

ENTRIA-Arbeitsbericht-11

„Vergleichende Risikobewertung zu Auswirkungen von schwerwiegenden menschlichen Einwirkungen von außen bei den ENTRIA-Referenzmodellen“

Transversalprojekt
Interdisziplinäre Risikoforschung
Arbeitspaket Interdisziplinäre Risikoforschung

Wolfgang Neumann
Jürgen Kreusch
unter Mitwirkung von Anne Eckhardt

Kontakt

Dipl.-Geol. Jürgen Kreusch
Dipl.-Phys. Wolfgang Neumann
intac GmbH i.L.
Kleine Düwelstr. 21
D-30171 Hannover
jkreusch@intac-hannover.de
wneumann@intac-hannover.de

Dr. Anne Eckhardt
risicare GmbH
Bühlstraße 19
CH-8125 Zollikerberg
anne.eckhardt@risicare.ch

ENTRIA ist ein in der Forschung zur Entsorgung radioaktiver Reststoffe in Deutschland neuartiges Verbundprojekt von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus unterschiedlichen Disziplinen, die bisher nur sporadisch kooperierten. Um seine neuen Arbeitsweisen und die Vielfalt integrierter disziplinärer Perspektiven transparent zu machen, werden in den Arbeitsberichten wichtige Zwischenergebnisse vorgestellt. Dies dient einerseits der projektinternen Information. Andererseits werden diese Zwischenergebnisse auch der interessierten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Letzteres geschieht, um Einblicke in die ENTRIA-Forschungspraxis zu gewähren und Ausgangsmaterial für spätere Veröffentlichungen offen zu legen. ENTRIA lebt vom pluralen Austausch. Die Beiträge geben allein die Meinung der Autorin oder des Autors wieder.

ENTRIA wird vom BMBF unter dem Kennzeichen **15S9082 A bis E** gefördert (Zeitraum 2013 bis 2017).

In diesem Arbeitsbericht wurden der Stand des ENTRIA-Projektes und der Entsorgungsdiskussion in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Oktober 2017 berücksichtigt. Die inhaltlichen Arbeiten wurden zu diesem Zeitpunkt abgeschlossen.

Zitierweise

Neumann, Wolfgang; Kreusch, Jürgen (2018): Vergleichende Risikobewertung zu Auswirkungen von schwerwiegenden menschlichen Einwirkungen von außen bei den ENTRIA-Referenzmodellen. Hannover, ENTRIA-Arbeitsbericht-11

ISSN (Online): 2367-3540

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

1	Einleitung.....	4
1.1	Aufgabenstellung und Ziel.....	4
1.2	Einordnung	4
1.3	Vorgehen	5
2	Betrachtete Szenarien für Einwirkungen von außen.....	8
3	Angenommene Randbedingungen für die Referenzmodelle	9
4	Sicherheitskonzepte	12
4.1	Sicherheitskonzept für die Lagerung über Tage.....	12
4.2	Sicherheitskonzepte für die Tiefenlagerung	15
5	Bewertete Sicherheitsfunktion.....	16
6	Ermittlung der Möglichkeit von Robustheitsdefiziten bei übertägiger Lagerung	17
6.1	Vorgehen	17
6.2	Bewertung der Möglichkeit von Robustheitsdefiziten bei Behältern	18
6.3	Bewertung der Möglichkeit von Robustheitsdefiziten bei Gebäuden	25
7	Risikovergleich der Referenzmodelle für die übertägigen Lager.....	30
7.1	Radioaktivitätsinventar	32
7.2	Übertägige Lagerzeiträume	36
7.3	Gesamtergebnis des Vergleichs für übertägige Lagerung.....	41
8	Qualitativer Risikovergleich der ENTRIA-Referenzmodelle nach jeweiligem Abschluss der Einlagerung	44
8.1	Vorgehen und Anmerkungen	44
8.2	Tiefenlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit	45
8.3	Tiefenlagerung mit Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit.....	49
8.4	Oberflächenlagerung.....	52
8.5	Risikovergleich.....	52
9	Ergebnis des Risikovergleichs bzgl. schwerwiegender Einwirkungen von außen in der Risikokarte	55
10	Begriffe	60
	Literatur.....	62

Tabelle 6.2-1: Robustheitsdefizite für die Rückhaltung von Radionukliden bei Behältern.....	23
Tabelle 6.3-1: Robustheitsdefizite für die Rückhaltung von Radionukliden bei Gebäuden.....	29
Tabelle 7.3-1: Risikovergleich für schwerwiegende Einwirkungen von außen während der übertägigen Lagerung an den Standorten der ENTRIA-Referenzmodelle.....	42
Tabelle 7.3-2: Risikovergleich für schwerwiegende Einwirkungen von außen während der übertägigen Lagerung an den Standorten der ENTRIA-Referenzmodelle (TE, TM, OL) und in den regionalen Zwischenlagern (TE, TM).....	43
Tabelle 8.5-1: Risikovergleich für schwerwiegende Einwirkungen von außen nach Abschluss der Einlagerung aller Abfälle bei den ENTRIA-Referenzmodellen.....	54

Danksagung

Wir danken PD Dr. Achim Brunnengräber vom Forschungszentrum für Umweltpolitik der Freien Universität Berlin und Dipl.-Ing. Manuel Reichardt vom Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig für ihre Diskussionsbeiträge und textlichen Hinweise zu diesem ENTRIA-Arbeitsbericht.

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung und Ziel

Im Rahmen der Forschungsplattform ENTRIA (Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe, interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen) werden Entsorgungsoptionen für bestrahlte Brennelemente und radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung betrachtet. Diese Abfallarten werden in dem hier vorliegenden Bericht zusammenfassend als hoch radioaktive Abfälle bezeichnet. Für diese Abfälle werden im ENTRIA-Projekt drei Entsorgungsoptionen betrachtet (ENTRIA 2012):

- Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (wartungsfreie Tiefenlagerung),
- Einlagerung in tiefe geologische Formationen mit Vorkehrungen zur Überwachung und Rückholbarkeit (Tiefenlagerung mit Rückholbarkeit),
- Oberflächenlagerung.

Für diese Entsorgungsoptionen werden in den drei nach ihnen benannten Vertikalprojekten von ENTRIA (VP5, VP6 und VP7) Eckpunkte bzw. Anforderungen für die Referenzmodelle entwickelt, soweit dies standortunabhängig möglich ist.

Die **Aufgabe** in dem hier vorgelegten Bericht zur „Vergleichenden Risikobewertung“ besteht darin, die Risiken für die ENTRIA-Referenzmodelle durch Menschen verursachte schwerwiegende übertägige Einwirkungen von außen zu vergleichen. Die hier berücksichtigten schwerwiegenden Einwirkungen von außen gehen über Störfälle, gegen die eine kerntechnische Anlage ausgelegt sein muss und für die der Störfallplanungswert aus der Strahlenschutzverordnung (§ 49) einzuhalten ist, hinaus. Dadurch soll auch ein Risikovergleich für extreme Situationen gewährleistet werden, die für die Sicherheitsdiskussion über Atomanlagen in der Bundesrepublik Deutschland relevant sind.

Ziel ist es, mittels der qualitativen Bewertung der Risiken durch schwerwiegende Einwirkungen von außen bei den Tiefenlageroptionen sowie der Oberflächenlagerung einen weiteren Baustein zur Risikobewertung der ENTRIA-Referenzmodelle zu erhalten.

1.2 Einordnung

In dem im Rahmen des Arbeitspaketes „Interdisziplinäre Risikoforschung“ erstellten Arbeitsbericht 01 wurden die in der Vergangenheit und gegenwärtig weltweit diskutierten Entsorgungsoptionen für hoch radioaktive Abfälle dargestellt (ENTRIA 2015a). Darunter befanden sich auch die drei zu ENTRIA-

Referenzmodellen weiter entwickelten Entsorgungsoptionen für die eine „Vergleichende Risikobewertung“ durchgeführt wird. Diese Bewertung besteht aus vier separaten Teilen:

- Teil I: Vergleichende Risikobewertung von Entsorgungsoptionen für hoch radioaktive Abfälle (Eckhardt 2017). Es werden kalkulierbare Risiken und Ungewissheiten für sicherheitstechnische Auswirkungen unter Berücksichtigung der wissenschaftlichen, gesellschaftlichen, politischen und technischen/sicherheitstechnischen Entwicklung im konventionellen und radiologischen Bereich bewertet.
- Teil II: Qualitativer Vergleich der radiologischen Risiken während der Betriebsphase der Entsorgungsoptionen (Neumann & Kreusch 2017).
- Teil III: Vergleichende Risikobewertung zu Auswirkungen von schwerwiegenden menschlichen Einwirkungen von außen bei den ENTRIA-Referenzmodellen (hier vorliegender Bericht).
- Teil IV: Identifizierung von Robustheitsdefiziten für die vergleichende Bewertung von Referenzmodellen zur Tiefenlagerung (Kreusch & Neumann 2017).

Beim hier vorgelegten Bericht handelt es sich um Teil III der „Vergleichenden Risikobewertung“.

Die Entsorgungsoptionen Endlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit und Einlagerung mit Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit werden in dem hier vorliegenden Bericht beide als Tiefenlagerung bezeichnet. Die Referenzmodelle werden mit TE (Endlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit), TM (Tiefenlagerung mit Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit) und OL (Oberflächenlagerung) abgekürzt.

1.3 Vorgehen

Als von Menschen verursachte schwerwiegende Einwirkungen von außen werden drei Szenarien ausgewählt:

- Gezielter oder zufälliger Absturz eines großen Verkehrsflugzeuges (z.B. Airbus 380),
- Sonstige Einwirkungen Dritter mittels Beschuss mit Hohlladungsgeschossen oder anderen panzerbrechenden Waffen,
- Kriegerische Einwirkungen.

Zu übertägigen Einwirkungen dieser Art kann es an allen Standorten kommen, an denen die hoch radioaktiven Abfälle gelagert werden.

Für diese Einwirkungen wird zunächst die zentrale Sicherheitsfunktion zur Vermeidung oder Begrenzung der durch die Einwirkungen verursachten Auswirkungen ermittelt. Es wird die Robustheit gegen Änderungen im Falle von Einwirkungen von außen ermittelt und im nächsten Schritt geprüft, ob es für diese Sicherheitsfunktion bei den genannten Einwirkungen Robustheitsdefizite während der übertägigen Lagerung gibt. Die vergleichende Risikobewertung für die drei ENTRIA-Referenzmodelle wird dann für zwei Phasen durchgeführt:

1. Die Phase, während der sich die hoch radioaktiven Abfälle zunächst in den Zwischenlagern und dann in den übertägigen Lagern an den jeweiligen Standorten der ENTRIA-Referenzmodelle befinden werden.
2. Die Phase ab dem Zeitpunkt, zu dem jeweils die angestrebte Einlagerung für alle hoch radioaktiven Abfälle bei den drei ENTRIA-Referenzmodellen vollständig abgeschlossen sein wird.

Für die Tiefenlagerung sind das zwei aufeinanderfolgende Phasen, für die Oberflächenlagerung überlappen sie sich jedoch. Die Betrachtung für diese zwei unterschiedlichen Phasen erfolgt, um alle Lagersituationen, in denen sich die hoch radioaktiven Abfälle nach der Entscheidung für eine Entsorgungsoption befinden, in die vergleichende Bewertung einzubeziehen. In der Phase 1 werden die Risiken durch schwerwiegende Einwirkungen von außen ausschließlich für die übertägigen Lagersituationen der hoch radioaktiven Abfälle verglichen. Damit wird auch die Referenzmodell-spezifische Entwicklung der Zwischenlagersituation von der Entscheidung für die Entsorgungsoption bis zum Ende des Zeitraumes zur Einlagerung der hoch radioaktiven Abfälle in die Tiefen- oder das Oberflächenlager berücksichtigt. Die Phase 2 beinhaltet den eigentlichen Vergleich der Referenzmodelle in ihrem angestrebten Endzustand. Das heißt bei den beiden Tiefenlagermodellen befinden sich alle Abfälle unter Tage und beim Referenzmodell Oberflächenlagerung befinden sich alle Abfälle in diesem Lager.

Zu Phase 1.

Die Betrachtungen zum Vergleich der ENTRIA-Referenzmodelle beginnen mit dem Zeitpunkt der Entscheidung für die zu verfolgende Entsorgungsoption. Bei allen drei ENTRIA-Referenzmodellen werden vor und während der Betriebsphase hoch radioaktive Abfälle übertägig gelagert. Bis zum Zeitpunkt des Antransportes zum Standort für die Umsetzung der Entsorgungsoption geschieht das in Zwischenlagern. Beim Referenzmodell für die Entsorgungsoption Oberflächenlagerung (OL) folgt auf den Antransport während des gesamten für diese Option zu betrachtenden Zeithorizont eine übertägige Lagerung. Bei den Referenzmodellen zur Tiefenlagerung (TE und TM) werden die Abfälle zunächst in regionale Zwischenlager gebracht, dort gelagert und dann jeweils in einem kürzeren Zeitraum von der Anlieferung am Standort des Tiefenlagers in einem Eingangslager übertägig puffergelagert, bis sie

unter Tage verbracht werden. Das bedeutet, während der gesamten Einlagerungsphase in das Tiefenlager befinden sich immer beladene Behälter in einem übertägigen Eingangslager am jeweiligen Standort.

Während dieser jeweiligen Zeiträume für TE, TM und OL kann es übertägig zu schwerwiegenden Einwirkungen von außen kommen. Zu betrachten ist, ob und ggf. wie umfangreich Auswirkungen durch Freisetzung radioaktiver Stoffe möglich sind. Für die übertägige Lagerung wird jenseits der gegenwärtig in Betrieb befindlichen Zwischenlager jeweils die gleiche sicherheitstechnische Auslegung unterstellt. Deren Wirksamkeit wird mittels Sicherheitsfunktion und Robustheit bzw. Robustheitsdefiziten bewertet. Dann werden die Unterschiede zwischen den ENTRIA-Referenzmodellen festgestellt und die Risiken der Referenzmodelle für übertägige Einwirkungen von außen qualitativ miteinander verglichen.

Der Vergleich der ENTRIA-Referenzmodelle für diese Phase 1 erfolgt in Kapitel 7.

Zu Phase 2.

Nach Abschluss der vollständigen Einlagerung aller hoch radioaktiven Abfälle ist die Situation bei den ENTRIA-Referenzmodellen unterschiedlich. Bei dem ENTRIA-Referenzmodell zur Oberflächenlagerung befinden sich alle Abfälle während des gesamten Betrachtungszeitraums an der Oberfläche. Bei den ENTRIA-Referenzmodellen zur Tiefenlagerung befinden sich dagegen nach Abschluss der Einlagerung alle Abfälle unter Tage. Das Tiefenlager ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (TE) wird unmittelbar vollständig verschlossen. Beim Tiefenlager mit Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (TM) werden dagegen zunächst nur die Einlagerungsstrecken verschlossen.

Die Risiken durch übertägig verursachte Einwirkungen von außen werden für die ENTRIA-Referenzmodelle zur Tiefenlagerung mit unter Tage befindlichen hoch radioaktiven Abfällen auf Grundlage plausibler Überlegungen betrachtet. Die Ergebnisse werden untereinander und jeweils mit dem zur Phase 1 erzielten Ergebnis für das ENTRIA-Referenzmodell zur Oberflächenlagerung verglichen. Der Risikovergleich zwischen den ENTRIA-Referenzmodellen erfolgt argumentativ und ist rein qualitativ.

Der Vergleich der ENTRIA-Referenzmodelle für diese Phase 2 erfolgt in Kapitel 8.

Darstellung der Ergebnisse aus Kapitel 7 und 8:

Um die Zusammenführung der Ergebnisse der vier vergleichenden Risikobewertungen nachvollziehbarer darzustellen, wurde im Arbeitspaket „Interdisziplinäre Risikoforschung“ von ENTRIA eine **Risikokarte** entwickelt (Eckhardt 2017). In ihr werden die Entwicklungen der Referenzmodelle unter Berücksichtigung von sicherheitstechnischen Risiken mit naturwissenschaftlichen, ingenieurtechnischen

und gesellschaftspolitischen Ursachen entlang eines Zeitstrahles zusammengefasst (siehe Kapitel 9 in diesem Bericht). Dabei erfolgt eine Synthese der Einzelergebnisse, aber keine Entscheidung für einen Gesamtvergleich.

2 Betrachtete Szenarien für Einwirkungen von außen

Es gibt ein breites Spektrum von Einwirkungen auf die Sicherheitsbarrieren von außen, die im Falle der Schädigung zur Freisetzung radioaktiver Stoffe und damit zur Gefahr für Mensch und Umwelt führen können. Nach den atomrechtlichen Vorschriften müssen kerntechnische Einrichtungen gegen einen Teil dieser Einwirkungen ausgelegt werden, dazu gehören zum Beispiel Erdbeben oder Hochwasser. In diesem Bericht werden allerdings nicht natürliche Katastrophen, sondern drei Einwirkungstypen betrachtet, die zivilisatorisch bedingt sind und gegen die die Anlagen aus verschiedenen Gründen in Bezug auf die Einhaltung der Störfallplanungswerte nach § 49 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV 2012) nicht ausgelegt sein müssen. Da durch diese Einwirkungen erhebliche Belastungen verursacht werden, können sie zu einem großen Schadensausmaß führen.

Bei den hier für die vergleichende Bewertung der drei ENTRIA-Referenzmodelle betrachteten Basisszenarien soll die jeweils gleiche Ausgangssituation bestehen. Die Szenarien sind:

- Mechanische und thermische Belastungen durch gezielten oder zufälligen Absturz eines Flugzeuges vom Typ Airbus A 380¹ oder eines vergleichbaren Flugzeuges.

