwirkung sind die Baumaterialien der Deponien nicht notwendigerweise dauerhaft in der Lage, die eingebundenen Stoffe zurück zu halten. Durch Strahlenschäden kommt es zu Veränderungen der Mikrostruktur im abschirmenden Material, was zu einer dauerhaften Schwächung und Disintegrität der Abschirmung führen kann.

Unterirdische Lagerstätten sollen keinen Wasserdurchfluss haben, da Wasser Korrosion der Lagerbehälter sowie Transport radioaktiver Stoffe stark beschleunigt. Selbst nach Zerfall der Lagerbehälter soll ein Transport der radioaktiven Substanzen durch das Gestein sehr langsam erfolgen. Die geologischen Eigenschaften des Gebirges sollen dabei den sicheren Einschluss der radioaktiven Stoffe gewährleisten, so dass diese nicht in die Biosphäre gelangen können. Die Untersuchungen zur Schaffung von

Warnzeichen und Warnsymbolen, die über Jahrtausende auf die eingelagerten radioaktiven Stoffe hinweisen, werden unter dem Begriff Atomsemiotik zusammengefasst.

An die Erkundung, Errichtung, den Betrieb und auch die Sicherung von Endlagern für radioaktive Stoffe sind prinzipiell die gleichen Anforderungen zu stellen, wie an Endlager für nicht-radioaktive hochtoxische Stoffe. Als Endlagerstätten werden etwa Salzstöcke in geologisch stabilen Gesteinsschichten diskutiert. Auch Granit, Tongestein oder Tuff kommen als Wirtsgesteine in Frage. Die seit 1979 andauernde Erkundung des Standortes im Salzstock Gorleben in Norddeutschland wurde im Oktober 2000 durch das BMU unterbrochen.

Zwischen 1967 und 1978 wurde in der Schachanlage Asse die Einlagerung radioaktiver Abfälle großtechnisch erprobt. Nach Bekanntwerden größerer Salzlaugenzuflüsse zum Bergwerk wurde die Schachanlage Asse zum 1. Januar 2009 vom Bundesamt für Strahlenschutz übernommen, welches die seit 1995 andauernde Schließung weiter durchführt.

Eine erste Differenzierung von Atommülllagern erfolgt durch die Unterscheidung in:

a) zentrale Lager oder dezentrale Lager

- Zentrale Lagerhaltung bedeutet die räumliche Zusammenfassung aller Lagerhaltungsfunktionen und aller Lagergüter unter einheitlicher Leitung. Die Vorteile, die sich aus der zentralen Lagerung ergeben, sind eine Erleichterung der Warenannahme, Pflege, Erhaltung, Bestandsermittlung und -prüfung. Weitere Punkte sind geringere Vorräte und geringere Raumkosten.
- Bei der dezentralen Lagerhaltung werden die Einsatzstoffe am Ort des Bedarfsträgers in Form von Zwischenlager (Pufferlager) gelagert. Die wesentlichen Vorteile dieser Lagermethode sind die höhere Flexibilität, die genauere Disposition der einzelnen Materialien in den Fertigungsbereichen und die kürzeren Transportwege.

b) Unterscheidung nach Art des Lagers

- Tiefengeologisch
Für die Endlagerung hochtoxischer radioaktiver Abfälle und verbrauchten Brennstoffes verfolgt der Mainstream weltweit als Konzept die Lagerung der Abfälle in tiefen geologische Formationen (ca. 300 – 1.000 m Tiefe).
- Oberflächennahe
Für kurzlebige schwach- und mittelradioaktive Abfälle existieren oberflächennahe Endlager (in etwa 5 bis mehrere 10 m Tiefe) in vielen Ländern, z. B. in Frankreich, Großbritannien, Spanien, Tschechien und in den USA.
- An der Oberfläche
On-Site-Lagerung (u.a. am Standort des AKW)

3 Anforderungen der Regulierungsbehörde

3.1 Sicherheitsaspekte tiefegeologischer Endlagerung am Beispiel Deutschland

In der Stellungnahme des BfS zu den von der GRS verfassten „Sicherheitsanforderungen an die Endlager hoch radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen“ im Jahr 2007 gibt das BfS einige Empfehlungen ab. Diese Empfehlungen wurden in die Endfassung des Berichtes vom Juli 2009 übernommen, und umfassen drei Punkte in drei Kapiteln:

- Die Optimierung des Endlagers mit Blick auf eine zuverlässige Isolation der radioaktiven Stoffe im Endlager vor zukünftigen menschlichen Aktivitäten ist nachrangig zu den oben aufgeführten Optimierungszielen durchzuführen. Da zukünftige menschliche Aktivitäten nicht prognostiziert werden können, sind Referenzszenarien für ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Endlager, denen derzeit übliche menschliche Aktivitäten zugrunde liegen, zu analysieren. Im Rahmen dieser Optimierung ist auf eine Reduzierung der Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens und ihrer radiologischen Auswirkungen auf die allgemeine Bevölkerung hinzuwirken. (Kapitel 5: Schrittweises Verfahren und Optimierung, Unterpunkt 5.2)
- Nach der Stilllegung des Endlagers sind Beweissicherungsmaßnahmen sowie Kontrollmaßnahmen durchzuführen. Es ist rechtzeitig vor Abschluss der Verschlussstätigkeiten festzulegen, welche Maßnahmen durchzuführen sind, welche Organisation diese durchführt und mit welchen Ressourcen dies versehen wird. Für die Zeit nach erfolgtem Verschluss sind administrative Vorkehrungen zu treffen, die so effektiv wie praktisch erreichbar bewirken, dass keine den dauerhaften Einschluss der Abfälle gefährdenden menschliche Aktivitäten im Bereich des Endlagers durchgeführt werden. Diese Maßnahmen müssen außerdem so konzipiert sein, dass sie möglichst lange in die Zukunft wirksam bleiben. (Kapitel 9: Sicherheitsmanagement, Unterpunkt 9.7)
- Für die Zeiten nach Verschluss des Endlagers sind vor Stilllegung des Endlagers Regelungen für Umfang, Erhalt und Zugänglichkeit der aufzubewahrenden Dokumentation durch den Bund im Benehmen mit der Genehmigungsbehörde zu treffen. Die nach Verschluss des Endlagers aufzubewahrende Dokumentation muss alle Daten und Dokumente aus der während des Betriebs fortgeschriebenen Dokumentation enthalten, die für die Information zukünftiger Generationen relevant sein könnten. Hierzu gehören insbesondere Informationen darüber, welcher Bereich in der Umgebung des Endlagerbergwerks vor menschlichen Eingriffen in den tiefen Untergrund geschützt werden muss bzw. welche Eingriffe mit besonderen Auflagen versehen werden müssen. Vollständige Dokumentensätze sind bei mindestens zwei unterschiedlichen geeigneten Stellen aufzubewahren. (Kapitel 10: Dokumentation, Unterpunkt 10.2)

Detaillierter mit dem Thema befasste sich in Deutschland im Jahr 2008 der Arbeitskreis (im Folgenden als AK bezeichnet) „Szenarienentwicklung“ mit dem menschlichen Eindringen in ein Endlager für radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen. Unter „menschlichem Eindringen“ (Human Intrusion) versteht der AK alle menschlichen Aktivitäten nach Verschluss des Endlagerbergwerks, die die Barrieren innerhalb des verfüllten und verschlossenen Grubengebäudes und den einschlusswirksamen Gebirgsbericht unmittelbar schädigen. Weiters geht der AK davon aus, dass das

menschliche Eindringen im Sicherheitsnachweis behandelt werden muss. Eine umfassende Untersuchung des menschlichen Eindringens auf der Grundlage einer systematischen Szenarienentwicklung würde die Vorhersage des menschlichen Handelns [...] zukünftiger Generationen erfordern. Es wird davon ausgegangen, dass dies nicht möglich ist, und daher im Sicherheitsnachweis gesondert betrachtet werden muss.

Der AK unterscheidet zwei Kategorien:

- Unbeabsichtigtes Eindringen
- Bewusstes Eindringen

Unter unbeabsichtigtem Eindringen versteht der AK menschliches Eindringen unter der Voraussetzung, dass das Wissen um die Gefahren verloren gegangen ist. Bewusstes Eindringen setzt die Kenntnis über das Gefahrenpotential voraus. Der AK kommt zu dem Schluss, dass ausschließlich unbeabsichtigtes menschliches Eindringen für den Sicherheitsnachweis zu betrachten ist. Die Verantwortung für die Konsequenzen eines bewussten Eindringens kann nur von der jeweils handelnden Gesellschaft übernommen werden.

Der AK argumentiert, dass deutsche Bergbauarchive bis zu 500 Jahre zurückreichen, und aus diesem Grund unbeabsichtigtes menschliches Eindringen erst nach 500 Jahren zu unterstellen wäre. Daher vertritt der AK die Auffassung, dass bei der Planung und Errichtung eines Endlagers geeignete und angemessene Maßnahmen ergriffen werden müssen. Diese sollten die Endlagersicherheit jedoch nicht beeinträchtigen. Nach Meinung des AK ist die wirksamste Maßnahme hierfür, das Endlager in tiefen geologischen Schichten anzulegen und einen möglichst langen Wissenserhalt anzustreben. Der AK hält dennoch fest, dass die Konzentrierung und Isolierung der radioaktiven Abfälle zwangsläufig im Fall eines Eindringens die Grenzwerte für eine radiologische Belastung überschritten werden können.

Abschließend empfiehlt der AK, das Spektrum von menschlichem Eindringen zu beschränken. Im Fall von Salz als Wirtsgestein, auf das Niederbringen einer Aufschlussbohrung, die Errichtung eines Bergwerks und die Erstellung von Kavernen. Der AK empfiehlt weiters, die Rahmenbedingungen zur Ableitung solcher Szenarien regulatorisch festzulegen.