Der Flugzeugabsturz eines A 380 ist in Genehmigungsverfahren für Atomanlagen unter Vorsorgeaspekten zu berücksichtigen (BVerwG 2008, OVG S-H 2013). Die zu treffenden Maßnahmen müssen zwar nicht die Einhaltung der Störfallplanungswerte nach § 49 StrlSchV gewährleisten, sollen die darüber hinaus eintretenden radiologischen Auswirkungen aber möglichst gering gehalten.

- Mechanische und thermische Belastungen durch sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD) mittels Beschuss mit Hohlladungsgeschossen oder anderen panzerbrechenden Waffen.

Im Rahmen der SEWD-Richtlinie sind Betrachtungen zu Einwirkungen von Hohlladungsgeschossen oder anderen panzerbrechenden Waffen in atomrechtlichen Genehmigungs- und Aufsichtsverfahren obligatorisch (AtG 2016). Sie sind unter Vorsorgeaspekten zu bewerten (BVerwG 2008, OVG S-H 2013). Dabei sind alle denkbaren Täterszenarien und die modernste Waffentechnik, unter Einbeziehung absehbarer Entwicklungen, zu berücksichtigen (OVG S-H

¹ Der Airbus A 380 ist das größte im Jahr 2017 im Flugbetrieb befindliche Verkehrsflugzeug. In Zukunft können durchaus noch größere Flugzeuge mit größerem Tankvolumen für Treibstoff entwickelt und in Dienst gestellt werden.

2013). Mit zu treffenden Maßnahmen soll erreicht werden, dass die Möglichkeit für ein solches Ereignis möglichst gering ist und die Freisetzung radioaktiver Stoffe verhindert wird.

- Mechanische und thermische Belastungen durch kriegerische Einwirkungen.

In Bezug auf kriegerische Einwirkungen enthält das Atomgesetz keine Vorgaben, nach denen bestimmte Anforderungen zu erfüllen sind. Aufgrund der weltweiten Entwicklung mit nunmehr wieder zunehmender Aufrüstung und Konfrontation zwischen den unterschiedlichsten Staaten sind kriegerische Einwirkungen mittels Raketen oder Bombenabwurf in den betrachteten Zeiträumen nicht auszuschließen. Deshalb werden auch solche Einwirkungen in diesem Bericht betrachtet.

Bei allen drei Szenarien darf es nach den atomrechtlichen Vorschriften zu radiologischen Auswirkungen in der Umgebung kommen. Hierfür gibt es Eingreifrichtwerte, die zur Orientierung für die Anordnung von Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung (u.a. Evakuierung, Umsiedlung) dienen sollen. Deshalb ist deren Betrachtung für einen Risikovergleich der ENTRIA-Referenzmodelle besonders interessant. Im Rahmen dieses Berichtes können keine quantitativen Freisetzungsquellterme ermittelt werden, da es sich um generische Referenzmodelle handelt. Inwieweit mit den für den Flugzeugabsturz und für die sonstigen Einwirkungen Dritter geforderten Vorsorgemaßnahmen die Ziele erreicht werden können, kann hier deshalb nicht beurteilt werden.

Alle drei Szenarien werden jeweils für die beiden in Kapitel 1.3 genannten Phasen betrachtet. Während der Phase 1 wirken die mechanischen und thermischen Belastungen auf die für die übertägige Lagerung der hoch radioaktiven Abfälle vorhandenen Barrieren. Während der Phase 2 wirken die mechanischen und thermischen Belastungen auf das Oberflächenlager bzw. auf die Erdoberfläche und auf den Schachtansatzpunkt über den Tiefenlagern.

3 Angenommene Randbedingungen für die Referenzmodelle

Bei allen ENTRIA-Referenzmodellen sind Behälter für die Lagerung erforderlich. Für die Phase der übertägigen Lagerung und Anlieferung an den Standort zur Umsetzung der Entsorgungsoption sind an diese Behälter für alle drei Referenzmodelle die gleichen sicherheitstechnischen Anforderungen zu stellen. Im Rahmen von ENTRIA wurde ein eigenes Behälterkonzept mit Namen „ENCON“ entworfen (Hassel & Köhler 2016). Die Entwicklung im Rahmen von ENTRIA enthält jedoch keine Führung von zulassungskonformen Sicherheitsnachweisen. Deshalb werden hier bei der Bewertung des Behälters als Barriere die gegenwärtig in der Bundesrepublik Deutschland für die Zwischenlagerung eingesetzten Transport- und Lagerbehältertypen berücksichtigt.

Tiefenlager ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (TE)

Bei diesem ENTRIA-Referenzmodell stehen die Transport- und Lagerbehälter mit den hoch radioaktiven Abfällen zum Zeitpunkt der Entscheidung über die Entsorgungsoption und bis zum Jahr 25 nach der Entscheidung in den gegenwärtig bereits in Betrieb befindlichen Zwischenlagern. Nach Inbetriebnahme von jeweils einem regionalen neuen Zwischenlager in den fünf deutschen Bundesländern, in denen Leistungsreaktoren betrieben worden sind, werden die hoch radioaktiven Abfälle dort hin transportiert und eingelagert (Eckhardt 2017). Die Betriebszeit der regionalen Zwischenlager hängt vom Zeitpunkt der Inbetriebnahme des Tiefenlagers ab. Hier wird vom Beginn der untertägigen Einlagerung im Zeitraum 55 bis 90 Jahre nach der Entscheidung über die Entsorgungsoption ausgegangen (Eckhardt 2017). Das ist kompatibel mit dem gegenwärtig in Deutschland angenommenen Spektrum für den Zeithorizont bis zur Inbetriebnahme des Tiefenlagers (Endlagerkommission 2016). Die Betriebszeit der regionalen Zwischenlager würde damit 30 bis 65 Jahre betragen. Nach Inbetriebnahme der Einrichtungen des Tiefenlagers werden die Behälter sukzessive zum übertägigen Eingangslager transportiert und dort puffergelagert². Die Lagerung der Transport- und Lagerbehälter erfolgt in allen vorgenannten Lagern aufrecht stehend.

Bevor die hoch radioaktiven Abfälle in das Tiefenlager eingelagert werden, erfolgen je nach Einlagerungskonzept mehr oder weniger Umgangsschritte zur Konditionierung in einer Heißen Zelle am Standort, die auch die Verpackung in einen neuen Behälter beinhalten können. Nach der Konditionierung sollen die beladenen Behälter direkt unter Tage gefördert und eingelagert werden. Die Dauer der vorherigen Pufferlagerung der angelieferten Behälter hängt von der Konzeption der Konditionierungsanlage und der Logistik für die weiteren Umgangsschritte mit den hoch radioaktiven Abfällen für die Tiefenlagerung ab. Es wird hier davon ausgegangen, dass die Dauer der Pufferlagerung eines Behälters zwischen einigen Wochen und wenigen Jahren betragen kann. Damit befinden sich über den gesamten Einlagerungszeitraum für das Tiefenlager von 30 bis 40 Jahren (Endlagerkommission 2016 bzw. GRS 2011a) Behälter mit hoch radioaktiven Abfällen im übertägigen Eingangslager. Deren Zahl dürfte schwanken, aber in der Regel weniger als 100 Behälter betragen.

Wenn alle Behälter in das Tiefenlager unter Tage eingelagert worden sind, wird das Tiefenlager zügig verschlossen. Das bedeutet, es sind dann alle Einlagerungsstrecken, Richtstrecken, der Infrastruktur dienende Hohlräume und die Schächte verfüllt und mit Abschlussbauwerken versehen.

Das Tiefenlager befindet sich in einer Tiefe (Teufe) von 600 m – 800 m (ENTRIA 2015b).

² Die übertägige Lagerung der Behälter wird für die Tiefenlagerung in Abgrenzung zur Zwischenlagerung hier Pufferlagerung genannt.

Die für diesen Risikovergleich berücksichtigten Randbedingungen orientieren sich an der Diskussion zum Referenzmodell für die Endlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit im ENTRIA-Projekt.

Tiefenlagerung mit Monitoring und mit Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (TM)

Die Abläufe für die hoch radioaktiven Abfälle sind bis zu ihrer untertägigen Einlagerung für dieses ENTRIA-Referenzmodell die gleichen, wie für die Tiefenlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit.

Wenn alle Behälter in das Tiefenlager unter Tage (TM) eingelagert worden sind, werden die Einlagerungsstrecken versetzt bzw. verfüllt und mit Abschlussbauwerken versehenen (Mintzlaff 2016). Die Richtstrecken, die Infrastrukturbereiche, die zusätzlich (im Vergleich zum Tiefenlager ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit, TE) aufgefahrene Monitoringsohle mit den Bohrungen in den Einlagerungsbereich und die Schächte bleiben dagegen offen.

Bei einer Entsorgungsoption mit Vorkehrungen zur Rückholbarkeit ist es erforderlich, ein übertägiges Lager für die rückgeholten hoch radioaktiven Abfälle vorzuhalten. Die übertägige Lagerung nach einer eventuellen Rückholung wird hier wegen der noch zu klärenden atomrechtlichen Erfordernisse und weil die Rückholung aus heutiger Sicht nicht Ziel des Vorgehens ist, sondern die Rückholbarkeit eine Vorsorgemaßnahme im Falle von Fehlentwicklungen des Tiefenlagersystems ist, nicht berücksichtigt.

Das Tiefenlager befindet sich in einer Tiefe (Teufe) von 600 m – 800 m (ENTRIA 2015b).

Auch die für diesen Risikovergleich berücksichtigten Randbedingungen orientieren sich an der Diskussion zum Referenzmodell für die Endlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit im ENTRIA-Projekt.

Oberflächenlagerung

Die Transport- und Lagerbehälter mit den hoch radioaktiven Abfällen stehen zum Zeitpunkt der Entscheidung über die Entsorgungsoption in Zwischenlagern. Von dort werden sie nach der Inbetriebnahme des Oberflächenlagers ab dem Jahr 30 nach der Entscheidung über die Entsorgungsoption (Eckhardt 2017) bis zum Jahr 40³ dort hin transportiert. Vor ihrer Einlagerung werden die Brennelemente in einer Heißen Zelle entladen, gekapselt und wieder in einen Transport- und Lagerbehälter

³ Die Einlagerung eines Transport- und Lagerbehälters in ein Zwischenlager dauert durchschnittlich zwei Tage (Oelschläger 2017). Im Fall des Oberflächenlagers kommt hinzu, dass vor der Einlagerung die Brennelemente in einer Heißen Zelle gekapselt werden sollen. Dies betrifft ca. 1.300 Behälter. Es wird hier davon ausgegangen, dass wegen der Modulbauweise des Oberflächenlagers die restlichen 600 Behälter parallel eingelagert werden. Insgesamt wird hier ein Transport- und Einlagerungszeitraum von ca. zehn Jahren abgeschätzt.

geladen. Anschließend werden die Behälter mit gekapselten Brennelementen oder mit in Kokillen befindlichen Abfällen aus der Wiederaufarbeitung im Oberflächenlager aufrecht stehend gelagert. Nach 100 Jahren werden die Behälter und nach deren Öffnung auch die hoch radioaktiven Abfälle überprüft. Bei nicht mehr spezifikationsgerechtem Zustand des Behälters werden die hoch radioaktiven Abfälle in neue oder instandgesetzte, dem dann gültigen Stand von Wissenschaft und Technik erfüllende Transport- und Lagerbehälter geladen (ENTRIA 2016b). Die Gesamtlagerdauer im Oberflächenlager wird hier mit bis zu 200 Jahre angenommen. Der weitere Umgang mit den hoch radioaktiven Abfällen ist nicht festgelegt.

Es wird hier davon ausgegangen, dass die Gesellschaft während der Dauer der Oberflächenlagerung soweit stabil ist, dass das Sicherheitskonzept in Bezug auf Wissen und finanzielle Ressourcen aufrecht erhalten werden kann.

Die vorstehend beschriebenen Randbedingungen wurden im Rahmen von ENTRIA diskutiert. Sie werden hier als Annahmen für den Risikovergleich herangezogen.

Das Referenzmodell für die Oberflächenlagerung enthält auch Überwachungs-, Instandhaltungs- und Reparaturmaßnahmen. Für die in diesem Bericht betrachteten schwerwiegenden Einwirkungen von außen sind diese Maßnahmen jedoch von nachgeordneter Bedeutung und werden nicht berücksichtigt.

4 Sicherheitskonzepte

In diesem Kapitel wird auf die Sicherheitskonzepte der drei ENTRIA-Referenzmodelle eingegangen, soweit es für übertägig verursachte Einwirkungen von außen relevant ist.

Bei allen drei ENTRIA-Referenzkonzepten ist ein übertägiger Umgang mit den hoch radioaktiven Abfällen erforderlich. Dies kann nur in einer Heißen Zelle erfolgen. Der Aufwand und die Verweildauer in der Heißen Zelle werden für alle Referenzmodelle als etwa gleich eingeschätzt. In Bezug auf schwerwiegende Einwirkungen von außen ist damit kein sicherheitstechnischer Unterschied gegeben. Deshalb werden die Konditionierungsmaßnahmen in den Heißen Zellen für den Vergleich der ENTRIA-Referenzmodelle in diesem Bericht nicht weiter berücksichtigt.

4.1 Sicherheitskonzept für die Lagerung über Tage

Bei allen drei ENTRIA-Referenzmodellen findet eine Lagerung von hoch radioaktiven Abfällen in Transport- und Lagerbehältern in übertägigen Lagern statt. Es darf sich hier nicht um reine Lagerbe-

hälter handeln, da nach bundesdeutschen Vorschriften jederzeit eine Abtransportierbarkeit der Abfälle vom Standort gegeben sein muss (ESK 2013).

Die Sicherheit vor Freisetzungen von radioaktiven Stoffen soll mit einem gestaffelten System von Barrieren gewährleistet werden.

Die **ersten Barrieren** in Zwischen-, Eingangs- und Oberflächenlager sind bei den bestrahlten Brennelementen die Keramikmatrix, in der sich ein großer Teil der Aktiniden und Spaltprodukte befindet, und die Brennstabhüllrohre, die die Keramikmatrix umhüllen. Bei den Abfällen aus der Wiederaufarbeitung sind dies die Glasmatrix, in der die Spaltprodukte und Aktiniden eingebunden sind, und die Kokillen, in denen sich die Glaskörper befinden. Diese Barrieren haben jedoch in Bezug auf radiologische Auswirkungen in erheblichem Umfang nach den in Kapitel 2 dieses Berichtes dargestellten schwerwiegenden Einwirkungen von außen nur eine geringe Bedeutung. Sie stellen keine Barrieren dar, die den schwerwiegenden Einwirkungen widerstehen können, allenfalls können sie in bestimmtem Umfang die Freisetzungen radioaktiver Stoffe erschweren oder teilweise verhindern. Diese Barrieren werden im Weiteren nicht berücksichtigt, da das Ziel keine quantitative Ermittlung von Freisetzungsquellterm oder durch ihn verursachte Dosiswerte ist. Vielmehr soll qualitativ bewertet werden, ob nicht vernachlässigbare oder erhebliche Auswirkungen möglich sind.

Zum Zeitpunkt der Entscheidung über die in der Bundesrepublik Deutschland zu verfolgende Entsorgungsoption befinden sich die hoch radioaktiven Abfälle in den **zentralen und dezentralen Zwischenlagern**. Diese Zwischenlager erfüllen in Bezug auf Einwirkungen von außen unterschiedliche sicherheitstechnische Anforderungen. Während an die Barrieren- und Rückhaltewirkung der eingelagerten Transport- und Lagerbehälter die gleichen Anforderungen gestellt werden, reichen die Anforderungen an die Zwischenlagergebäude von Wetterschutz bis zur Auslegung gegen den Absturz bestimmter Flugzeugtypen. Gegen die in Kapitel 2 dieses Berichtes beschriebenen schwerwiegenden Einwirkungen von außen sind diese Zwischenlagergebäude jedoch alle nicht ausgelegt. Fünf der vierzehn Zwischenlagergebäude haben gegen den Absturz eines Airbus A 380 zumindest eine begrenzte Barrierewirkung. Der Vergleich der ENTRIA-Referenzmodelle wird in diesem Bericht bezogen auf die Gesamtlagersituation in der Bundesrepublik Deutschland durchgeführt. Das heißt, es befinden sich für jedes Referenzmodell hoch radioaktive Abfälle in jedem der gegenwärtigen Zwischenlagertypen. Die deutlich größere Menge von Abfällen wird in Zwischenlagern gelagert, deren Gebäude lediglich als Wetterschutz gedacht sind. Deshalb muss die unterschiedliche Auslegung der gegenwärtigen Lagergebäude für diesen Risikovergleich nicht berücksichtigt werden, sondern kann vereinfachend davon ausgegangen werden, dass während der Lagerung in den gegenwärtigen Zwischenlagern als

wesentliche Barriere gegen die schwerwiegenden Einwirkungen von außen nur der Behälter zur Verfügung steht.

Bei einer Entscheidung für eine der Entsorgungsoptionen zur Tiefenlagerung (TE oder TM) wird davon ausgegangen, dass bundesweit für die hoch radioaktiven Abfälle fünf neue **regionale Zwischenlager** errichtet werden.⁴ In diesen fünf regionalen Zwischenlagern sollen die hoch radioaktiven Abfälle verbleiben, bis sie an den Tiefenlagerstandort geliefert werden können. Der Zeitraum hierfür wird einige Jahrzehnte betragen. Deshalb wird hier unterstellt, dass die Zwischenlagergebäude, entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik und dem Vorsorgegebot des Atomgesetzes, als zweite vollständige Barriere gegen Einwirkungen von außen ausgelegt werden.

Wegen der im Vergleich zu den Referenzmodellen mit Tiefenlagerung (TE und TM) schnelleren Verfügbarkeit eines Oberflächenlagers wird für die Entsorgungsoption OL nicht von der Neuerrichtung regionaler Zwischenlager ausgegangen.

Für das **Eingangslager** bei den Referenzmodellen zur Tiefenlagerung und für das **Oberflächenlager** ist aufgrund des großen Radioaktivitätsinventars und der Betriebsdauer der übertägigen Lager von einigen Jahrzehnten (Tiefenlager) bis zu 200 Jahren (Oberflächenlager) ebenfalls die bestmögliche Vorsorge gegen Einwirkungen von außen nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderlich. Bezüglich der Einwirkungen von außen wird von einer gleichen sicherheitstechnischen Auslegung des Oberflächenlagers und der übertägigen Eingangslager für Tiefenlager ausgegangen.

Im ENTRIA-Referenzmodell für die Oberflächenlagerung sind zwei redundante Barrieren gegen die zu berücksichtigenden mechanische Einwirkungen von außen vorgesehen (Reichardt 2016):

- der Behälter, in dem sich die hoch radioaktiven Abfälle befinden und
- das Gebäude, in dem die Behälter aufrecht stehen.

Der Behälter soll eine vollständige Barriere gegen mechanische und eine weitgehende gegen thermische Einwirkungen von außen sein, um radioaktive Freisetzungen zu verhindern oder mindestens stark zu verringern. Das Lagergebäude als redundante Barriere soll so ausgelegt werden, dass es schwerwiegenden mechanischen Einwirkungen von außen widerstehen kann, also standsicher bleibt und nicht perforiert wird. Darüber hinaus soll das Lagergebäude durch seine Konstruktion thermische

⁴ Mit dieser Annahme soll weder der in der Bundesrepublik Deutschland notwendigen Diskussion über die weitere Zwischenlagerung vorgegriffen, noch ein sicherheitstechnisch geprüfter Vorschlag hierzu unterbreitet werden. Für den hier angestrebten Vergleich muss aber eine praktikable und plausible Lösung für die deutlich über den Genehmigungszeitraum der derzeitigen Zwischenlagerung hinaus notwendige Zwischenlagerung berücksichtigt werden.

Belastungen der Behälter durch Einwirkungen von außen oder nach Eindringen brennbarer Flüssigkeiten möglichst gering halten.

Vor der Einlagerung in das Oberflächenlager sollen die Brennelemente in einer Heißen Zelle in einer Stahlbüchse einzeln gekapselt werden. Dies ist eine Vorsorgemaßnahme wegen der langen Lagerzeit zum Erhalt der Brennelement- und Behälterbeladestruktur sowie der Handhabbarkeit für den Umgang nach 200 Jahren Lagerzeit. Für die regionalen Zwischenlager ist diese Maßnahme nicht vorgesehen.

Durch den Zerfall von Atomkernen im radioaktiven Inventar der Behälter wird Wärme freigesetzt, die zur Vermeidung von Schäden an Inventar und Behälter in die Umwelt abgeführt werden muss. Hierzu wird ein – im kerntechnischen Sinn – passives Sicherheitssystem eingesetzt. Das Lagergebäude besitzt an der Seite Lufteinlass- und an der Decke Luftauslassschlitze. Durch die über den Behälterkörper aus seinem Inneren abgegebene Wärme entsteht ein konvektiver Luftstrom durch das Lagergebäude, mit dem die Wärme in die Umgebung abgegeben wird.

Die für die Einlagerung von Abfällen in Tiefenlagern erforderlichen übertägigen Eingangslager bestehen aus einem Lagergebäude. Die Oberflächenlagerung soll dagegen in mehreren modular errichteten Gebäuden mit jeweiliger Barrierenwirkung erfolgen. Dadurch können die Auswirkungen von nachschwerwiegenden Einwirkungen von außen auftretenden Funktionsstörungen auf einen Teil der lagernden Behälter begrenzt werden (gilt nicht für die im Vergleich angenommenen kriegerischen Einwirkungen). Für das betroffene Lagermodul ist dann auch ein separater Verschluss sowie die Einrichtung eines aktiven Wärmeabfuhrsystems und von Rückhaltmaßnahmen für Radionuklide möglich (ENTRIA 2016b).

4.2 Sicherheitskonzepte für die Tiefenlagerung

Die Tiefenlagerung (TE und TM) erfolgt in 600 bis 800 m Tiefe, um die sich in Behältern befindlichen hoch radioaktiven Abfälle weit von der Biosphäre entfernt, möglichst sicher einzuschließen. Über dem Tiefenlager befindet sich ein mehrschichtiger Gesteinskörper. In Bezug auf übertägig verursachte Einwirkungen von außen bestehen keine in Regeln festgelegten Anforderungen an diesen Gesteinskörper. Die große Mächtigkeit des Gesteinskörpers bildet aber natürlicherweise eine sehr wirksame Barriere gegen übertägige Einwirkungen von außen.

Damit die hoch radioaktiven Abfälle in ein Tiefenlager eingelagert werden können, müssen Schächte abgeteuft und untertägig Hohlräume aufgefahren werden. Diese Hohlräume stellen vor allem im

Bereich des Lagers in Bezug auf mögliche Lösungszutritte eine Schwächung der geologischen Barriere, insbesondere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, dar.

Das Sicherheitskonzept für die Tiefenlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (TE) sieht vor, diese Schwächung nach Abschluss der Einlagerung aller hoch radioaktiven Abfälle zügig aufzuheben. Dazu soll das gesamte Tiefenlagerbergwerk verfüllt und verschlossen werden. Der Tiefenlagerverschluss besteht aus mehreren Komponenten: Dem Schachtverschluss, den Verschlussbauwerken von Zugangsstrecken, Querschlägen und Einlagerungstrecken sowie dem Versatz der vorhandenen Hohlräume und den Behältern, in denen sich die Abfälle befinden. Versatz, Verfüllungen und Bauwerke sollen den Zutritt von Lösungen an die Behälter verhindern bzw. für den gegebenen Fall die Ausbreitung von Radionukliden behindern.

Bei der Tiefenlagerung mit Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (TM) sind Verfüllung und Verschluss nach Abschluss der Einlagerung aller Abfälle nur für die Einlagerungstrecken selbst vorgesehen (Mintzlaff 2016). Für einen bestimmten Zeitraum (nach bisheriger Erkenntnis einige Jahrzehnte bis wenige hunderter Jahre)⁵ werden die übrigen, für das Bergwerk aufgefahrenen Hohlräume offen gehalten werden. Während dieses Zeitraumes soll die Entwicklung des Tiefenlagersystems mit Hilfe verschiedener Messmethoden beobachtet werden. Dazu wird oberhalb der Einlagerungssohle eine Monitoringsohle aufgefahren und von dort in Richtung Einlagerungssohle Bohrungen abgeteuft. In diese Bohrungen werden Messsensoren eingebracht, mit deren Hilfe die Entwicklung des Tiefenlagersystems beobachtet werden soll. Werden im Monitoringzeitraum keine problematischen Entwicklungen festgestellt oder während dieses Zeitraums aus gesellschaftlichen Erwägungen ein Abbruch des Monitorings beschlossen, so wird auch dieses Tiefenlagerbergwerk mit den gleichen Komponenten wie das Tiefenlagerbergwerk ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit verschlossen.

5 Bewertete Sicherheitsfunktion

Eine Sicherheitsfunktion ist eine Eigenschaft oder ein im Referenzmodell-System ablaufender Prozess, der bzw. die in einem sicherheitsbezogenem System oder Teilsystem oder bei einer Einzelkomponente die Erfüllung der sicherheitsrelevanten Anforderungen gewährleistet. Durch das Zusammenwirken solcher Funktionen wird die Erfüllung aller sicherheitstechnischen Anforderungen sowohl in der Betriebsphase als auch, bei der Tiefenlagerung, in der Nachbetriebsphase gewährleistet. Die

⁵ Der Zeitraum ist im Wesentlichen abhängig von den geomechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins und von gesellschaftlichen Erwägungen, wie zum Beispiel politische Veränderungen, wirtschaftliche Entwicklung und technische Entwicklungen.

mit Sicherheitsfunktionen zusammenhängenden methodischen Aspekte werden in Teil IV der vergleichenden Risikobewertung (Kreusch & Neumann 2017) ausführlich beschrieben.

Die Aufgabe der in diesem Bericht betrachteten Barrieren als Sicherheitsfunktion ist es, Einwirkungen von außen Widerstand entgegenzusetzen, um Freisetzungen von Radionukliden zu verhindern oder zumindest zu verringern. Die im Risikovergleich bewertete Sicherheitsfunktion ist die

Rückhaltefähigkeit für Radionuklide.

6 Ermittlung der Möglichkeit von Robustheitsdefiziten bei übertägiger Lagerung

6.1 Vorgehen

Die Vorgehensweise für den Vergleich der ENTRIA-Referenzmodelle bezüglich schwerwiegender Einwirkungen von außen auf die übertägige Lagerung der hochradioaktiven Abfälle ist an der „Abwägungsmethodik für den Vergleich von Tiefenlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen“ (GRS 2010) orientiert, die auch für Teil IV der vergleichenden Risikobewertung eingesetzt wird. Wegen der deutlich geringeren Systemkomplexität kann aber die Vorgehensweise für diesen Teil III stark vereinfacht werden.

Es wird zunächst jeweils die Relevanz der in Kapitel 5 festgelegten Sicherheitsfunktion für die Barrieren der ENTRIA-Referenzmodelle bestimmt und einer ordinalen Skala mit fünf Klassen zugeordnet. Auf Grundlage der Eigenschaften der Barrieren und ihrem Verhalten bezüglich der Rückhaltefunktion nach den aus den Szenarien in Kapitel 2 folgenden Einwirkungen von außen wird die Robustheit der Sicherheitsfunktion bewertet und ebenfalls nach einer fünfklassigen ordinalen Skala eingestuft. Dabei wird die Robustheit hier als die Zuverlässigkeit und Qualität und somit die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktion gegenüber den schwerwiegenden Einwirkungen von außen sowie ihre Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit im Sinne des Vertrauens in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen bezeichnet. Der Vergleich der Einstufungen für die Relevanz der Sicherheitsfunktion und deren Robustheit zeigt für jedes Szenario, ob es Robustheitsdefizite gibt und ggf. wie groß sie sind. Die Ergebnisse werden in einer Tabelle zusammengefasst. Die Methode wird in Teil IV der vergleichenden Risikobewertung (Kreusch & Neumann 2017) ausführlich beschrieben.

Werden nach schwerwiegenden Einwirkungen von außen keine Robustheitsdefizite festgestellt, so gilt die Sicherheit während der übertägigen Lagerung der hoch radioaktiven Abfälle als gegeben. Das

bedeutet, es besteht für alle drei Referenzmodelle kein Risiko und es müssen für diesen Teil III der vergleichenden Risikobewertung hierzu keine weiteren Betrachtungen durchgeführt werden. Wird ein Robustheitsdefizit ermittelt, so erfolgt ein Vergleich der drei Referenzmodelle für das entsprechende Szenario.

Die Betrachtungen zu Robustheitsdefiziten erfolgt für die beiden Hauptbarrieren (Behälter und Gebäude), die die Ausbreitung von Radionukliden aus den hoch radioaktiven Abfällen verhindern bzw. begrenzen sollen, getrennt. Grund dafür ist, dass entsprechend des Sicherheitskonzeptes die jeweilige Sicherheitsfunktion von Behälter und Gebäude bezüglich mechanischer Einwirkung von außen redundant gegeben sein soll. Aus Vorsorgegründen soll also jede der beiden Barrieren den Lasten auch einzeln standhalten können.

6.2 Bewertung der Möglichkeit von Robustheitsdefiziten bei Behältern

Relevanz der Sicherheitsfunktion

Die Verhinderung bzw. Begrenzung der Radionuklid Ausbreitung (Rückhaltung) durch den Behälter bei Einwirkungen von außen ist unverzichtbar, da die hoch radioaktiven Abfälle bei Nichterfüllung der Sicherheitsfunktion unmittelbar mit der Biosphäre in Kontakt kommen und Radionuklide freigesetzt werden.

Relevanz sehr hoch → **Klasse 5**

Wesentliche Eigenschaften der Behälter

Für die Rückhaltefunktion sind folgende Eigenschaften des Behälters wichtig:

- Mechanische Festigkeit der Behälter.

Im Ausgangszustand ist die mechanische Festigkeit, unter Berücksichtigung des aktuellen Kenntnis- und Erkenntnisstandes sowie der Richtigkeit der sicherheitstechnischen Bewertungen in bisherigen Genehmigungsverfahren, aufgrund der Konstruktion und der Materialeigenschaften gut bekannt. Voraussetzung ist allerdings eine wirkungsvolle Qualitätssicherung bei der Herstellung von Behältern.

- Thermische Beständigkeit des Behälters.

Im Ausgangszustand ist die thermische Beständigkeit, unter Berücksichtigung des aktuellen Kenntnis- und Erkenntnisstandes sowie der Richtigkeit der sicherheitstechnischen Bewertung in bisherigen Genehmigungsverfahren, aufgrund der Konstruktion und der Materialeigenschaften

gut bekannt. Voraussetzung ist allerdings eine wirkungsvolle Qualitätssicherung bei der Herstellung von Behältern.

- Zustand der Behälterdichtungen nach Behälterverschluss.

Im Ausgangszustand ist der Zustand der Dichtungen, unter Berücksichtigung des aktuellen Kenntnis- und Erkenntnisstandes sowie der Richtigkeit der sicherheitstechnischen Bewertung in bisherigen Genehmigungsverfahren, aufgrund der Konstruktion und der Materialeigenschaften gut bekannt. Voraussetzung ist eine wirkungsvolle Qualitätssicherung für die Fertigung der Dichtungen und den Ablauf der Einbau- und Verschlussvorgänge am Behälter. Durch den Leckagetest nach dem Verschluss der Deckel mit einer maximal zulässigen Rate von $10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$ ($10^{-7} \text{ mbar} \cdot \text{l} / \text{s}$) wird die Bewertung der Dichtheit nach Abschluss der Beladung abgesichert.

Die mechanischen und thermischen Eigenschaften des Behälters und der Zustand der Dichtungen nach Beladung und Verschluss des Behälters sind also gut bekannt.

Die genannten Eigenschaften sind wiederum jeweils von mehreren Konstruktions- und werkstofftechnischen Parametern abhängig. Diese getrennt zu betrachten, würden für die hier vorgenommene Bewertung von Robustheitsdefiziten aber keine wesentlichen zusätzlichen Erkenntnisse erbringen und würde den Vorgang unnötig verkomplizieren.

Robustheit der Sicherheitsfunktion unter Berücksichtigung der Szenarien für schwerwiegende Einwirkungen von außen

Die Szenarien für die schwerwiegenden Einwirkungen, für die das Risiko für die drei ENTRIA-Referenzmodelle bewertet werden sollen, sind in Kapitel 2 beschrieben. Die schwerwiegenden Einwirkungen von außen sind:

- | | |
|-------|---|
| FLAB | Mechanische und thermische Belastungen durch den gezielten oder zufälligen Absturz eines Flugzeuges vom Typ A 380. |
| SEWD | Mechanische und thermische Belastungen durch sonstige Einwirkungen Dritter, zum Beispiel mit Hohlladungsgeschossen. |
| KRIEG | Mechanische und thermische Belastungen durch kriegerische Einwirkungen. |

Im Folgenden wird der Erhalt der Rückhaltewirkung des Behälters für Radionuklide aus dem Radioaktivitätsinventar, also die Robustheit, bewertet. Dabei wird berücksichtigt, wie belastbar die dafür notwendige Prognose über das Verhalten der Behälter nach den Einwirkungen von außen ist.

Begründung für die Einstufung:

Es wird hier nicht ermittelt, ab welchen Lasteinwirkungen auf die Behälter größere Radioaktivitätsinventare freigesetzt werden können. Vielmehr wird das Verhalten der Behälter qualitativ beschrieben.

Es wird davon ausgegangen, dass ein oder mehrere Behälter von mechanisch steifen Teilen des Flugzeugs (z.B. Triebwerke, Bauteile des Fahrwerkes) getroffen werden. In den bisherigen Genehmigungsverfahren zur Zwischenlagerung werden in den Sicherheitsnachweisen außer den Behältereigenschaften auch strukturelle Umgebungsbedingungen berücksichtigt. Das heißt, die Nachweise gelten nicht für den isoliert betrachteten Behälter. Für die mechanische Belastung bei einem Flugzeugabsturz wird nicht das ganze Flugzeug, sondern der Aufprall eines Triebwerkes in unterschiedlichen Konfigurationen betrachtet. Dieser Aufprall wurde durch zwei Beschussversuche Ende der 1970er Jahre simuliert (BAM 1982) und Übertragbarkeitsüberlegungen von dem dabei eingesetzten Zielobjekt auf heutige Behälter angestellt. Im Ergebnis wurde der Erhalt einer umschließenden Wirkung für den Behälterkörper und ein Nachlassen der – im Ausgangszustand sehr hohen – Dichtwirkung um den Faktor 1.000.000 prognostiziert (z.B. BfS 2003a). Dies hätte Freisetzungen zur Folge, die relativ begrenzt wären. Das Ergebnis ist aber wegen der Annahmen zur Übertragbarkeit der Testergebnisse und der Modellierung mit Ungewissheiten behaftet (UBA 2002, GÖK 2004). Durch die Ungewissheiten für die Übertragbarkeit von Testergebnissen sowie für die Modellierung von Randbedingungen und mechanischem Verhalten bei der Berechnung ist die Prognostizierbarkeit des Behälter- und Dichtungsverhaltens stark eingeschränkt.