3.2 Sicherheitsaspekte tiefegeologischer Endlagerung am Beispiel USA (Yucca Mountain)

Die Autoren der „Technical Bases for Yucca Mountain Standards (1995)“ befassten sich unter anderem mit der Möglichkeit und den Auswirkungen eines menschlichen Eindringens in ein Endlager am Fallbeispiel Yucca Mountain, wenngleich sie zum Schluss kommen, dass dieses für andere tiefe geologische Endlager ebenfalls zutreffend ist. Es wird darauf hingewiesen, dass es nicht möglich ist, Wahrscheinlichkeiten, das menschliche Eindringen in ein Endlager betreffend, zu errechnen. Des Weiteren wurde herausgestrichen, dass das menschliche Eindringen nicht Teil des Sicherheitsnachweises sein kann, da es zu viele unbekannte Variablen gibt. Allerdings wird vorgeschlagen zumindest ein vereinfachtes Szenario anzunehmen, und dieses anzuwenden (Als mögliches hypothetisches Szenario wurde eine einfache Bohrung zum Zweck der Ressourcenexploration mit beschädigtem Container angenommen).

Die Autoren der Studie unterscheiden zwischen 2 verschiedenen Maßnahmen, welche getroffen werden können um ein menschliches Eindringen zu verhindern:

- Aktive Maßnahmen
- Passive Maßnahmen

Die aktiven Maßnahmen umfassen den Schutz des Endlagers durch Institutionen (z.B.: den Staat). Es wird angeführt, dass dieses nur so lange funktionieren kann, solange genügend Ressourcen für eine solche Bewachung vorhanden sind. Des Weiteren wird kritisch hinterfragt, wie lange Gesellschaften projiziert werden können. Es wird angeführt, dass jegliche Langzeitprognosen wissenschaftlich nicht haltbar sind und deshalb nicht berücksichtigt werden.

Die beschriebenen passiven Maßnahmen umfassen Warnhinweise, Barrieren, und archivarische Aufzeichnungen. Hier wird zu bedenken gegeben, dass sich Sprachen im Laufe der Zeit ändern können und im besten Fall vielleicht nur eine Hand voll Personen diese Sprache auch in Zukunft noch verstehen kann. Auch hier gibt es keine Sicherheit, dass passive Maßnahmen über einen langen Zeitraum effektiv sind.

Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, sowohl aktive als auch passive Maßnahmen anzuwenden, um zumindest für eine gewisse Zeit menschliches Eindringen zu verhindern.

Verschiedene Typen von menschlichem Eindringen wurden thematisiert:

- Eindringen in das Endlager bei Explorationsarbeiten
- Eindringen aufgrund von Neugierde aufgrund der Warnhinweise
- Mutwilliges Eindringen zum Zweck der böswilligen Nutzung des Inhaltes

Beim Eindringen bei Explorationsarbeiten werden vor allem Bohrungen in den Fokus gestellt, unabhängig vom Stand der Technik. Des Weiteren wird angesprochen, dass sich Rohstoffe in der Gegend befinden könnten, welche in Zukunft von Wert sein könnten. Das Eindringen via Bohrungen kann durch eine einzelne Bohrung geschehen, oder durch multiple Bohrungen, welche in die Kavernen eindringen können.

Das Eindringen aus Neugierde und Unwissenheit spielt vor allem auf lange Sicht eine gewisse Rolle. Es wird allerdings angesprochen, dass Warnhinweise, welche eine solche Neugierde auslösen können, mehr positive als negative Implikationen mit sich bringen – vor allem auf kurze Sicht.

Das mutwillige Eindringen kann durch eine feindliche Nation oder eine subnationale Gruppe geschehen. Ein mutwilliges Eindringen (gut wie böse intendiert) wird als durchaus wahrscheinlich eingestuft, vor allem wenn man die Energiemenge betrachtet, welche der geplante Inhalt von Yucca Mountain beinhaltet. Allerdings wird darauf hingewiesen, dass man gegen einen mutwilligen Versuch – zur Zeit - keine adäquaten Gegenmaßnahmen setzen kann.

Es wurde vorgeschlagen ein einfaches hypothetisches Szenario zu betrachten. Es handelt sich hierbei um eine einfache Bohrung zum Zweck der Ressourcenexploration welche in das Lager eindringt und einen Container beschädigt. Es wird empfohlen ein solches Szenario für diverse tiefegeologische Endlager anzuwenden.

In einem weiteren Schritt wurden die möglichen Gefahren, welche bei dem beschriebenen Szenario entstehen können, erörtert:

- Gefahren für den Eindringling durch den Inhalt des Lagers
- Gefahren für die Allgemeinheit durch den Transport von Material an die Oberfläche
- Gefahren für die Integrität des Endlagers

Für die ersten beiden Punkte wurde zusammenfassend festgestellt, dass es nicht möglich ist eine genaue Aussage zu treffen, und dass diese beiden Punkte für alle Lagertypen zutreffend sind – unabhängig von Standort und Design.

Daher wurde vorgeschlagen sich vor allem auf Punkt drei zu konzentrieren, da für die ersten beiden Punkte nach aktuellem Stand der Technik keine Aktionen seitens des Regulators getroffen werden können. Punkt drei kann aus heutiger Sicht analysiert und beeinflusst werden, indem Barrieren und Anpassungen dieser zu einer erhöhten Resilienz des Endlagers führen können.