Dazu kommt, dass der Zustand der Dichtungen zum Zeitpunkt der Einwirkungen zwar theoretisch prognostiziert, aber nicht tatsächlich nachweisbar bekannt ist. Nach Einbau der Dichtungen und Behälterverschluss sind Veränderungen des Dichtungszustandes durch den erforderlichen Transport und die mehrfachen Handhabungen möglich, da dabei mechanische Wechselbelastungen auftreten und auch Positionsänderungen der Dichtungen nicht auszuschließen sind. Selbst wenn eine Kontrolle der Leckagerate bei Anlieferung des Behälters zunächst keine Veränderungen zeigt, kann eine Vorschädigung entstanden sein, die einen weitergehenden Verlust der Dichtheit bei mechanischen Einwirkungen von außen begünstigt.

Eine Freisetzung von Radionukliden aus mehr als einem Behälter ist nicht auszuschließen. Dabei können auf der Lagerfläche und in deren näheren Umgebung erhebliche radiologische Auswirkungen bereits auftreten, wenn nur die Dichtungen von Behältern versagen, ohne dass es zu durchgehenden Rissen oder weitergehenden Schäden an Behälterkörpern kommt.

Insgesamt ist eine Prognose für die Robustheit der Rückhaltefunktion nach mechanischen Einwirkungen von außen durch einen Flugzeugabsturz zwar möglich, jedoch aus den vorstehenden Gründen nur begrenzt aussagekräftig. *Der Rückhaltefunktion für den Behälter bei mechanischen Einwirkungen nach einem Flugzeugabsturz wird deshalb die Robustheitsklasse 3 (mittel) zugeordnet.*

Neben mechanischen Belastungen treten nach einem Flugzeugabsturz auch thermische Belastungen auf. In den bisherigen Genehmigungsverfahren zur Zwischenlagerung wurden im Falle des Absturzes eines Militärflugzeuges für ein Feuer Temperaturen von 600°C und eine Branddauer von 60 Minuten unterstellt (BfS 2003a). Für den Absturz eines Verkehrsflugzeuges (Boeing 747) wurde ein Brand von 10 Minuten mit bis zu 1.100°C betrachtet (Thomauske 2003). Dabei wird davon ausgegangen, dass aufgrund von baulichen Maßnahmen nur wenig Kerosin aus den Flugzeugtanks im Lagerbereich der Behälter verbrennen kann. Auf Grundlage von Modellierungen und Berechnungen wurde eine Erhöhung der Leckagerate um vier Größenordnungen ermittelt. Beim Absturz eines A 380 können jedoch deutlich größere Kerosinmengen in den Lagerbereich der Behälter gelangen als für die Genehmigung angenommen. Ist das der Fall, können die Temperatur höher und vor allem die Branddauer erheblich länger sein. Deshalb ist das Versagen zumindest von Behälterdichtungen möglich (GÖK 2004). Jedenfalls ist bisher kein Nachweis bekannt, mit dem dies auszuschließen ist. Dies gilt insbesondere, wenn die Behälter als alleinige Barriere betrachtet werden.

Die Prognose der Auswirkung von thermischen Einwirkungen nach einem Flugzeugabsturz ist mit großen Ungewissheiten belastet. Viele der notwendigen Parameter können nicht wissenschaftlich abgesichert angegeben werden, da weltweit keine ausreichenden Erfahrungswerte vorliegen bzw. die Randbedingungen für die auftretenden Werte von Parametern bei praktischen Untersuchungen singulär sind. Außerdem können Vorschädigungen der Dichtungen negativen Einfluss haben. Es muss von der Freisetzung von Radionukliden aus mehreren Behältern ausgegangen werden. *Der Rückhaltefunktion für den Behälter bei thermischen Einwirkungen nach einem Flugzeugabsturz wird deshalb die Robustheitsklasse 2 (gering) zugeordnet.*

Sowohl für thermische Einwirkungen als auch für eine Kombination von mechanischen und thermischen Einwirkungen gilt, dass Freisetzungen radioaktiver Stoffe bereits große radiologische Auswirkungen in der Umgebung haben können, wenn die Deckeldichtungen versagen ohne das durchgehende Risse oder noch weitergehende Schädigungen des Behälterkörpers entstehen (UIM 2004).

Die Robustheit der Rückhaltefunktion des Behälters wird hier für mechanische und thermische Einwirkungen unterschiedlich bewertet. *Aus methodischen Gründen muss deshalb insgesamt für die Rückhaltung von Radionukliden die niedrigere der beiden ermittelten Robustheitsklassen angesetzt werden, also die Robustheitsklasse 2 (gering).*

SEWD: Einstufung in die Robustheitsklasse 2 (gering)

Begründung für die Einstufung:

Bei einem Hohlladungsbeschuss treten zwar auch mechanische Belastungen auf, für die Überwindung der Behälterbarriere sind jedoch vor allem thermische Einwirkungen relevant. Die in der Bundesrepublik Deutschland für die Zwischenlagerung eingesetzten Transport- und Lagerbehälter sind nicht gegen einen Beschuss mit panzerbrechenden Waffen ausgelegt und können es, unter Berücksichtigung der gegenwärtigen Kenntnisse zur Werkstofftechnik, auch in absehbarer Zukunft nicht sein. Das Eindringen von mit solchen Waffen ausgerüsteten Personen in das Zwischenlager kann nicht ausgeschlossen werden. Dies wird in Genehmigungsverfahren auch seit längerer Zeit unterstellt (Pretzsch & Maier 2003). Im Grundsatz ändern daran auch die in den letzten Jahren ergänzten, so genannten Härtungsmaßnahmen nichts. Die Gefährdung durch einen Anschlag kann dadurch lediglich verringert werden (Becker 2017).

In der Folge muss auch der Beschuss mehrerer Behälter bzw. ein Mehrfachbeschuss unterstellt werden (OVG S-H 2013). Bei einer fachgerechten Anwendung von panzerbrechenden Waffen muss von der Aufhebung der Behälterintegrität und damit der Rückhaltebarriere durch Perforation mit mehreren Zentimeter Durchmesser ausgegangen werden (SCEE 2005). Davon können auch zwei oder noch mehr Behälter betroffen sein. Die Aufhebung der Behälterintegrität ist in der Fachwelt unumstritten, Diskussionen gibt es zu den daraus folgenden Freisetzungsquelltermen für Radionuklide. Prognosen zur Freisetzung sind mit großen Ungewissheiten belastet. In Studien mit eher konservativen Annahmen werden erhebliche Freisetzungen ermittelt (UIM 2004).

Durch einen Beschuss von Behältern mit panzerbrechenden Waffen wird deren Integrität aufgehoben und die Rückhaltefähigkeit erheblich verringert. Eine Prognose für die Robustheit der Rückhaltefunktion im Sinne des Umfangs der Verringerung ist zwar möglich, jedoch mit großen Ungewissheiten behaftet. Es muss die Freisetzung von Radionukliden aus zwei Behältern unterstellt werden. *Der Rückhaltefunktion für Behälter nach Beschuss mit panzerbrechenden Waffen wird deshalb die Robustheitsklasse 2 (gering) zugeordnet.*

KRIEG: Einstufung in die Robustheitsklasse 1 (sehr gering)

Begründung für die Einstufung:

Bei kriegerischen Einwirkungen sind der Einsatz des gesamten zur Verfügung stehenden modernen Waffenarsenals und absehbare Weiterentwicklungen zu berücksichtigen. Mit dem Einsatz von Artilleriewaffen oder Raketenwerfern können die mechanischen und thermischen Einwirkungen gezielt geführt werden und sehr wirksam sein. Dagegen kann ein Transport- und Lagerbehälter nicht ausge-

legt werden. Es muss von einer nachhaltigen Aufhebung der Behälterintegrität und damit Rückhaltetfähigkeit ausgegangen werden. Davon wird eine Vielzahl von Behältern betroffen sein. Prognosefähigkeit und Vorschädigungen sind hier irrelevant. *Nach kriegesischen Einwirkungen ist die Rückhaltetfunktion der Behälterbarriere deshalb nur noch als sehr gering zu bewerten und die Robustheitsklasse 1 zuzuordnen.*

Gesamtergebnis für die Sicherheitsfunktion „Rückhaltetfähigkeit für Radionuklide“

Zur Feststellung, ob ein Robustheitsdefizit vorliegt, werden die ermittelte Robustheit und die Relevanz der Sicherheitsfunktion in Beziehung gesetzt. Eine dabei festgestellte „Differenz“ darf nicht als rechnerische Differenz aufgefasst werden, sondern sie stellt die ordinalen Klassenunterschiede dar. Wenn in der Beziehung zwischen den beiden ordinalen Größen Robustheit und Relevanz der Sicherheitsfunktion ein Unterschied von zwei oder mehr Ordinalklassen ersichtlich ist (Bewertungsziffer -2 und kleiner), dann ist dies ein Indiz für ein Robustheitsdefizit.⁶

Der Bezug zwischen Relevanz und Robustheit der Sicherheitsfunktion „Rückhaltetfähigkeit des Behälters für Radionuklide“ wird in der folgenden Tabelle hergestellt:

Sicherheitsfunktion	Relevanz	Robustheit			Auswertung		
		FLAB	SEWD	KRIEG	FLAB	SEWD	KRIEG
Rückhaltung der Radionuklide durch den Behälter nach schwerwiegenden Einwirkungen von außen	5	2	2	1	-3	-3	-4

Tabelle 6.2-1: Robustheitsdefizite für die Rückhaltung von Radionukliden bei Behältern

Die Auswertung ergibt negative Differenzen zwischen Relevanz und Robustheit von kleiner als -1 bzw. größer als $|1|$. Das bedeutet, ***der Behälter hat bezüglich der Sicherheitsfunktion „Rückhaltung der Radionuklide“ bei allen für schwerwiegende Einwirkungen von außen betrachteten Szenarien erhebliche Robustheitsdefizite.***

Auslegungsanforderung und ihre Erfüllung

Die grundsätzliche Auslegungsanforderung an die Behälter und ihre Erfüllung spielt für die Ableitung des Gesamtergebnisses zu Robustheitsdefiziten keine direkte Rolle. Es wird hier dennoch kurz darauf eingegangen, um die Bewertung aus dieser Sicht zu ergänzen.

⁶ Die genaue Vorgehensweise für die Prüfung auf Robustheitsdefizite wird in Teil IV der vergleichenden Risikobewertung (Kreusch & Neumann 2017) ausführlich beschrieben und auch anhand einer Tabelle dargestellt.

Anforderung: Rückhaltefähigkeit für Radionuklide (Behälterintegrität) bei Einwirkungen von außen über den gesamten Lagerzeitraum.

Diese Anforderung muss für Auslegungsstörfälle weitgehend erfüllt werden. Das ist allerdings auch für diese Störfälle nur durch Gewährleistung bestimmter Randbedingungen möglich. Die Randbedingungen sind zum Beispiel die Beschränkung der Hubhöhe für den Behälter bei dessen Handhabung oder die Gewährleistung plastisch verformbarer Eigenschaften des Bodens (Sohlplatte) sowie die Begrenzung von Brandlasten in deren Nähe. Für in Genehmigungsverfahren als auslegungsüberschreitend bezeichnete Störfälle (z.B. Absturz eines schnell fliegenden Militärflugzeuges) muss die Rückhaltefähigkeit nur eingeschränkt erhalten bleiben. Auslegungsstörfälle und die als auslegungsüberschreitend bezeichneten Störfälle werden in diesem Bericht zu schwerwiegenden Einwirkungen von außen nicht betrachtet. Für Auslegungsstörfälle nach Einwirkungen von innen wird auf den Teil II der „Vergleichenden Risikobewertung“ (Neumann & Kreusch 2017) verwiesen.

Spätestens nach dem Gerichtsurteil zum Standort-Zwischenlager Brunsbüttel gilt die Erfüllung der Anforderung eingeschränkte Rückhaltefähigkeit auch für den Absturz eines großen Verkehrsflugzeuges wie den Airbus A 380 (OVG S-H 2013). Dieses Urteil bezieht sich aber auf die Zwischenlagerung als Ganzes, also unter Berücksichtigung des Lagergebäudes. Im hier vorliegenden Bericht werden der Behälter (in diesem Kapitel 6.2) und das Gebäude (im Kapitel 6.3) wegen der geforderten Redundanz der Barrieren und auch aus methodischen Gründen getrennt betrachtet. Für den Behälter hat sich im Szenario FLAB eine geringe Robustheit der Rückhaltefähigkeit ergeben (Robustheitsklasse 2).

In Bezug auf den Angriff mit einer panzerbrechenden Waffe gilt die eingeschränkte Rückhaltefähigkeit ebenfalls (OVG S-H 2013), wobei sich die Einwirkung auf den Behälter beschränkt. Dem Gebäude wird nur eine gewisse Rückhaltefähigkeit bei der Ausbreitung der Radionuklide unterstellt, da es ja beim Angriff selbst intakt bleibt oder nur teilzerstört würde. Für den Behälter hat sich auch im Szenario SEWD eine geringe Robustheit der Rückhaltefähigkeit ergeben (Robustheitsklasse 2).

Für kriegerische Einwirkungen gibt es keine Anforderung in Regelwerken, die erfüllt werden muss. Eine Auslegung hiergegen ist nur sehr eingeschränkt möglich. Folgerichtig hat sich für den Behälter im Szenario KRIEG eine sehr geringe Robustheit der Rückhaltefähigkeit ergeben (Robustheitsklasse 1).

6.3 Bewertung der Möglichkeit von Robustheitsdefiziten bei Gebäuden

Relevanz der Sicherheitsfunktion

Im Rahmen von ENTRIA wurde festgelegt, dass Behälter und Gebäude für die Oberflächenlagerung (OL) sicherheitstechnisch redundant gegen Einwirkungen von außen sein sollen (ENTRIA 2015c). Dies ist mit dem Vorsorgegrundsatz im Atomgesetz kompatibel. Im hier vorliegenden Bericht wird die sicherheitstechnische Redundanz auch für die neu zu errichtenden regionalen Zwischenlager und die übertägigen Eingangslager bei den Tiefenlagern (TE und TM) unterstellt. Das heißt zwei Barrieren müssen unabhängig voneinander die gleiche Sicherheit gegen Einwirkungen von außen gewährleisten. Die Verhinderung bzw. Begrenzung der Radionuklid Ausbreitung (Rückhaltung) bei schwerwiegenden Einwirkungen von außen durch das Gebäude ist demzufolge wichtig. Die Relevanz ist diesbezüglich allerdings nicht ganz so hoch wie bei den Behältern. Die Gebäudekonstruktion zur Wärmeabfuhr erlaubt auch theoretisch keine vollständige Rückhaltung.

Relevanz hoch → **Klasse 4**

Wesentliche Eigenschaften des Gebäudes

Für die Rückhaltefunktion sind folgende Eigenschaften des Gebäudes wichtig:

- Standsicherheit des Gebäudes. Im Falle äußerer Belastungen darf das Gebäude nicht zusammenfallen.
Für den Ausgangszustand kann die Standsicherheit des Gebäudes gut ermittelt werden, da zum Bau entsprechender Gebäude umfangreiche Kenntnisse und Erfahrungen vorliegen.
- Mechanische Festigkeit der Gebäudestrukturen (Zustand des Betons und seiner Bewehrung).
Gebäudewände und -decken müssen das Durchdringen einzelner Flugzeugteile verhindern.
Im Ausgangszustand ist die Festigkeit bzw. Widerstandsfähigkeit aufgrund der Konstruktion des Gebäudes und der bekannten Eigenschaften des Baumaterials unter Berücksichtigung des aktuellen Kenntnis- und Erkenntnisstandes (Bauforum 2010) sowie der Richtigkeit seiner sicherheitstechnischen Bewertung in Genehmigungsverfahren gut bekannt.
- Thermische Beständigkeit der Gebäudestrukturen.
Im Ausgangszustand ist die thermische Beständigkeit aufgrund der Konstruktion des Gebäudes und der bekannten Eigenschaften des Baumaterials unter Berücksichtigung des aktuellen Kenntnis- und Erkenntnisstandes gut bekannt.
- Verringerung direkter Zutrittsmöglichkeit von Kerosin. In größeren Mengen eindringendes Kerosin gefährdet im Falle des Abbrands die Sicherheitsfunktion des Behälters.

Im Ausgangszustand ist die Zutrittsmöglichkeit von Kerosin durch die geometrische Konstruktion der Zu- und Abluftkanäle gegeben. Außerdem kann Kerosin durch nach der mechanischen Belastung verursachte Gebäudeschäden eindringen. Unter Berücksichtigung des aktuellen Kenntnisstandes sowie der Richtigkeit seiner sicherheitstechnischen Bewertung in Genehmigungsverfahren ist das Eindringen von Kerosin stark verringerbar. Allerdings können keine 100-prozentig verlässlichen Angaben über die eintretende Menge von Kerosin gemacht werden.

Es kann insgesamt festgestellt werden, dass die Standsicherheit sowie die mechanischen und thermischen Eigenschaften des Gebäudes nach seiner Fertigstellung gut bewertbar sind. Die Ermittlung der konstruktionsbedingt möglichen Zutrittsmenge von Kerosin ist jedoch mit Ungewissheiten behaftet.

Die genannten Eigenschaften sind wiederum jeweils von mehreren Konstruktions- und materialtechnischen Parametern abhängig. Diese getrennt zu betrachten, würden für die hier vorgenommene Ermittlung von Robustheitsdefiziten aber keine wesentlichen zusätzlichen Erkenntnisse erbringen und würde den Vorgang unnötig verkomplizieren.

Robustheit der Sicherheitsfunktion unter Berücksichtigung der Szenarien für schwerwiegende Einwirkungen von außen

Die Szenarien für die schwerwiegenden Ereignisse, für die das Risiko für die drei ENTRIA-Referenzmodelle bewertet werden soll, sind in Kapitel 2 beschrieben. Die schwerwiegenden Einwirkungen von außen sind:

FLAB Mechanische und thermische Belastungen durch den gezielten oder zufälligen Absturz eines Flugzeuges vom Typ A 380.

SEWD Mechanische und thermische Belastungen durch sonstige Einwirkungen Dritter.

KRIEG Mechanische und thermische Belastungen durch kriegerische Einwirkungen.

Im Folgenden wird der Erhalt der Rückhaltewirkung für Radionuklide, also die Robustheit, in Bezug auf die Widerstandsfähigkeit des Gebäudes bewertet. Dabei wird berücksichtigt, wie belastbar die dafür notwendige Prognose über das Verhalten des Gebäudes nach den Einwirkungen von außen ist.

FLAB: Einstufung in die Robustheitsklasse 3 (mittel)

Begründung für die Einstufung:

Stahlbetonkonstruktionen (wie Lagergebäude) können auf Grundlage von Erfahrungen und Normen sehr widerstandsfähig gebaut werden. Die möglichen Auswirkungen mechanischer Belastungen von Gebäuden bei Flugzeugabsturz bezüglich ihrer Standsicherheit (sehr große Masse des A 380) und

Perforationssicherheit (vor allem durch Triebwerke oder andere steife Bauteile, z.B. des Fahrwerkes) sowie thermischer Belastungen durch Kerosinbrand und Menge des in den Lagerbereich eindringenden Kerosins können jedoch nur durch auf Modellen beruhende ingenieurtechnische Berechnungen und Übertragbarkeitsüberlegungen von Tests älteren Datums mit Simulation leichter Flugzeuge bewertet werden. Es existieren bereits massiv gebaute Zwischenlagergebäude, für die der Standsicherheitsnachweis für mechanische Belastungen durch den Aufprall von Großraumflugzeugen (bis Typ Boeing 747) in Genehmigungsverfahren als geführt angesehen wird (BfS 2003b). Allerdings wird das Eindringen von Flugzeugteilen und Kerosin (in geringer Menge durch die Lüftungsöffnungen) als möglich betrachtet. Bewertungen dieser Art sind jedoch mit Ungewissheiten behaftet (GÖK 2005). Das gilt auch bezüglich der Verhinderung des Eindringens einer größeren Menge Kerosins. Darüber hinaus ist ein entsprechender Nachweis für Gebäude beim Absturz eines A 380 nicht bekannt. Der aus Sicht der Genehmigungsbehörde vermeintlich erbrachte Nachweis wurde in einem Gerichtsurteil als nicht tragfähig bewertet (OVG S-H 2013).

Außerdem sind bei der Bewertung des Gebäudeverhaltens Alterungseffekte zu berücksichtigen. So muss zum Beispiel wegen der Korrosion an der Bewehrung von einer begrenzten Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken ausgegangen werden (TÜV 2015). Alterungseffekte können zwar teilweise durch Monitoring identifiziert und durch Instandhaltungsmaßnahmen in bestimmten Fällen verringert werden (Köhnke 2016), die Bewertung ihres Einflusses ist jedoch ebenfalls mit Ungewissheiten behaftet. Damit ist die Prognostizierbarkeit des Gebäudeverhaltens weiter eingeschränkt (siehe hierzu auch Reichardt (2016)).

Für Empfehlungen zur Auslegung des Lagergebäudes für das ENTRIA-Referenzmodell Oberflächenlagerung gegen mechanische Einwirkungen von außen wird im ENTRIA-Vertikalprojekt 7 hauptsächlich auf den Absturz eines schnell fliegenden Militärflugzeuges Bezug genommen (Reichardt 2016 und 2017). Wie bereits ausgeführt, geht die Genehmigungsbehörde für die Zwischenlagerung in Deutschland aber auch von einer Auslegung gegen größere Verkehrsflugzeuge aus.

Wird das Lagergebäude entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik gegen höchst mögliche mechanische Belastungen ausgelegt, so kann der Rückhaltefunktion des Gebäudes für schwerwiegende Einwirkungen bei Flugzeugabstürzen die Robustheitsklasse 3 (mittel) zugeordnet werden.

SEWD: Einstufung in die Robustheitsklasse 2 (gering)

Begründung für die Einstufung:

Bereits vor mehr als 20 Jahren war es Stand der Technik, dass mit Artilleriegranaten oder Raketenwerfern Stahlbetonwände von 1,15 m durchschlagen werden können (Hirsch et al. 1997). Mehr-

zweck-Lenkflugkörper können Stahlbeton bis zu einer Wanddicke von 3 m durchschlagen (EADS 2003). Die Durchschlagskraft entsprechender Waffen dürfte sich in den letzten 10 Jahren weiter erhöht haben. Waffen dieser Art sind durch interessierte Personen beschaffbar und können von Einzeltätern oder gut organisierten Tätergruppen zum Einsatz gebracht werden (GÖK 2004).

Die Prognose der Auswirkungen ist mit größeren Ungewissheiten belastet. Vorschädigungen der Stahlbetonkonstruktion haben hier keine relevante Bedeutung.

Die Wand eines Lagergebäudes kann durch die Anwendung bestimmter Waffen durchbrochen und die Rückhaltefähigkeit des Gebäudes stark eingeschränkt werden. *Für sonstige Einwirkungen Dritter wird der Rückhaltefunktion für Radionuklide deshalb die Robustheitsklasse 2 zugeordnet.*

KRIEG: Einstufung in die Robustheitsklasse 1 (sehr gering)

Begründung für die Einstufung:

Bei kriegerischen Einwirkungen sind der Einsatz des gesamten zur Verfügung stehenden modernen Waffenarsenals (Raketen, Bomben usw.) und absehbare Weiterentwicklungen zu berücksichtigen. Es muss von einer nachhaltigen Zerstörung des Gebäudes ausgegangen werden, da eine Auslegung gegen kriegerische Einwirkungen bei dem hier berücksichtigten Einwirkungsspektrum praktisch nicht möglich ist. Prognosefähigkeit und Vorschädigungen sind hier irrelevant.

Wegen der großen Zerstörung und der dadurch kaum noch vorhandenen Rückhaltefähigkeit wird hier die Robustheitsklasse 1 (sehr gering) zugeordnet.

Gesamtergebnis für die Sicherheitsfunktion Rückhaltung von Radionukliden

Zur Feststellung, ob ein Robustheitsdefizit vorliegt, werden die ermittelte Robustheit und die Relevanz der Sicherheitsfunktion in Beziehung gesetzt. Eine dabei festgestellte „Differenz“ darf nicht als rechnerische Differenz aufgefasst werden, sondern sie stellt die ordinalen Klassenunterschiede dar. Wenn in der Beziehung zwischen den beiden ordinalen Größen Robustheit und Relevanz ein Unterschied von zwei oder mehr Ordinalklassen ersichtlich ist (Bewertungsziffer -2 und kleiner), dann ist dies ein Indiz für ein Robustheitsdefizit.⁷

Der Bezug zwischen Relevanz und Robustheit der Sicherheitsfunktion Rückhaltefähigkeit des Gebäudes für Radionuklide bei schwerwiegenden Einwirkungen von außen wird in der folgenden Tabelle hergestellt:

⁷ Die genaue Vorgehensweise für die Prüfung auf Robustheitsdefizite wird in Teil IV der „Vergleichenden Risikobewertung“ (Kreusch & Neumann 2017) ausführlich beschrieben und auch anhand einer Tabelle dargestellt.

Sicherheitsfunktion	Relevanz	Robustheit			Auswertung		
		FLAB SEWD KRIEG			FLAB SEWD KRIEG		
Rückhaltung der Radionuklide durch die Barriere Gebäude bei schwerwiegenden Einwirkungen von außen	4	3	2	1	-1	-2	-3

Tabelle 6.3-1: Robustheitsdefizite für die Rückhaltung von Radionukliden bei Gebäuden

Die Auswertung ergibt negative Differenzen zwischen Relevanz und Robustheit von -1 und kleiner als -1 bzw. größer als |1|. Das bedeutet, **das Gebäude hat bezüglich der Sicherheitsfunktion Rückhaltung der Radionuklide für schwerwiegende Einwirkungen von außen beim Szenario Flugzeugabsturz im Rahmen der für die hier angewendete Methodik möglichen Aussagegenauigkeit kein Robustheitsdefizit. Bei den Szenarien Sonstige Einwirkungen Dritter und kriegsrische Einwirkungen wird dagegen ein Robustheitsdefizit bzw. ein erhebliches Robustheitsdefizit festgestellt.**

Auslegungsanforderung und ihre Erfüllung

Die grundsätzliche Auslegungsanforderung an die Gebäude und ihre Erfüllung spielt für die Ableitung des Gesamtergebnisses zu Robustheitsdefiziten keine direkte Rolle. Es wird hier dennoch kurz darauf eingegangen, um die Bewertung aus dieser Sicht zu ergänzen.

Anforderung: Rückhaltefähigkeit für Radionuklide durch die Barrierewirkung des Gebäudes bei Einwirkungen von außen über den gesamten Lagerzeitraum.

Diese Anforderung muss für Auslegungsstörfälle weitgehend erfüllt werden. Für in Genehmigungsverfahren als auslegungsüberschreitend bezeichnete Störfälle (z.B. Absturz eines schnell fliegenden Militärflugzeuges) muss die Rückhaltefähigkeit ebenfalls erhalten bleiben. Auslegungsstörfälle und die als auslegungsüberschreitend bezeichneten Störfälle werden in diesem Bericht zu schwerwiegenden Einwirkungen von außen nicht betrachtet. Die hier betrachteten Einwirkungen verursachen stärkere mechanische und thermische Belastungen.

Spätestens nach dem Gerichtsurteil zum Standort-Zwischenlager Brunsbüttel gilt die Erfüllung der Anforderung eingeschränkte Rückhaltefähigkeit auch für den Absturz eines großen Verkehrsflugzeuges wie den Airbus A 380 (OVG S-H 2013). Dieses Urteil bezieht sich aber auf die Zwischenlagerung als Ganzes, also unter Berücksichtigung von Behälter und Lagergebäude. Im hier vorliegenden Bericht werden der Behälter (im Kapitel 6.2) und das Gebäude (in diesem Kapitel 6.3) wegen der geforderten Redundanz der Barrieren und auch aus methodischen Gründen getrennt betrachtet.

Für das Gebäude hat sich im Szenario FLAB eine mittlere Robustheit in indirektem Bezug auf die Rückhaltefähigkeit ergeben (Robustheitsklasse 3).

In Bezug auf Angriffe mit panzerbrechenden Waffen kann die Rückhaltefähigkeit nur sehr eingeschränkt gewährleistet werden. Es ist von einer Teilzerstörung auszugehen und eine Rückhaltung nur durch die übrigen Gebäudestrukturen gegeben. Für das Gebäude hat sich im Szenario SEWD eine geringe Robustheit der Rückhaltefähigkeit ergeben (Robustheitsklasse 2).

Für kriegerische Einwirkungen gibt es keine Anforderung, die erfüllt werden muss. Eine Auslegung hiergegen ist auch nicht möglich. Folgerichtig hat sich für das Gebäude im Szenario KRIEG eine sehr geringe Robustheit der Rückhaltefähigkeit ergeben (Robustheitsklasse 1).

7 Risikovergleich der Referenzmodelle für die übertägigen Lager

In Kapitel 6 wurden Robustheitsdefizite für die übertägige Lagerung von hoch radioaktiven Abfällen festgestellt. Deshalb ist zu ermitteln, ob es für die ENTRIA-Referenzmodelle unterschiedliche Risiken gibt. Dies erfolgt in diesem Kapitel 7 für die Phase 1 der Umsetzung der ENTRIA-Referenzmodelle, während der sich die hoch radioaktiven Abfälle in Zwischen-, Eingangs- oder Oberflächenlager befinden.

Die ermittelten Robustheitsdefizite bei den Behältern gelten für die übertägige Lagerung der hoch radioaktiven Abfälle in Transport- und Lagerbehältern bei allen ENTRIA-Referenzmodellen.

In Bezug auf das Lagergebäude gibt es bereits Unterschiede zwischen der Zwischenlagerung zum Zeitpunkt der Entscheidung über die zu verfolgende Entsorgungsoption und einem gewissen Zeitraum danach einerseits und der Lagerung in regionalen Zwischenlagern, in Eingangslagern oder im Oberflächenlager andererseits. Für die derzeitigen Zwischenlager kann unter Bezug auf die Ausführungen in Kapitel 4.1 dieses Arbeitsberichtes bezüglich der hier für den Risikovergleich berücksichtigten Szenarien mit schwerwiegenden Einwirkungen von außen keine Barrierewirkung der Gebäude unterstellt werden. Grund dafür ist, dass der größte Teil der hoch radioaktiven Abfälle in den zentralen bzw. in den süddeutschen Zwischenlagern gelagert wird, die gegen sonstige Einwirkungen Dritter und gegen sonstige zivilisatorische Einwirkungen von außen nur sehr begrenzt ausgelegt sind. Wegen des zeitlichen Ablaufs der Lagerung (siehe hierzu Kapitel 3) wäre das Risiko für die Oberflächenlagerung größer, weil bei diesem Referenzmodell eine um fünf bis zehn Jahre längere Zwischenlagerung an den momentanen Standorten erfolgt. Andererseits ist wegen der Zwischenstation regionale Zwischenlager für die ENTRIA-Referenzmodelle zur Tiefenlagerung eine doppelte Anzahl von Transpor-

ten für die hoch radioaktiven Abfälle notwendig, bei denen auch nur die Barriere Behälter vorhanden und die Möglichkeit zur Vorsorge gegen SEWD noch geringer ist. Das durch die zusätzlichen Transporte bei schwerwiegenden Einwirkungen von außen verursachte Risiko für die ENTRIA-Referenzmodelle zur Tiefenlagerung wird etwa gleich bewertet, wie das durch die längere Zwischenlagerung in nicht redundant ausgelegten Lagern für das ENTRIA-Referenzmodell Oberflächenlagerung. Deshalb erfolgt zu diesen Aspekten keine weitere Berücksichtigung im Risikovergleich.

Für die regionalen Zwischenlager, für das Eingangslager an den Tiefenlagerstandorten (TE oder TM) sowie für das Oberflächenlager (OL) wird eine redundante Auslegung von Behälter und Lagergebäude gegen Einwirkungen von außen unterstellt. Unterschiede bestehen zwischen den Referenzmodellen für die jeweiligen Lager in Bezug auf das gelagerte Radioaktivitätsinventar und den Lagerzeitraum in redundant ausgelegten Lagern.

Außer den Unterschieden bezüglich der beiden Hauptbarrieren gibt es einen weiteren Unterschied, der Auswirkungen auf die Rückhaltung von Radionukliden nach schwerwiegenden Einwirkungen von außen haben kann. Bei der Oberflächenlagerung wird für den Risikovergleich hier die Kapselung der Brennelemente vor ihrer Einlagerung unterstellt. Das heißt, es gibt eine zusätzliche Barriere, die bezüglich schwerwiegender Einwirkungen von außen eine deutlich geringere Relevanz hat wie Behälter und Gebäude, aber dennoch den Freisetzungsquellterm beeinflussen kann.

Der Einfluss der Unterschiede auf das Risiko wird im Folgenden für die ENTRIA-Referenzmodelle qualitativ bewertet und verglichen. Dabei erfolgt der Risikovergleich für die übertägige Lagerung zum einen nur auf den Standort des Referenzmodells bezogen (isolierte Bewertung der Referenzmodelle). Zum anderen wird für den Vergleich auch die vorhergehende Lagerung in regionalen Zwischenlagern an anderen Standorten mit einbezogen.

Bei den folgenden Betrachtungen handelt es sich um multiple Ereignisse, die darüber hinaus sowohl von der Technik als auch von der gesellschaftlichen Entwicklung beeinflusst werden. Insofern dürfen die Vergleichsergebnisse im Hinblick auf die Auswahl einer Entsorgungsoption nicht überbewertet werden. Werden Unterschiede für die Auswirkungen von schwerwiegenden Einwirkungen von außen identifiziert, sollten sie dennoch in die Abwägung zur Auswahl einer Entsorgungsoption berücksichtigt werden.

7.1 Radioaktivitätsinventar

Für den qualitativen Vergleich der ENTRIA-Referenzmodelle bezüglich des Risikos für den Verlust oder teilweisen Verlust der Sicherheitsfunktion „Rückhaltung von Radionukliden bei schwerwiegenden Einwirkungen von außen“ und damit der möglichen Freisetzung und Radionuklidausbreitung in die Umgebung reicht eine grobe Abschätzung der jeweiligen Radioaktivitätsinventare. Es werden die Inventare zum Zeitpunkt der höchsten Auslastung der jeweiligen übertägigen Lager berücksichtigt.

Im **Oberflächenlager** ist das höchste radioaktive Gesamtinventar enthalten, nachdem die Einlagerung aller hoch radioaktiven Abfälle abgeschlossen ist. Das im Oberflächenlager zu erwartende Radioaktivitätsinventar wird hier aus Angaben des Bundesamtes für Strahlenschutz abgeleitet. Als genehmigtes Radioaktivitätsinventar für alle Standort-Zwischenlager an den Atomkraftwerken und für das Zwischenlager Nord werden knapp $11,5 \cdot 10^{20}$ Bq (BfS 2017) und für die zentralen Zwischenlager Ahaus und Gorleben $2 \cdot 10^{20}$ Bq⁸ angegeben. Hierbei handelt es sich um das insgesamt genehmigte Inventar für hoch radioaktive Abfälle aus Leistungsreaktoren. Die Genehmigungswerte werden aber mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht vollständig ausgeschöpft und zum Zeitpunkt des Beginns der Oberflächenlagerung ist das Inventar in beschränktem Umfang abgeklungen. Hinzu kommen allerdings deutlich geringere Radioaktivitätsinventare in Brennelementen aus Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren. Für den Risikovergleich wird hier abdeckend das oben genannte Radioaktivitätsinventar für das Gesamtinventar hoch radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland angesehen.