3.3 Sicherheitsaspekte von Endlagern an der Oberfläche

Nach Stand von Wissenschaft und Technik gibt es zurzeit kein bekanntes Konzept zur Endlagerung von abgebrannten Brennelementen und HLW an der Oberfläche.

An der Oberfläche gibt es derzeit zahlreiche Zwischenlager, welche zumeist für einen Zeitraum von etwa 50 Jahre dimensioniert wurden. Auf der anderen Seite ist die Oberflächenlagerung die einzige Lagerform, welche – wenngleich auch nur für einen kurzen Zeitraum – gezeigt hat, dass sie handhabbar ist und Erfahrungswerte bestehen. Daher kam das Autorenteam zu dem Schluss, dass Ableitungen von Zwischenlagern auf Endlager bei ähnlicher Konzeptionierung Daten liefern, welche einen Überblick über die potentiellen sicherheitsrelevanten Aspekte für Endlager an der Oberfläche liefern können.

Mit der Thematik der Sicherheit von kommerziellen Zwischenlagern für abgebrannte Brennelemente hat sich eine Kommission in den USA beschäftigt. Im Bericht „Safety and Security of Commercial Spent Fuel Storage“ aus dem Jahr 2006 beschäftigen sich die Autoren unter anderem mit folgenden Fragestellungen:

- Potenzielle Sicherheitsrisiken von bzw. für abgebrannte Brennelemente
- Sicherheitsvorteile im Vergleich zwischen Trockenlagern und Nasslagerung
- Mögliche Sicherheitsvorteile von Modellen von Containern in Trockenlagern
- Risiko von terroristischen Angriffen auf diese Materialien und das Risiko, dass das Material zum Bau einer „schmutzigen Bombe“ verwendet wird.

Die zentralen Erkenntnisse der Kommission waren folgende:

- Nach Meinung der Kommission ist es möglich, aber schwierig, dass Terroristen Zwischenlager angreifen.
- Wenn ein Angriff zu einem Feuer der Zirkoniumummantelung der Brennelemente führt, kann es zu einer großen Freisetzung von Radionukliden kommen.
- Trockenlager haben Sicherheitsvorteile gegenüber Abklingbecken.
- Es gibt keine großen Sicherheitsunterschiede zwischen den verschiedenen Container Designs.
- Für Terroristen ist es schwierig, eine genügend große Menge von abgebrannten Brennelementen zu entwenden, sodass diese in der Lage wären eine signifikante „schmutzige Bombe“ zu bauen.

Besonders interessant für den Bericht war das Kapitel betreffend des menschlichen Eindringens, welches im betrachteten Bericht vor allem vor dem Hintergrund des Terrorismus gesehen wurde. Die Verfasser des Berichtes haben sich auf vier Szenarien konzentriert, ohne jedoch Wahrscheinlichkeiten anzugeben, da diese nicht errechnet werden konnten. Die vier ausgearbeiteten repräsentativen Szenarien waren folgende:

- Angriff auf ein Zwischenlager mit einem großen zivilen Flugzeug, bzw. einem kleinen Flugzeug, welches mit explosiven Stoffen beladen ist.

- Angriff durch eine militärische bzw. gut bewaffnete Gruppe über Land
- Kombiniertes Luft- und Bodenangriff
- Diebstahl von abgebrannten Brennelementen durch Terroristen und Verwendung in einer „schmutzigen Bombe“

Der Angriff mit einem nuklearen Sprengsatz auf ein Zwischenlager wurde als schwierig, jedoch potenziell möglich, eingestuft. Gleichzeitig gaben die Autoren der Studie zu bedenken, dass es viel interessantere Ziele für den Einsatz einer Kernwaffe gibt, als ein Zwischenlager. Für die vier herausgestrichenen Szenarien kann gemeinsam festgehalten werden, dass alle Szenarien von Standort zu Standort verschieden sind. Die Schwachpunkte und Stärken der unterschiedlichen Designs und Barrieren wurden im öffentlich zugänglichen Bericht aus Sicherheitsgründen nicht ausgeführt. Auch andere und weiterführende Szenarien wurden zwar durchgespielt, jedoch nicht der Allgemeinheit zugänglich gemacht.

3.4 Sicherheitsaspekte von oberflächennahen Endlagern

Die Datenlage zu oberflächennahen Endlagern ist äußerst dürftig und spezifische Daten zu diesem Lagertyp waren für die Autoren nicht erhebbbar. Daher wurde von Seite der Autoren versucht, die für diese Lagerform signifikanten und relevanten Aspekte der tiefengeologischen und der Lagerung an der Oberfläche zusammenzuführen, um zumindest einen Überblick über die Situation geben zu können.

Infolge dieser Analyse wurde festgestellt, dass die oberflächennahen Lager aus sicherheitstechnischer Sicht große Ähnlichkeit zu den Lagern an der Oberfläche aufweisen. Es besteht lediglich ein besserer Schutz gegenüber Angriffen aus der Luft, da das Lager unterirdisch angelegt ist. Ansonsten gelten dieselben Sicherheitsaspekte wie für Lager an der Oberfläche.