Insgesamt sind ca. 1.900 Behälter zu lagern (Endlagerkommission 2016). Der größte Teil der Radioaktivität wird sich in ca. 1.400 dieser Behälter befinden. Die übrigen ca. 500 Behälter mit Kugelbrennelementen aus Hochtemperaturreaktoren sowie Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren haben im Vergleich dazu ein relativ geringes Radioaktivitätsinventar. Für das Oberflächenlager ist im ENTRIA-Referenzmodell aus sicherheitstechnischen Gründen eine modulare Bauweise vorgesehen (siehe Kapitel 4.1). Hier wird davon ausgegangen, dass die ca. 500 Behälter mit geringem Radioaktivitätsinventar wegen ihrer geringeren Abmaße und der Stapelbarkeit in einem Modul gelagert werden. Für die anderen Module werden jeweils 200 Behälter mit hoch radioaktiven Abfällen aus Leistungsreaktoren angenommen. Gegenwärtig ist das größte Zwischenlager für 192 Transport- und Lagerbehälter in Gundremmingen genehmigt. Für dieses Standort-Zwischenlager ist ein Radioaktivitätsinven-

⁸ $2 \cdot 10^{20}$ Bq ist laut Genehmigung das zulässige Radioaktivitätsinventar für das Transportbehälter-Lager in Gorleben (BfS 1995). Durch die nach der Genehmigung veränderte Entsorgungspolitik in der Bundesrepublik Deutschland (dezentrale Zwischenlagerung von bestrahlten Brennelementen) wird dieses Inventar nicht ausgeschöpft; gleiches gilt im verstärkten Umfang für das Brennelement-Zwischenlager in Ahaus. Deshalb wird hier von dem genannten Radioaktivitätsinventar für beide Zwischenlager ausgegangen.

tar von $2,4 \cdot 10^{20}$ Bq zulässig (BfS 2017), das auch für die Module des Oberflächenlagers mit in Leichtwasserreaktoren verursachten Abfällen jeweils angenommen wird.

Im übertägigen **Eingangslager** eines Tiefenlagers (TE oder TM) müssen Behälter mit hoch radioaktiven Abfällen puffergelagert werden, weil die Abfälle nach allen gegenwärtig in der Bundesrepublik diskutierten Konzepten vor der Tiefenlagerung am Standort noch konditioniert werden müssen und weil aus logistischen Gründen (Anlieferung, Konditionierung, Schachttransport, Einlagerung unter Tage) Behälter nicht direkt zur untertägigen Einlagerung in ein Tiefenlager angeliefert werden können. Damit befinden sich über den gesamten Einlagerungszeitraum für das Tiefenlager Behälter mit hoch radioaktiven Abfällen im übertägigen Eingangslager. Deren Zahl dürfte schwanken, aber deutlich mehr als 10 und weniger als 100 Behälter betragen. In erster Näherung kann für die maximal 100 Behälter vom gleichen Radioaktivitätsinventar von $6,3 \cdot 10^{19}$ Bq ausgegangen werden, wie es durchschnittlich für gegenwärtige Standort-Zwischenlager mit massiver Bauweise genehmigt ist (BfS 2017).

Im Falle der Entscheidung für die Tiefenlagerung (TE oder TM) als Entsorgungsoption wird für diesen Risikovergleich unterstellt, dass zur Überbrückung des Zeitraumes, bis diese Lager in Betrieb genommen werden können, fünf neue **regionale Zwischenlager** errichtet werden. Werden diese regionalen Zwischenlager den Bundesländern zugeordnet, in denen Atomkraftwerke mit Leistungsreaktoren betrieben worden sind, so wird voraussichtlich das regionale Zwischenlager in Bayern das größte Radioaktivitätsinventar aufnehmen. Abdeckend, auch für die anderen regionalen Zwischenlager, wird entsprechend dem genehmigten Gesamtinventar der drei bayerischen Standort-Zwischenlager von $4,4 \cdot 10^{20}$ Bq ausgegangen.

Bei einem **Vergleich der ENTRIA-Referenzmodelle** hinsichtlich des Risikos für die Freisetzung größerer Mengen von Radionukliden muss nach den Szenarienbetrachtungen in Kapitel 6.2 und 6.3 unterschieden werden.

Risikovergleich für die Standorte der ENTRIA-Referenzmodelle (Tabelle 7.3-1)

FLAB

Für den Absturz eines Flugzeuges vom Typ A 380 ist aufgrund der in Kapitel 6.3 festgestellten Robustheitsdefizite die Zerstörung oder Teilzerstörung des Gebäudes möglich. Da für die Behälter in Kapitel 6.2 ebenfalls ein Robustheitsdefizit festgestellt wurde, ist insgesamt die Rückhaltung der Radionuklide zumindest für einen Teil der Transport- und Lagerbehälter nicht mehr im notwendigen Umfang gegeben. Die Abläufe nach dem Flugzeugabsturz in einem Modul des Oberflächenlagers (OL) und in einem übertägigen Eingangslager für ein Tiefenlager (TE und TM) müssen beim gegenwärtigen Kenntnisstand zu den Lagern als gleich angesehen werden. Die Zahl der betroffenen Behälter ist bei

Lagern mit 100 Behältern oder mehr weitgehend unabhängig von der Kapazität des Lagers. Die Anzahl von Behältern, deren Belastung nach einem FLAB zu einem Dichtungsversagen führen kann, ist begrenzt. Das gilt sowohl für die mechanische Belastung durch steife Flugzeugteile als auch für eine ausreichende thermische Belastung, die nur durch den Abbrand von Kerosin auf einer bestimmten Flächenausdehnung mit einer entsprechend begrenzten Behälterzahl erreicht werden kann. Allerdings ist die zusätzliche Kapselung der Brennelemente eine Barriere, die den Freisetzungsuellterm in begrenztem Umfang verringern kann. *Damit ist das auf die Freisetzungsmenge für Radionuklide in die Umgebung bezogene Risiko nach dem Absturz eines Großraumflugzeuges (A 380) für die Oberflächenlagerung als etwas geringer zu bewerten, als für die beiden gleich zu bewertenden Eingangslager der ENTRIA-Referenzmodelle mit Tiefenlagerung.*

Aufgrund der Größe des Flugzeuges können beim Oberflächenlager noch weitere Lagermodulgebäude beschädigt werden. Das wird aber nicht zur Aufhebung der Rückhaltefunktion von Behältern in diesen Lagerteilen führen, da die mechanischen und vor allem thermischen Einwirkungen wegen der räumlichen Verteilung nicht vergleichbar groß sein können.

SEWD

Bei sonstigen Einwirkungen Dritter wurden für Gebäude und Behälter deutliche Robustheitsdefizite ermittelt. Deshalb ist davon auszugehen, dass die Rückhaltefunktion für Radionuklide bei beiden Barrieren durch die schwerwiegenden Einwirkungen deutlich geschwächt wird. Davon sind jedoch nur wenige Behälter (in Kapitel 6.2 wird von zwei Behältern ausgegangen) betroffen. Die zusätzliche Kapselung der Brennelemente wirkt sich bei SEWD wegen des Eindringens des Geschosses in den Behälter in deutlich geringerem Umfang aus, wie beim FLAB. *Das auf die Freisetzungsmenge für Radionuklide in die Umgebung bezogene Risiko ist deshalb bei sonstigen Einwirkungen Dritter (z.B. Hohlaladungsbeschuss) für die drei ENTRIA-Referenzmodelle als gleich anzusehen.*

KRIEG

Kriegerische Einwirkungen sorgen für eine nachhaltige Zerstörung sowohl von Gebäuden als auch von Behältern. In den Kapiteln 6.2 und 6.3 wurde für beide Barrieren eine sehr geringe Robustheit für die Fähigkeit zur Rückhaltung von Radionukliden ermittelt. Die Kapselung der Brennelemente bei der Oberflächenlagerung ist hier nicht relevant. Von entsprechenden Angriffen können jeweils alle an einem Standort übertägig lagernden hoch radioaktiven Abfälle betroffen sein. Daraus folgt, dass das Risiko umso größer ist, je mehr Abfälle übertägig am Standort gelagert werden. *Das auf die Freisetzungsmenge für Radionuklide in die Umgebung bezogene Risiko bei schweren kriegerischen Einwirkungen ist für das ENTRIA-Referenzmodell Oberflächenlagerung (OL) aufgrund des deutlich höheren*

Radioaktivitätsinventars erheblich größer als für die mit untereinander gleichem Risiko zu bewertenden Eingangslager der ENTIA-Referenzmodelle für die Tiefenlagerung (TE oder TM).

Risikovergleich für die ENTIA-Referenzmodelle einschließlich der vorherigen regionalen Zwischenlagerung (Tabelle 7.3-2)

FLAB

Für den Absturz eines Flugzeuges vom Typ A 380 ist aufgrund der in Kapitel 6.3 festgestellten Robustheitsdefizite die Zerstörung oder Teilzerstörung des Gebäudes möglich. Da für die Behälter in Kapitel 6.2 ebenfalls ein Robustheitsdefizit festgestellt wurde, ist insgesamt die Rückhaltung der Radionuklide zumindest für einen Teil der Transport- und Lagerbehälter nicht mehr im notwendigen Umfang gegeben. Die Abläufe nach dem Flugzeugabsturz in einem Modul des Oberflächenlagers, in einem regionalen Zwischenlager oder in einem übertägigen Eingangslager für ein Tiefenlager müssen bei den für diesen Risikovergleich unterstellten Bedingungen als gleich angesehen werden. Die Zahl der betroffenen Behälter ist bei Lagern mit 100 Behältern oder mehr weitgehend unabhängig von der Kapazität des Lagers. Die Anzahl von Behältern, deren Belastung nach einem FLAB zu einem Dichtungsversagen führen kann, ist begrenzt. Das gilt sowohl für die mechanische Belastung durch steife Flugzeugteile als auch für eine ausreichende thermische Belastung, die nur durch den Abbrand von Kerosin auf einer bestimmten Flächenausdehnung mit einer entsprechend begrenzten Behälterzahl erreicht werden kann. Allerdings ist die zusätzliche Kapselung der Brennelemente im Oberflächenlager eine Barriere, die den Freisetzungsuellterm in begrenztem Umfang verringern kann. *Damit ist das auf die Freisetzungsmenge für Radionuklide in die Umgebung bezogene Risiko nach dem Absturz eines Großraumflugzeuges (A 380) für die Oberflächenlagerung (OL) als etwas geringer zu bewerten, als für die gleich zu bewertenden regionalen Zwischenlager und Eingangslager der ENTIA-Referenzmodelle mit Tiefenlagerung (TE oder TM).*

Aufgrund der Größe des Flugzeuges können beim Oberflächenlager noch weitere Lagermodulgebäude beschädigt werden. Das wird aber nicht zur Aufhebung der Rückhaltefunktion von Behältern in diesen Lagerteilen führen, da die mechanischen und vor allem thermischen Einwirkungen wegen der räumlichen Verteilung nicht vergleichbar groß sein können.

SEWD

Bei sonstigen Einwirkungen Dritter wurden für Gebäude und Behälter deutliche Robustheitsdefizite ermittelt. Deshalb ist davon auszugehen, dass die Rückhaltefunktion für Radionuklide bei beiden Barrieren durch die schwerwiegenden Einwirkungen deutlich geschwächt wird. Davon sind jedoch nur wenige Behälter (in Kapitel 6.2 wird von zwei Behältern ausgegangen) betroffen. Die zusätzliche

Kapselung der Brennelemente bei der Oberflächenlagerung wirkt sich bei SEWD wegen des Eindringens des Geschosses in den Behälter in deutlich geringerem Umfang aus, wie beim FLAB. *Das auf die Freisetzungsmenge für Radionuklide in die Umgebung bezogene Risiko ist deshalb bei sonstigen Einwirkungen Dritter (z.B. Hohlladungsbeschuss) für die drei ENTRIA-Referenzmodelle auch unter Berücksichtigung der regionalen Zwischenlager als gleich anzusehen.*

KRIEG

Kriegerische Einwirkungen sorgen für eine nachhaltige Zerstörung sowohl von Gebäuden als auch von Behältern. In den Kapiteln 6.2 und 6.3 wurde für beide Barrieren eine sehr geringe Robustheit für die Fähigkeit zur Rückhaltung von Radionukliden ermittelt. Das gilt für das Oberflächenlager, die regionalen Zwischenlager und das Eingangslager für die Tiefenlagerung (TE oder TM). Die Kapselung der Brennelemente bei der Oberflächenlagerung ist hier nicht relevant. Von entsprechenden Angriffen können jeweils alle an einem Standort übertägig lagernden hoch radioaktiven Abfälle betroffen sein. Daraus folgt, dass das Risiko umso größer ist, je mehr Abfälle übertägig am Standort gelagert werden. Das potenziell betroffene Radioaktivitätsinventar beträgt im Oberflächenlager ca. $13,5 \cdot 10^{20}$ Bq, im regionalen Zwischenlager $4,4 \cdot 10^{20}$ Bq und im Eingangslager $6,3 \cdot 10^{19}$ Bq. *Das auf die Freisetzungsmenge für Radionuklide in die Umgebung bezogene Risiko bei schweren kriegerischen Einwirkungen ist für das ENTRIA-Referenzmodell Oberflächenlagerung (OL) aufgrund des im Vergleich zu regionalen Zwischenlagern und Eingangslager deutlich höheren Radioaktivitätsinventars größer als für die mit untereinander gleichem Risiko zu bewertenden ENTRIA-Referenzmodelle für die Tiefenlagerung (TE und TM). Die Risikodifferenz ist bei Berücksichtigung der regionalen Zwischenlager wegen deren höherem Radioaktivitätsinventar im Vergleich zu den Eingangslagern allerdings nicht so groß, wie ohne Berücksichtigung der regionalen Zwischenlager.*

7.2 Übertägige Lagerzeiträume

Für die Bewertung des Risikos für die Aufhebung oder drastische Verringerung der Rückhaltung von Radionukliden durch Behälter und Gebäude bei der übertägigen Lagerung bzw. komplementär dazu der Freisetzung von Radionukliden in die Umgebung ist für die Eintrittswahrscheinlichkeit einer schwerwiegenden Einwirkung von außen der Lagerzeitraum relevant. Je länger die übertägige Lagerung dauert, je größer die Eintrittswahrscheinlichkeit und damit auch das Risiko.

Darüber hinaus kann es bei Betrachtung des Lagerzeitraumes relevant sein, mögliche Schwächungen der Barrieren zu berücksichtigen. Im Normalbetrieb während der Lagerung werden durch ionisierende Strahlung und Wärme aus den Abfällen sowie Korrosion und Alterung Werkstoff- bzw. Zustandsveränderungen bei den Behältern auftreten. Diese Veränderungen können die Widerstands-

kraft der Behälter gegen äußere Einwirkungen und damit die Sicherheitsfunktion „Rückhaltefähigkeit für Radionuklide“ schwächen. Das gilt in besonderem Maße für die Dichtungen im Deckelbereich der Behälter. In Genehmigungsverfahren wurde bisher ein systematisches Versagen der Dichtungen über einen Zeitraum von 40 Jahren ausgeschlossen, im Einzelfall ein Versagen aber für möglich gehalten (BfS 2003a). Der hierfür aus Sicht der Genehmigungsbehörde erbrachte Nachweis beruht nicht auf praktischen Erfahrungen, sondern auf Extrapolation von Experimenten mit zum Teil anderen Randbedingungen über kürzere Zeiträume und theoretischen Betrachtungen. Deshalb ist die Bewertung mit Ungewissheiten behaftet. Auf jeden Fall werden die Ungewissheiten mit zunehmendem Zeitraum größer (UBA 2002, intac 2014). Tritt durch Werkstoff- oder Zustandsveränderungen ein Nachlassen der Dichtheit oder eine Vorschädigung von Dichtungen auf, erhöht dies das Risiko von Freisetzungen nach äußeren Einwirkungen.

Ähnliches gilt für das Gebäude. Es können Material- bzw. Zustandsveränderungen durch Wärme von innen, wechselnde Temperaturbeanspruchungen von außen und Alterung auftreten (Köhnke 2016). Diese Veränderungen können die Widerstandskraft eines Gebäudes gegen äußere Einwirkungen und damit die Sicherheitsfunktion „Rückhaltefähigkeit für Radionuklide“ schwächen. Die Aussage über den Zustand bzw. über die Veränderung der Widerstandsfähigkeit der Stahlbetonstrukturen eines Lagergebäudes durch oben genannte Einwirkungen ist mit Ungewissheiten behaftet, die mit fortschreitender Zeit größer werden. Treten solche Veränderungen auf, kann sich das Risiko von Freisetzungen nach äußeren Einwirkungen in Abhängigkeit vom betrachteten Zeitraum erhöhen.

Für das **Oberflächenlager** wird im ENTRIA-Referenzmodell eine Betriebszeit bis zu 200 Jahre angenommen. Das heißt sowohl für das Gebäude als auch für den Behälter ist die Rückhaltefähigkeit für Radionuklide nach schwerwiegenden Einwirkungen von außen über diesen gesamten Zeitraum zu bewerten. Aufgrund des langen Zeitraumes sind dabei die vorstehend genannten Veränderungen zu berücksichtigen.