4 Ausgewählte Bedrohungsszenarien

Im Anschluss findet sich eine kurze Aufstellung von möglichen Bedrohungsszenarien und deren Präventivmaßnahmen, welche die Lagerung und Endlagerung für LLW, ILW (auch eine Mischung aus chemischem und radioaktivem Abfall), zusammengefasst als LILW bezeichnet, und HLW (für Kernbrennstoff sowohl in trockener und flüssiger Lagerung) sowie den Transport berücksichtigt.

4.1 Bedrohung eines Lagers für abgebrannte Brennelemente

Die Lagerung von verbrauchtem Brennstoff in Pools hat zwei grundlegende Konzepte - Pool-Lagerung innerhalb des Containments und Pool-Lagerung außerhalb des Containments.

- Die Pool-Lagerung außerhalb eines Containments ist grundsätzlich anfälliger und nicht so leicht in der Lage einem Angriff mit Schusswaffen, oder einer Infiltration mit Sprengköpfen zu widerstehen. Daraus kann sich ein teilweiser Abfluss des Kühlwassers im Brennstoffpool und in der Folge ein Brand des heißen Brennstoffes ergeben.
- In den meisten Ländern ist der Zeitpunkt der Brennstoffentsorgung öffentlich bekannt, aber in jedem Land ist es möglich, diesen durch (illegale) Methoden herauszufinden.
- Wie frühere Gutachten an dicht gelagerten Brennelementen zeigen, kann innerhalb einer Frist von 30-90 Tagen nach dem Brennstoffaustausch ein sich selbst fortsetzendes Feuer ausbrechen. Dieses Intervall ist u.a. von der Größe der Abstände der gelagerten Brennelemente und dem Intervall des Brennstoffkreislaufes abhängig.
- Trocken gelagerte abgebrannte Brennelemente auf betonierte Plätzen sind besonders durch Feuer mit hohen Temperaturen gefährdet. Diese Feuer können durch ein von Terroristen gelenktes Flugzeug, einen mit Treibstoff beladenen Tanklastwagen und dessen absichtliche Zerstörung in unmittelbarer Nähe der Lagerstätte, oder gezielte Brandstiftung entstehen. Der Einsatz von hitzeentwickelnden Waffen ist ebenso zu berücksichtigen.
- Ebenso könnten „Hightech-Waffen“ von Terroristen zum Einsatz gebracht werden, wie HEAT (high explosive anti-tank) Sprengstoff und Panzerabwehrraketen (z.B. Javelin).
- Diebstahl von abgebrannten Brennelementen wird wegen der Schwere der befüllten Aufbewahrungsbehälter und der radiologischen Gefahr als unpraktikabel angesehen. Jedoch sollte die Möglichkeit eines gezielten terroristischen Selbstmordanschlags in Betracht gezogen werden. Der Aufbau des notwendigen Geräts zum Heben des Behälters benötigt einige Zeit, was dem Sicherheitspersonal ein rechtzeitiges Einschreiten ermöglicht.
- Die eben erwähnten Gefahren gelten auch für den Transport von abgebrannten Brennelementen. Allerdings kommt hierbei hinzu, dass Terroristen den Ort des Überfalls auswählen und zu ihrem Vorteil nutzen können.

4.2 Sicherheitsbedrohungen bei HLW

Im Folgenden sollen zwei Formen des HLW betrachtet werden – liquid HLW und vitrified HLW als Abfallprodukte der Wiederaufbereitung.

- Liquid HLW Lagertanks sind grundsätzlich anfällig für Beschädigungen durch Beschuss oder Flugzeugabsturz. Eine Freisetzung des Inhaltes ist als Folge hiervon sehr wahrscheinlich.

- Vitrified HLW ist durch seine hohe Aktivität, sein hohes Gewicht (ebenso seine Transportbehälter) und seine einer Verbreitung hinderliche chemische Form für terroristische Handlungen nicht attraktiv.

4.3 Gefährdung durch nicht mehr genutzte Strahlenquellen

- Nicht mehr genutzte Strahlenquellen können gestohlen und als Basis für RDD (radiological dispersal device, auch als „dirty bomb“ bezeichnet) Verwendung finden. Quellen mit einem hohen Anteil an Co-60, Sr-90, Cs-137, Ir-192, Ra-226, Pu-238, Am-241 und Cf-252 eignen sich hervorragend für terroristischen Gebrauch. Ebenso gut eignet sich hierfür auch Plutoniumoxid aus dem Wiederaufbereitungsprozess, findet aber in der Literatur selten Erwähnung.
- Auch noch in Verwendung stehende Quellen können aus technischen Einrichtungen, Krankenhäusern, u.ä. gestohlen und für den Bau von RDDs verwendet werden.