Im übertägigen **Eingangslager** für die Tiefenlagerung (TE oder TM) werden sich während der gesamten Dauer der Einlagerung in das Tiefenlager hoch radioaktive Abfälle befinden. Nach gegenwärtigen Kenntnissen wird es sich um einen Zeitraum von 30 bis 40 Jahren handeln (Endlagerkommission 2016 bzw. GRS 2011a). Für die Behälter im Eingangslager dürften die oben genannten Einschränkungen der Rückhaltefähigkeit durch Veränderungen während der Lagerdauer im Eingangslager nicht relevant sein, da sie jeweils nur kurze Zeit (i.d.R. weniger als ein Jahr) übertägig gelagert werden, bevor sie ins Tiefenlager verbracht werden. Für das Gebäude sind schon Veränderungen über den Zeitraum von 40 Jahren möglich. Unter Berücksichtigung der Prognoseunsicherheit zu Veränderungen für die-

sen Zeitraum sollte aber eine vorsorgende Auslegung des Gebäudes nach Stand von Wissenschaft und Technik möglich sein.

Die Betriebszeit der **regionalen Zwischenlager** hängt vom Zeitpunkt der Inbetriebnahme des Tiefenlagers (TE oder TM) ab. Hier wird vom Beginn der untertägigen Einlagerung im Zeitraum 55 bis 90 Jahre nach der Entscheidung über die Entsorgungsoption ausgegangen (Eckhardt 2017). Die Betriebszeit der regionalen Zwischenlager würde damit 30 bis 65 Jahre betragen. Für diesen Zeitraum sind die Veränderungen des Zustandes von Behälter und Gebäude zu berücksichtigen.

Für den **Vergleich der ENTRIA-Referenzmodelle** hinsichtlich des Risikos für negative Auswirkungen muss auch hier nach den in Kapitel 6.1 betrachteten Szenarien unterschieden werden. Dabei gelten in Bezug auf die Robustheitsdefizite die gleichen Aussagen wie in Kapitel 7.1. Sie werden hier nicht wiederholt.

Risikovergleich für die Standorte der ENTRIA-Referenzmodelle (Tabelle 7.3-1)

FLAB

Die Eintrittswahrscheinlichkeit für einen Flugzeugabsturz und damit das Risiko für Freisetzungen von Radionukliden ist für das Oberflächenlager durch den angenommenen Lagerzeitraum von 200 Jahren und dessen größere mit Behältern bestellte Fläche größer als für ein für 30-40 Jahre genutztes kleineres Eingangslager.

Bei einem Eingangslager sind keine Beeinträchtigungen der Rückhaltefähigkeit für Radionuklide bei Einwirkungen von außen auf den Behälter durch den Lagerzeitraum zu erwarten. Für das Oberflächenlager sind sie jedoch relevant. Bisher wird in den Genehmigungen zur Zwischenlagerung von einem Nachweis zum Ausschluss eines systematischen Versagens der Behälterdichtungen unter dem Einfluss des Normalbetriebes für 40 Jahre ausgegangen (BfS 2003a und b). Das ist weniger als $\frac{1}{4}$ des Zeitraums für das Oberflächenlager. Außerdem wird ein Versagen im Einzelfall für möglich gehalten und Vorschädigungen unterhalb der Versagensgrenze sind damit auch nicht ausgeschlossen. Das Risiko für Freisetzungen von Radionukliden aufgrund des Verlustes oder die Verringerung der Rückhaltefähigkeit von Behältern ist für das Oberflächenlager größer als für Eingangslager.

Beeinträchtigungen der Rückhaltefähigkeit für Radionuklide bei Einwirkungen von außen auf das Lagergebäude sind für Eingangslager wegen der auf einige 10er Jahre begrenzten Betriebszeit nicht zu erwarten. Für das Oberflächenlager können solche Beeinträchtigungen bei einem Zeitraum von 200 Jahren durchaus gegeben sein. Deshalb ist das Risiko für Freisetzungen von Radionukliden nach schwerwiegenden Einwirkungen von außen größer.

Insgesamt ist festzustellen, dass das Risiko für Freisetzungen von Radionukliden durch den Absturz eines großen Verkehrsflugzeuges (A 380) aufgrund des längeren Lagerzeitraumes und der größeren Fläche für das ENTRIA-Referenzmodell zur Oberflächenlagerung (OL) größer ist als für Eingangslager bei der Tiefenlagerung (TE oder TM).

SEWD

Die Eintrittswahrscheinlichkeit für sonstige Einwirkungen Dritter lässt sich nicht quantitativ ermitteln, sie müssen in atomrechtlichen Genehmigungsverfahren dennoch unterstellt werden. Für einen qualitativen Vergleich kann festgestellt werden, dass die Wahrscheinlichkeit mit zunehmendem Zeitraum steigt. Zeitlich bedingte Veränderungen von Werkstoff/Material oder Zustand sowie die Größe des Lagers haben keinen wesentlichen Einfluss auf das Risiko für Freisetzungen von Radionukliden nach sonstigen Einwirkungen Dritter. *Damit ist das Risiko für Freisetzungen von Radionukliden für das Oberflächenlager (OL) durch den Lagerzeitraum von 200 Jahren geringfügig größer als für ein für 30-40 Jahre genutztes Eingangslager eines Tiefenlagers (TE oder TM).*

KRIEG

Für kriegerische Einwirkungen lässt sich keine Eintrittswahrscheinlichkeit ermitteln. Für den Risikovergleich wird davon ausgegangen, dass sie stattfinden kann. Im gegebenen Fall sorgen kriegerische Einwirkungen für eine nachhaltige Zerstörung sowohl des Gebäudes als auch der Behälter. Zeitlich bedingte Veränderungen von Werkstoff/Material oder Zustand haben keinen wesentlichen Einfluss auf das Risiko für Freisetzungen von Radionukliden nach kriegerischen Einwirkungen. *Damit ist das Risiko für Freisetzungen von Radionukliden für das Oberflächenlager (OL) durch den Lagerzeitraum von 200 Jahren geringfügig größer als für ein für 30-40 Jahre genutztes Eingangslager eines Tiefenlagers (TE oder TM), da die Möglichkeit für den Eintritt der kriegerischen Einwirkungen über einen längeren Zeitraum gegeben ist.*

Risikovergleich für die ENTRIA-Referenzmodelle einschließlich der vorherigen regionalen Zwischenlagerung (Tabelle (7.3-2))

FLAB

Die Eintrittswahrscheinlichkeit für einen Flugzeugabsturz und damit das Risiko für Freisetzungen von Radionukliden ist für das Oberflächenlager durch den Lagerzeitraum von 200 Jahren geringfügig größer als für die Gesamtbetriebszeit von regionalen Zwischenlagern und Eingangslager von 65 - 105 Jahre. Die Größe des Oberflächenlagers hat hier nur einen geringen Einfluss auf die Eintrittswahrscheinlichkeit, weil sie mit den Flächen der regionalen Zwischenlager, die auch über einen langen Zeitraum betrieben werden, vergleichbar sind.

Bisher wird in den Genehmigungen zur Zwischenlagerung von einem Nachweis zum Ausschluss eines systematischen Versagens der Behälterdichtungen unter dem Einfluss des Normalbetriebes für 40 Jahre ausgegangen (BfS 2003a und b). Das ist weniger als $\frac{1}{4}$ des Zeitraums für das Oberflächenlager. Außerdem wird ein Versagen im Einzelfall für möglich gehalten und Vorschädigungen unterhalb der Versagensgrenze sind damit auch nicht ausgeschlossen. Für die ENTRIA-Referenzmodelle zur Tiefenlagerung ist bezüglich möglicher Vorschädigungen die Gesamtlagerzeit der einzelnen Behälter in regionalen Zwischenlagern und zur Pufferlagerung im Eingangslager von 30 bis 65 Jahre (abhängig von den jeweiligen logistischen Randbedingungen) zu berücksichtigen. Damit sind Beeinträchtigungen der Rückhaltefähigkeit für Radionuklide bei Einwirkungen von außen auf den Behälter möglich. Für das Oberflächenlager ist das Risiko für Freisetzungen von Radionukliden aufgrund des Verlustes oder die Verringerung der Rückhaltefähigkeit von Behältern wegen der Lagerzeit von 200 Jahren größer.

Beeinträchtigungen der Rückhaltefähigkeit für Radionuklide bei Einwirkungen von außen auf das Lagergebäude sind für Eingangslager und regionale Zwischenlager aufgrund ihrer Betriebszeit nicht zu erwarten. Für das Oberflächenlager können solche Beeinträchtigungen bei einem Zeitraum von 200 Jahren durchaus gegeben sein. Deshalb ist das Risiko für Freisetzungen von Radionukliden nach schwerwiegenden Einwirkungen von außen größer.

Insgesamt ist festzustellen, dass das Risiko für Freisetzungen von Radionukliden durch den Absturz eines großen Verkehrsflugzeuges (A 380) aufgrund des längeren Lagerzeitraumes für das ENTRIA-Referenzmodell zur Oberflächenlagerung (OL) etwas größer ist als für die ENTRIA-Referenzmodelle zur Tiefenlagerung (TE und TM).

SEWD

Die Eintrittswahrscheinlichkeit für sonstige Einwirkungen Dritter lässt sich nicht quantitativ ermitteln, sie müssen in atomrechtlichen Genehmigungsverfahren trotzdem unterstellt werden. Für einen qualitativen Vergleich kann festgestellt werden, dass die Wahrscheinlichkeit mit zunehmendem Zeitraum steigt. Zeitlich bedingte Veränderungen von Werkstoff/Material oder Zustand haben keinen wesentlichen Einfluss auf das Risiko von Freisetzungen von Radionukliden nach sonstigen Einwirkungen Dritter. *Damit ist das Risiko für Freisetzungen von Radionukliden für das Oberflächenlager (OL) durch den Lagerzeitraum von 200 Jahren geringfügig größer als für die 65-105 Jahre Lagerung bei den ENTRIA-Referenzmodellen zur Tiefenlagerung (TE und TM).*

KRIEG

Für kriegerische Einwirkungen lässt sich keine Eintrittswahrscheinlichkeit ermitteln, sie wird unterstellt. Im gegebenen Fall sorgen sie für eine nachhaltige Zerstörung sowohl des Gebäudes als auch

der Behälter. Zeitlich bedingte Veränderungen von Werkstoff/Material oder Zustand haben keinen wesentlichen Einfluss auf das Risiko von Freisetzungen von Radionukliden nach kriegesischen Einwirkungen. *Damit ist das Risiko für Freisetzungen von Radionukliden für das Oberflächenlager (OL) durch den Lagerzeitraum von 200 Jahren geringfügig größer als für die 65-105 Jahre Lagerung bei den ENTRIA-Referenzmodellen zur Tiefenlagerung (TE und TM).*

7.3 Gesamtergebnis des Vergleichs für übertägige Lagerung

Die hier berücksichtigte übertägige Lagerung erfolgt bei den ENTRIA-Referenzmodellen zur Tiefenlagerung (TE und TM) in regionalen Zwischenlagern und Eingangslagern und beim ENTRIA-Referenzmodell zur Oberflächenlagerung (OL) im Oberflächenlager.

In den Tabellen 7.3-1 und 7.3-2 werden die Ergebnisse des Risikovergleichs für schwerwiegende Einwirkungen von außen während der übertägigen Lagerung bei den drei ENTRIA-Referenzmodellen aus den Kapiteln 7.1 und 7.2 zusammengefasst.

Der Risikovergleich wurde in Kapitel 7.1 bezüglich des von den schwerwiegenden Einwirkungen von außen betroffenen Radioaktivitätsinventars und seiner Freisetzungsmöglichkeit (jeweils die obere Bewertung in den Vergleichszeilen der Tabelle) und in Kapitel 7.2 bezüglich des Lagerungszeitraumes in dem die Einwirkungen auftreten können (jeweils die untere Bewertung in den Vergleichszeilen) durchgeführt. Der Vergleich zum Radioaktivitätsinventar betrifft den Faktor Schadensausmaß des Risikos und der Vergleich zum Lagerungszeitraum betrifft hauptsächlich den Faktor Eintrittswahrscheinlichkeit des Risikos.

In den Tabellen 7.3-1 und 7.3-2 bedeuten:

- < etwas geringeres Risiko
- = gleiches Risiko
- > geringfügig größeres Risiko
- >> größeres Risiko
- >>> erheblich größeres Risiko

Gesamtergebnis Risikovergleich an den Standorten der ENTRIA-Referenzmodelle

Es wird das

- Oberflächenlager (OL) dem übertägigen Eingangslager des Tiefenlagers ohne Monitoring und ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (TE- $\dot{U}T_1$)
- Oberflächenlager (OL) dem übertägigen Eingangslager des Tiefenlagers mit Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (TM- $\dot{U}T_1$)
- übertägige Eingangslager des Tiefenlagers ohne Monitoring und ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (TE- $\dot{U}T_1$) dem übertägigen Eingangslager des Tiefenlagers mit Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (TM- $\dot{U}T_1$)

gegenübergestellt.

	Indikator	FLAB	SEWD	KRIEG
OL vs. TE-$\dot{U}T_1$	Radioaktivitätsinventar	<	=	>>>
	Lagerungszeitraum	>>	>	>
OL vs. TM-$\dot{U}T_1$	Radioaktivitätsinventar	<	=	>>>
	Lagerungszeitraum	>>	>	>
TE-$\dot{U}T_1$ vs. TM-$\dot{U}T_1$	Radioaktivitätsinventar	=	=	=
	Lagerungszeitraum	=	=	=

Tabelle 7.3-1: Risikovergleich für schwerwiegende Einwirkungen von außen während der übertägigen Lagerung an den Standorten der ENTRIA-Referenzmodelle

Im Ergebnis zeigt die Tabelle, dass das ENTRIA-Referenzmodell für das Oberflächenlager (OL) bei schwerwiegenden übertägigen Einwirkungen von außen während der übertägigen Lagerung mit insgesamt deutlich größeren Risiken verbunden ist als die ENTRIA-Referenzmodelle zur Tiefenlagerung (TE und TM) mit ihren übertägigen Eingangslagern.

Die Risiken für das ENTRIA-Referenzmodell TE und für das ENTRIA-Referenzmodell TM sind vergleichbar.

Gesamtergebnis Risikovergleich für die ENTRIA-Referenzmodelle einschließlich der vorherigen regionalen Zwischenlagerung

Gegenübergestellt werden

- das Oberflächenlager (OL) einerseits, den regionalen Zwischenlagern und dem übertägigen Eingangslager des Tiefenlagers ohne Monitoring und ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (TE-üt₂) andererseits
- das Oberflächenlager (OL) einerseits, den regionalen Zwischenlagern und dem übertägigen Eingangslager des Tiefenlagers mit Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (TM-üt₂) andererseits
- die regionalen Zwischenlager und das übertägige Eingangslager des Tiefenlagers ohne Monitoring und ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (TE-üt₂) einerseits, den regionalen Zwischenlagern und dem übertägigen Eingangslager des Tiefenlagers mit Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (TM-üt₂) andererseits.

	Indikator	FLAB	SEWD	KRIEG
OL vs. TE-üt ₂	Radioaktivitätsinventar	<	=	>>
	Lagerungszeitraum	>	>	>
OL vs. TM-üt ₂	Radioaktivitätsinventar	<	=	>>
	Lagerungszeitraum	>	>	>
TE-üt ₂ vs. TM-üt ₂	Radioaktivitätsinventar	=	=	=
	Lagerungszeitraum	=	=	=

Tabelle 7.3-2: Risikovergleich für schwerwiegende Einwirkungen von außen während der übertägigen Lagerung an den Standorten der ENTRIA-Referenzmodelle (TE, TM, OL) und in den regionalen Zwischenlagern (TE, TM)

Die Tabelle 7.3-2 zeigt, dass bei Einbeziehung der für die ENTRIA-Referenzmodelle zur Tiefenlagerung unterstellten regionalen Zwischenlagerung vor der Verbringung ins Eingangslager am Standort des Tiefenlagers der Risikounterschied zum ENTRIA-Referenzmodell Oberflächenlagerung geringer ist als ohne Berücksichtigung der Zwischenlagerung. **Insgesamt ist das Risiko für schwerwiegende übertägige Einwirkungen von außen in der Phase 1 bei der Lagerung im Oberflächenlager dennoch größer als bei der übertägigen Lagerung bei den beiden ENTRIA-Referenzmodellen für Tiefenlagerung.**

Gründe hierfür sind die unterschiedlichen Radioaktivitätsinventare in Oberflächenlager, regionalen Zwischenlagern und Eingangslagern sowie die unterschiedlichen Lagerzeiträume. Die Auslegung gegen schwerwiegende Einwirkungen von außen ist bei den drei Lagertypen gleich.

Die Risiken für das ENTRIA-Referenzmodell der Tiefenlagerung ohne Monitoring und ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (TE) und für das ENTRIA-Referenzmodell der Tiefenlagerung mit Monitoring und Rückholbarkeit (TM) sind auch hier vergleichbar.

8 Qualitativer Risikovergleich der ENTRIA-Referenzmodelle nach jeweiligem Abschluss der Einlagerung

8.1 Vorgehen und Anmerkungen

In diesem Kapitel wird ein qualitativer Risikovergleich der drei ENTRIA-Referenzmodelle für die Phase 2 (zur Phasenaufteilung siehe Kapitel 1) der Umsetzung der Entsorgungsoptionen vorgenommen, also ab dem Zeitpunkt zu dem jeweils die angestrebte Einlagerung für alle hoch radioaktiven Abfälle vollständig abgeschlossen ist. Das bedeutet, bei den ENTRIA-Referenzmodellen für die Tiefenlagerung (TE und TM) befinden sich alle Abfälle unter Tage und bei dem ENTRIA-Referenzmodell für die Oberflächenlagerung (OL) befinden sich alle hoch radioaktiven Abfälle über Tage im Lager.