4.4 Sicherheitsbedrohungen in Verbindung mit LILW

- LILW birgt im Wesentlichen die Gefahr einer (groß)flächigen Kontamination in diesem Fall hauptsächlich durch Feuer. Als Waffe eingesetzt wirkt LILW nicht primär auf die Gesundheit und Sicherheit, sondern stellt eine ökonomische Bedrohung dar. Die Möglichkeit des Einsatzes als Druckmittel bei einer Erpressung macht diese Form des radioaktiven Abfalls für kriminelle Aktivitäten interessant.
- Eine besondere Form des LILW sind Zylinder mit abgereichertem Uranhexafluorid. Diese Behälter sind besonders anfällig für Beschädigung und können für terroristische Zwecke leicht eingesetzt werden. Eine großflächige Kontamination ist dadurch möglich. Die Hauptgefährdung liegt in der Toxizität des UF_6 . Die einfachste Möglichkeit um eine Freisetzung zu verhindern ist das vorhandene UF_6 in Uranmetall zu verarbeiten. Es gibt nur wenige Lagerstätten die über große Mengen von UF_6 verfügen, in diesen sind jedoch mehrere Tonnen LILW gelagert. Ein gezielter Flugzeugabsturz, oder der Diebstahl eines Tanklastwagens und dessen gezielt herbeigeführte Explosion in der Nähe der UF_6 Zylinder könnte die Freisetzung des Inhaltes mehrerer dieser Container bewirken. Einzelne Behälter (oder kleine Gruppen dieser Zylinder) können mit Raketen (z.B. Panzerabwehrraketen) sehr leicht beschossen werden, was ebenfalls zur Freisetzung radioaktiver Substanzen führen würde.

4.5 Unfallbedingte Gefahren

- In Ergänzung zu feindlichen Handlungen gibt es auch unfallbedingte Sicherheitsbedrohungen, die direkt mit radioaktivem Abfall in Verbindung stehen. Zu diesen Bedrohungen zählen Explosion oder Feuer nahe an der Lagerstätte gelegenen Treibstofftanks (u.a. für Notstromgeneratoren) oder zur weiteren Versorgung eingesetzter Tankfahrzeuge. Flugzeugabstürze und unbeabsichtigter Einsatz von Schusswaffen durch das Security-Personal zählen ebenso zu dieser Kategorie. Diesen Bedrohungen kann vor allem durch die Wahl eines geeigneten Standortes, entsprechende Bauweise der Lagerstätte und angemessene Ausbildung des Sicherheitspersonals vorgebeugt werden. Trotz allem bleibt ein nicht zu eliminierendes Restrisiko z.B. durch Unfälle im Flugverkehr in großer Höhe, da Lagerstätten für radioaktiven Abfall (so beispielsweise Lagerstätten für UF₆) sehr weitläufig angelegt sind.

5 Bestehende und zukünftige Endlagerstätten

Anhand folgender Auswahl sollen verschiedene Endlagerstätten kurz dargestellt werden.

Obwohl sich für Endlagerstätten international derzeit das Hauptinteresse auf tiefegeologische Lagerstätten konzentriert, sind übergangsweise, d.h. für den Zeitraum von 100 Jahren, auch oberflächennahe und Lager an der Oberfläche in Betrieb bzw. in Planung.

5.1 Yucca Mountain

Das geplante Endlager in Yucca Mountain sieht derzeit 3 Portale vor, über die die 400-600 m tief angelegten Tunnel und Kavernen zugänglich sein sollen. Insgesamt sind 40 Meilen Tunnel vorgesehen in denen 77.000 t HLW gelagert werden könnten. Die Möglichkeit der Rückholung des deponierten HLW soll für mindestens 50 Jahre gegeben sein, wobei selektive Rückholung beliebiger Container möglich sein soll. Daher ist die Zugänglichkeit aller Bereiche des Endlagers prinzipiell gegeben. Das Yucca Mountain Projekt wird derzeit nicht fortgesetzt.

5.2 COVRA - Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval

Auf dem Gelände des KKW Borssele befindet sich das Zwischenlager COVRA. Da dieses aber für ein Bestehen von mindestens 100 Jahren ausgelegt ist, und keine weitere Endlagerlösung derzeit aktiv gesucht wird, soll kurz darauf eingegangen werden. COVRA stellt Speicherkapazität für ca. 3000 t wiederaufbereiteten HLW bereit. Dieser wird in einem 10 m hohen, in Warnfarben gestrichenen Betongebäude aufbewahrt, das vom Rest des Geländes durch zusätzliche Sicherheitszäune abgetrennt ist.



Luftaufnahme von COVRA, (Quelle: google earth)

5.3 Forsmark

Auf dem Gelände des KKW Forsmark ist die Endlagerung des HLW vorgesehen. Dazu soll die KBS-3-Methode angewandt werden. Bei dieser wird der Abfall in Eisen-Rohre gefüllt, die wiederum mit Kupfer ummantelt werden. Die so entstandene zylindrische

Kapsel wird in 500 m Tiefe in Bentonit deponiert. Gefüllte Bohrlöcher werden versiegelt und markiert.

5.4 Schacht Konrad

Der Schacht Konrad, ein stillgelegtes Eisenbergwerk in Salzgitter, Deutschland, wird derzeit als Endlager für Abfälle mit geringer Wärmeentwicklung umgebaut. Die Kammern für die Lagerung von insgesamt 303.000 t Abfall befinden sich zwischen 800 m und 1300 m Tiefe. Sie werden nach Abschluss der Einlagerung jeweils mit Beton vergossen.

5.5 Jordan Radioactive Storage Facility

Die Jordan Radioactive Storage Facility soll in Amman die radioaktiven Abfälle Jordaniens aufnehmen. Die Lagerzeit ist auf 50 Jahre ausgelegt.

5.6 Wiederaufbereitungsanlage La Hague

Die von AREVA betriebene Wiederaufbereitungsanlage La Hague befindet sich am Kap La Hague am äußersten nord-westlichen Punkt der Normandie. Die Anlage besitzt eine planmäßige Kapazität von 1100 t/a und lagert derzeit mehrere tausend Tonnen abgebrannter Brennelemente in Pools. Diese befinden sich in stark befestigten Gebäuden (allerdings nur teilweise unterirdisch), die wiederum von einer Zwei-Zonen-Perimeter-Abwehr umgeben sind. Es besteht ein eigener (privater) Sicherheitsdienst. Ein Gebiet von 10 km Radius ist als Flugverbotszone deklariert und wird durch in der Nähe befindliche Boden-Luft-Raketen geschützt.

AREVA gibt an, dass die Anlagen einem Treffer durch ein zweimotoriges Flugzeug standhalten, große kommerzielle Maschinen aufgrund der geringen Unfalls-Wahrscheinlichkeit aber nicht betrachtet wurden. Weiters sind die einzelnen Pools baulich voneinander getrennt, ein Treffer der mehrere Pools gleichzeitig beschädigt wird also als sehr unwahrscheinlich betrachtet, genauso wie die gesamte Trefferwahrscheinlichkeit für Pools, da diese nur einen geringen Teil der Gesamt-Anlagenfläche ausmachen.

Bei der Betrachtung der Freisetzung von radioaktivem Material ist zu berücksichtigen, dass die Gegend nur schwach bevölkert ist und starke Winde und Meeresströmungen vorherrschen.

Im Sinne des Technical Bases for Yucca Mountain Standards (1995) ist anzunehmen, dass ein gezieltes Eindringen mit Hilfe gut trainierter Truppen, bzw. unter Mithilfe von Mitarbeitern der Anlage möglich ist.



Luftaufnahme von AREVA – La Hague, (Quelle: google earth)

5.7 Vergleich von Konzepten

Es sollen im folgenden die Standorte Yucca Mountain, Forsmark und Schacht Konrad verglichen werden, da diese repräsentativ für alle bestehenden Konzepte sind.

In Hinsicht auf die Sicherheit gegenüber gezielten Versuchen des Eindringens oder Zerstörens sind Konzepte wie in Schacht Konrad und Forsmark sehr robust. Speziell bei der KBS-3-Methode (schwedisches Konzept für die Brennstoffendlagerung) ist der Zugang zu den vergrabenen Kapseln nur mit schwerem Gerät möglich und erfordert daher verhältnismäßig großen zeitlichen Aufwand. Es kann davon ausgegangen werden, dass dies, unter der Voraussetzung periodischer Kontrollen des betroffenen Geländes, durch staatliche und/oder private Sicherheitskräfte verhindert werden kann, falls solche Strukturen zum fraglichen Zeitpunkt existieren. Auch mit Beton vergossene Stollen sind nur unter großen Aufwand wieder zu öffnen und erlauben damit nur schwer Zugriff auf den Inhalt. Aufgrund der tiefengeologischen Lagerung ist eine Verteilung in der Luft durch Sprengkörper sehr unwahrscheinlich.

Das Konzept der Rückholbarkeit, das beim Yucca-Mountain Lager verfolgt wurde, hat zwar große Vorteile in Hinsicht auf die Überwachbarkeit und Kontrolle der eingebrachten Behälter, aber den Nachteil, dass direkter Zugriff auf dieselben möglich ist. Es ist in Anbetracht der hohen Strahlungswerte und Temperatur fragwürdig, ob ein Entfernen radioaktiven Materials aus den bereits eingelagerten Behältern möglich ist. Eine gezielte Beschädigung der gelagerten Behälter ist allerdings durchführbar und kann zu einer Beeinträchtigung der vorhandenen Barrieren und zur Freisetzung der eingelagerten Stoffe, etwa in das Grundwasser, führen.

Eine Lagerung in überirdischen Lagerstätten ist aus sicherheitstechnischer Sicht sehr kritisch zu bewerten, da auch stark befestigte Gebäude gegenüber schweren Waffen oder etwa abstürzenden Flugzeugen nur begrenzten Schutz bieten können. Die im Vergleich zu Tiefenlagern leichtere Zugänglichkeit lässt für den Fall des Eindringens in die Anlage nur relativ geringe Zeit für ein Einschreiten eventuell vorhandener Sicherheitsdienste, so dass ein permanentes Vorhandensein solcher vor Ort notwendig ist.

Die früher oder später unzugänglich gemachte tiefengeologische Lagerung scheint also gegenüber der zugänglichen oberflächennahen oder oberirdischen Lagerung einen Sicherheitsvorteil (im Sinne von Security) zu bieten. Allerdings – gemessen an den langen Zerfallszeiten der eingeschlossenen Schadstoffe – kann dieser Vorteil nur für relativ kurze Zeitspannen mit einiger Sicherheit lukriert werden. In den

sicherheitsrelevanten Zeiträumen von hunderttausenden bis millionen Jahren kann durch geologische Prozesse wie Seismizität, eiszeitliche Vergletscherungen, Vulkanismus, veränderte Wasserwegigkeiten, et c. radioaktives Material an die Erdoberfläche gelangen, dort in unkontrollierter Art und Weise vorliegen und so wieder zu verschiedenerlei Security und in jeden Fall Safety Problemen führen.

6 Literaturverzeichnis

Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, *Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte*, Appel et.al., 2002

Endlager oder Rückholbarkeit?, *Fachgespräch zur Entsorgung radioaktiver Abfälle*, Harms, 2002

Sicherheitsanforderungen an die Endlager wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Deutsches Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2009

<http://www.grs.de/content/endlagersicherheitsbewertung> (29. November 2010)

International Nuclear Waste Disposal Concepts, World Nuclear Association, 2010

Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel, NUCLEAR ENERGY AGENCY, NEA/RWM(2010)10, 2010-12-23

The Long Term Storage of Radioactive Waste: Safety and Sustainability, a Position Paper of International Experts, IAEA, 2003

Sachplan geologische Tiefenlager, *Herleitung, Beschreibung und Anwendung der sicherheitstechnischen Kriterien für die Standortevaluation*, Schweizerische Eidgenossenschaft, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen HSK, 2007

Endlagersymposium 2008 – Anforderungen an eine sichere Endlagerung, Berlin, 30. Oktober – 1. November 2008

Code of Conduct on the Safety and Security of Radioactive Sources, IAEA, 2004

Evolution and Major Turning Points of HLW Disposal Policy in Several Countries, Hirusawa, Torikai, Numark, Moss;

Nuclear Security Culture, IAEA Nuclear Security Series No. 7, 2008

Preventive and Protective Measures against Insider Threats, IAEA Nuclear Security Series No. 8, 2008

Engineering Safety Aspects of the Protection of Nuclear Power Plants against Sabotage, IAEA Nuclear Security Series No. 4, 2007

Overview of the International Legal Framework Governing the Safe and Peaceful Uses of Nuclear Energy – Some Practical Steps, OECD, Rautenbach, Tonhauser, Wetherall, 2006

Arrangements of Preparedness for a Nuclear or Radiological Emergency, IAEA Safety Standards, No. GS-G-2.1, 2007

Geological Disposal of Radioactive Waste: Technological Implications for Retrievability, IAEA Nuclear Energy Series, No. NW-T-1.19, 2009

Development, Use and Maintenance of the Design Basis Threat, IAEA Nuclear Security Series No. 10, 2009

Security of Radioactive Sources, IAEA Nuclear Security Series No. 11, 2009

Educational Programme in Nuclear Security, IAEA Nuclear Security Series No. 12, 2010

Security in the Transport of Radioactive Material, IAEA Nuclear Security Series No. 9, 2008

Communications on nuclear, radiation, transport and waste safety: a practical handbook, IAEA-TECDOC-1076, 1999

Security of radioactive sources, *Interim guidance for comment*, IAEA-TECDOC-1355, 2003

Technical Bases for Yucca Mountain Standards, *HUMAN INTRUSION AND INSTITUTIONAL CONTROLS*, The National Academy of Sciences, 1995

Legal and Governmental Infrastructure for Nuclear, Radiation, Radioactive Waste and Transport Safety. IAEA Safety Standards Series No. GS-R-1, 2000

<http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/depv/gesamt.pdf> (02. Dezember 2010)

Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen – Entwurf der GRS –, Bericht GRS-A-3358, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln (unveröff.), Baltes, Röhlig, Kindt, 2007

Legal and Governmental Infrastructure for Nuclear, Radiation, Radioactive Waste and Transport Safety, IAEA Safety Standards Series No. GS-R-1, 2000

Method for Developing Arrangements for Response to a Nuclear or Radiological Emergency, IAEA-TECDOC-953, 2003

Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency, IAEA-TECDOC-1162, 2000

Detection of radioactive materials at borders, IAEA-TECDOC-1312, 2002

Response to events involving the inadvertent movement or illicit trafficking of radioactive materials, IAEA-TECDOC-1313, 2002

Prevention of the inadvertent movement and illicit trafficking of radioactive materials, IAEA-TECDOC-1311, 2002

Yucca Mountain Science and Engineering Report, *Technical Information Supportin Site Recommendation Consideration*, U.S. Department of Energy, 2002

Safety and Security of Commercial Spent Fuel Storage, *Public Report*, Board on Radioactive Waste Management, 2006

Position des Arbeitskreises „Szenarientwicklung“: **Behandlung des menschlichen Eindringens in ein Endlager für radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen**, in International Journal for Nuclear Power Heft 8/9 Seite 538-540.

<http://areva.com/FR/actualites-5379/le-point-sur-la-surete-de-l-usine-de-la-hague-face-au-risque-de-chute-d-avion.html> (21. Dezember 2010)

IAEA Safety Glossary, *Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection 2007 Edition*, IAEA, 2007