Die Abfälle werden in Behältern eingelagert. Für den hier durchgeführten Risikovergleich wird davon ausgegangen, dass die zur Tiefenlagerung vorgesehenen Behälter bezüglich mechanischen und thermischen Einwirkungen von außen die gleichen sicherheitstechnischen Anforderungen erfüllen, wie die in Kapitel 6 und 7 berücksichtigten Transport- und Lagerbehälter. Diese Annahme ist plausibel, da es sich bei allen ENTRIA-Referenzmodellen um selbstabschirmende, dickwandige Behälter für jeweils mehrere Brennelemente oder Kokillen mit Abfällen aus der Wiederaufarbeitung handelt. Diese Behälter müssen befördert und gehandhabt werden. Sie sind also gegen Störfälle auszulegen und es ist darüber hinaus für auslegungsüberschreitende Störfälle Vorsorge zu treffen. Andere Eigenschaften oder Konstruktionsmerkmale der Behälter sind für die hier betrachteten Risiken durch schwerwiegende übertägige Einwirkungen von außen nicht relevant.

Übertägige Einwirkungen von außen sind für die beiden ENTRIA-Referenzmodelle zur Tiefenlagerung wirtsgesteinsunabhängig, auch wenn sie schwerwiegend sind.

In den folgenden Kapiteln 8.2 bis 8.4 werden für die drei ENTRIA-Referenzmodelle zunächst alle für den qualitativen Risikovergleich relevanten Ausgangsverhältnisse dargestellt. Anschließend wird das

Verhalten der Barrieren für die drei in Kapitel 2 beschriebenen und begründeten Szenarien für die schwerwiegenden Einwirkungen von außen verbal argumentativ bewertet. Dies erfolgt getrennt für die Barrieren der ENTRIA-Referenzmodelle. Die betrachteten schwerwiegenden Einwirkungen von außen sind:

FLAB Mechanische und thermische Belastungen durch den gezielten oder zufälligen Absturz eines Flugzeugzeuges vom Typ A 380.

SEWD Mechanische und thermische Belastungen durch sonstige Einwirkungen Dritter.

KRIEG Mechanische und thermische Belastungen durch kriegerische Einwirkungen.

In Kapitel 8.5 wird der Risikovergleich vorgenommen. Dieser Vergleich kann nur grob qualitativ erfolgen. Grund dafür ist u.a., dass die Auslegung für die ENTRIA-Referenzmodelle von Tiefenlagern bisher nicht festgelegt ist. Für den Risikovergleich wird der Zeitpunkt gewählt, an dem alle hoch radioaktiven Abfälle eingelagert sind und die jeweils für die weitere Lagerung vorgesehenen Arbeiten abgeschlossen sind.

Auch bei den hier im Folgenden durchgeführten Betrachtungen handelt es sich – wie in Kapitel 7 – um multiple Ereignisse, die darüber hinaus sowohl von der Technik als auch von der gesellschaftlichen Entwicklung beeinflusst werden. Insofern dürfen die Vergleichsergebnisse im Hinblick auf die Auswahl einer Entsorgungsoption nicht überbewertet werden. Werden Unterschiede für die Auswirkungen von schwerwiegenden Einwirkungen von außen identifiziert, sollten sie dennoch in die Abwägung zur Auswahl einer Entsorgungsoption berücksichtigt werden.

8.2 Tiefenlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit

Wenn die Einlagerung aller hoch radioaktiven Abfälle in das Tiefenlager abgeschlossen ist, soll nach dem vorgesehenen Sicherheitskonzept ein zügiger Verschluss des Tiefenlagerbergwerkes ohne Unterbrechung erfolgen. Die Abfälle sind danach durch mehrere Barrieren, hier zusammengefasst in geologische Formation, Bergwerksverschluss und Behälter, geschützt. Diese Barrieren werden nachfolgend getrennt betrachtet.

Geologische Formation

Die Behälter befinden sich in 600 bis 800 m Tiefe in einer Einlagerungsstrecke und sind dort von Versatzmaterial umgeben. Die Einlagerungsstrecke ist mit einem Abschlussbauwerk verschlossen. Der gesamte Einlagerungsbereich ist vollständig vom Wirtsgestein des Tiefenlagers mit sicherheitsbestimmter Mächtigkeit überdeckt. Oberhalb des Wirtsgesteins befinden sich über mehrere 100 m bis

zur Erdoberfläche (Biosphäre) weitere unterschiedliche geologische Schichten mit unterschiedlichen Eigenschaften. Dieser geologische Gesteinskörper um und über dem Einlagerungsbereich des Tiefenlagers ist die Hauptbarriere gegen übertägige Einwirkungen. Das Verhalten dieser Barriere gegenüber schwerwiegenden übertägigen Einwirkungen wird wie folgt eingeschätzt:

FLAB

Der Absturz eines Flugzeuges vom Typ A 380 erfolgt auf die Erdoberfläche oberhalb des Tiefenlagerbergwerks.

Aufgrund des Abstands zur Erdoberfläche und der aus unterschiedlichen Schichten aufgebauten geologischen Formation ist nach dem Absturz eines Flugzeuges (unabhängig von seiner Größe) weder durch mechanische, noch durch thermische Einwirkungen von einer relevanten Beeinträchtigung der Rückhaltefähigkeit der geologischen Barriere für Radionuklide auszugehen.

SEWD

Die sonstige Einwirkung Dritter erfolgt auf die Erdoberfläche oberhalb des Tiefenlagerbergwerks.

Aufgrund des Abstands zur Erdoberfläche und der aus unterschiedlichen Schichten aufgebauten geologischen Formation ist nach einem terroristischen Einsatz von panzerbrechenden Waffen oder Sprengstoffwaffen weder durch mechanische, noch durch thermische Einwirkungen von einer relevanten Beeinträchtigung der Rückhaltefähigkeit der geologischen Barriere für Radionuklide auszugehen. Das gilt auch für die Weiterentwicklung dieser Waffen.

Theoretisch möglich wären terroristische Angriffe, bei denen zunächst ein Bohrloch bis in das Wirtsgestein abgeteuft wird. Eine Freisetzung könnte dann durch direktes anbohren eines Behälters bzw. der radioaktiven Abfälle oder durch Einsatz von Sprengmitteln im Bohrlochgrund erreicht werden. Die Möglichkeit der Durchführung eines solchen Angriffs dürfte allerdings nicht realistisch sein. Der dafür benötigte Aufwand und vor allem der für die Bohrung benötigte Zeitraum sorgt mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit für eine Unterbindung durch Gegenmaßnahmen. Diese Maßnahmen werden durch die zum Zeitpunkt des Angriffs existierende Gesellschaft initiiert. Gibt es keine gesellschaftlichen Strukturen, wird auch keine sonstige Einwirkung Dritter erfolgen.

KRIEG

Die kriegerische Einwirkung erfolgt auf die Erdoberfläche oberhalb des Tiefenlagerbergwerkes.

Aufgrund des Abstands zur Erdoberfläche und der aus unterschiedlichen Schichten aufgebauten geologischen Formation ist nach kriegerischen Einwirkungen mit heute bekannten oder absehbar

entwickelbaren Waffen weder durch mechanische, noch durch thermische Einwirkungen von einer relevanten Beeinträchtigung der Rückhaltefähigkeit der geologischen Barriere für Radionuklide auszugehen.

Bergwerksverschluss

Auf der Einlagerungssohle (Ebene, in der die Abfälle eingelagert sind) befinden sich Zugangs- und andere Strecken sowie Infrastrukturhohlräume. Alle Strecken und Hohlräume bis zu den Schächten sind verfüllt und mit Abschlussbauwerken versehen. Die Schachtröhren sind verfüllt und dann mit redundanten und diversitären Schachtabdichtungen versehen. Das Verhalten dieser Barriere gegenüber schwerwiegenden übertägigen Einwirkungen wird wie folgt eingeschätzt:

FLAB

Der Absturz eines Flugzeuges vom Typ A 380 erfolgt auf einen der Schachtansatzpunkte.

Aufgrund des Abstands zur Erdoberfläche und dem Verschlusssystem des Bergwerkes ist nach dem Absturz eines Flugzeuges (unabhängig von seiner Größe) weder durch mechanische, noch durch thermische Einwirkungen von einer relevanten Beeinträchtigung der Rückhaltefähigkeit der maßgeblichen geologischen und der technischen Barrieren für Radionuklide auszugehen.

SEWD

Die sonstige Einwirkung Dritter erfolgt auf einen der Schachtansatzpunkte.

Aufgrund des Abstands zur Erdoberfläche und dem Verschlusssystem des Bergwerkes ist nach einem terroristischen Einsatz von panzerbrechenden Waffen oder Sprengstoffwaffen an der Erdoberfläche weder durch mechanische, noch durch thermische Einwirkungen von einer relevanten Beeinträchtigung der Rückhaltefähigkeit der geologischen Barriere für Radionuklide auszugehen. Das gilt auch im Falle einer Weiterentwicklung dieser Waffen.

Theoretisch möglich wären terroristische Angriffe, bei denen zunächst der Schachtverschluss und dann die Verfüllung entfernt werden. Es könnte dann versucht werden, eine Freisetzung durch den Einsatz von Sprengmitteln in der Teufe der Tiefenlagereinlagerungssohle zu erreichen. Die Möglichkeit der Durchführung eines solchen Angriffs dürfte allerdings nicht realistisch sein. Der dafür benötigte Aufwand und vor allem der benötigte Zeitraum sorgt mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit für eine Unterbindung durch Gegenmaßnahmen der existierenden Gesellschaft. Darüber hinaus ist aufgrund der Barrierenwirkung von Abschlussbauwerk und Versatz in der Einlagerungsstrecke fraglich, ob die Behälter mit den radioaktiven Abfällen durch die mittels Sprengwirkung erzeugte

Druckwelle eine so große mechanische Belastung erfahren, die ihre Integrität aufhebt. Gibt es keine gesellschaftlichen Strukturen, wird auch keine sonstige Einwirkung Dritter erfolgen.

KRIEG

Die kriegerische Einwirkung erfolgt an der Erdoberfläche.

Aufgrund des Abstands zur Erdoberfläche und dem Verschlusssystem des Bergwerkes ist nach kriegerischen Einwirkungen mit heute bekannten oder absehbar entwickelbaren Waffen weder durch mechanische, noch durch thermische Einwirkungen von einer relevanten Beeinträchtigung der Rückhaltefähigkeit der maßgeblichen geologischen Barriere und den technischen Barrieren für Radionuklide auszugehen.

Behälter

Die letzte Barriere gegen übertägige Einwirkungen von außen ist der Behälter.

FLAB

Absturz eines Flugzeuges vom Typ A 380 auf der Erdoberfläche über dem Tiefenlager oder auf einen der Schachtansatzpunkte.

Es ist davon auszugehen, dass durch die Barrieren geologische Formation und Verschlusssystem des Bergwerkes am Behälter keine mechanischen Belastungen auftreten, die zu einem Integritätsverlust führen können. Thermische Belastungen durch Zutritt von Kerosin sind ebenfalls nicht möglich.

SEWD

Die sonstige Einwirkung Dritter erfolgt auf der Erdoberfläche über dem Tiefenlager oder einen der Schachtansatzpunkte.

Es ist davon auszugehen, dass durch die Barrieren geologische Formation und Bergwerksverschluss sowie Versatz und weitere Verschlussbauwerke im Tiefenlagerbergwerk am Behälter keine mechanischen oder thermischen Belastungen auftreten, die zu einem Integritätsverlust führen können.

KRIEG

Die kriegerische Einwirkung erfolgt an der Erdoberfläche.

Es ist davon auszugehen, dass durch die Barrieren geologische Formation und Bergwerksverschluss sowie Versatz und weitere Verschlussbauwerke im Tiefenlagerbergwerk am Behälter keine mechanischen oder thermischen Belastungen auftreten, die zu einem Integritätsverlust führen können.

Gesamtaussage

Für das ENTRIA-Referenzmodell zur Tiefenlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit ist der Erhalt der Rückhaltefunktion für Radionuklide nach schwerwiegenden Einwirkungen von außen für alle drei in diesem Bericht betrachteten Szenarien gegeben.

8.3 Tiefenlagerung mit Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit

Wenn die Einlagerung aller hoch radioaktiven Abfälle in das Tiefenlager abgeschlossen ist, sind die Einlagerungsstrecken verfüllt und mit Abschlussbauwerken versehen. Weitere Verfüll- oder Verschlussmaßnahmen sind für den wirtsgesteins- und von gesellschaftlichen Randbedingungen abhängigen Offenhaltungszeitraum für die eventuelle Rückholung nicht vorgesehen (Mintzlaff 2016). Außer den Hohlräumen auf der Einlagerungssohle für die Abfälle gibt es noch die Monitoringsohle oberhalb der Einlagerungssohle mit Bohrungen bis in die unmittelbare Umgebung der Behälter.

Geologische Formation

Die Behälter befinden sich in 600 bis 800 m Tiefe. Sie sind von Versatzmaterial umgeben und die Einlagerungsstrecke ist mit einem Abschlussbauwerk verschlossen. Die Einlagerungsstrecken sind vollständig mit dem Wirtsgestein des Tiefenlagers mit sicherheitsbestimmter Mächtigkeit überdeckt. Oberhalb des Wirtsgesteins befinden sich über mehrere 100 m bis zur Erdoberfläche (Biosphäre) weitere unterschiedliche geologische Schichten mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften. Dieser geologische Gesteinskörper um und über dem Einlagerungsbereich des Tiefenlagers (geologische Formation) ist die Hauptbarriere gegen übertägige Einwirkungen. Das Verhalten dieser Barriere gegenüber schwerwiegenden übertägigen Einwirkungen wird wie folgt eingeschätzt:

FLAB

Der Absturz eines Flugzeuges vom Typ A 380 erfolgt auf die Erdoberfläche oberhalb des Tiefenlagerbergwerks.

Aufgrund des Abstands zur Erdoberfläche und der aus unterschiedlichen Schichten aufgebauten geologischen Formation ist nach dem Absturz eines Flugzeuges (unabhängig von seiner Größe) weder durch mechanische, noch durch thermische Einwirkungen von einer relevanten Beeinträchtigung der Rückhaltefähigkeit der geologischen Barriere für Radionuklide auszugehen.

SEWD

Die sonstige Einwirkung Dritter erfolgt auf die Erdoberfläche oberhalb des Tiefenlagerbergwerks.

Aufgrund des Abstands zur Erdoberfläche und der aus unterschiedlichen Schichten aufgebauten geologischen Formation ist nach einem terroristischen Einsatz von panzerbrechenden Waffen oder Sprengstoffwaffen weder durch mechanische, noch durch thermische Einwirkungen von einer relevanten Beeinträchtigung der Rückhaltefähigkeit der geologischen Barriere für Radionuklide auszugehen. Das gilt auch für eine Weiterentwicklung dieser Waffen.

Theoretisch möglich wären terroristische Angriffe, bei denen zunächst ein Bohrloch bis in das Wirtsgestein abgeteuft wird. Eine Freisetzung könnte dann durch direktes Anbohren des Behälters bzw. der radioaktiven Abfälle oder durch Einsatz von Sprengmitteln im Bohrlochgrund erreicht werden. Die Möglichkeit der Durchführung eines solchen Angriffs dürfte allerdings nicht realistisch sein. Der dafür benötigte Aufwand und vor allem der für die Bohrung benötigte Zeitraum sorgt mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit für eine Unterbindung durch Gegenmaßnahmen der existierenden Gesellschaft. Darüber hinaus ist aufgrund der Barrierenwirkung von Abschlussbauwerk und Versatz in der Einlagerungsstrecke fraglich, ob die Behälter mit den radioaktiven Abfällen durch die mittels Sprengwirkung erzeugte Druckwelle eine so große mechanische Belastung erfahren, die ihre Integrität aufhebt. Gibt es keine gesellschaftlichen Strukturen, wird auch keine sonstige Einwirkung Dritter erfolgen.

KRIEG

Die kriegerische Einwirkung erfolgt auf die Erdoberfläche oberhalb des Tiefenlagerbergwerkes.

Aufgrund des Abstands zur Erdoberfläche und der aus unterschiedlichen Schichten aufgebauten geologischen Formation ist nach kriegerischen Einwirkungen mit heute bekannten oder absehbar entwickelbaren Waffen weder durch mechanische, noch durch thermische Einwirkungen von einer relevanten Beeinträchtigung der Rückhaltefähigkeit der geologischen Barriere für Radionuklide auszugehen.

Einlagerungsstreckenverschluss und Behälter

Auf der Einlagerungssohle (Ebene, in der die Abfälle eingelagert sind) befinden sich Zugangs- und andere Strecken sowie Infrastruktur Hohlräume. Die Einlagerungsstrecken mit den Behältern sind verfüllt und mit Abschlussbauwerken versehen. Alle anderen Strecken und Hohlräume bis zu den Schächten, die Monitoringsohle und die in Richtung Einlagerungsbereich abgeteufte Bohrungen sowie die Schachtröhren sind nicht verfüllt. Das Verhalten von Einlagerungsstreckenverschluss und Behälter gegenüber schwerwiegenden übertägigen Einwirkungen wird wie folgt eingeschätzt:

FLAB

Der Absturz eines Flugzeuges vom Typ A 380 erfolgt auf einen der Schachtansatzpunkte.

Aufgrund des Abstands zur Erdoberfläche und dem aus unterschiedlichen Materialien bestehenden Versatz und Verschluss der Einlagerungsstrecken ist nach dem Absturz eines Flugzeuges (unabhängig von seiner Größe) nicht von so großen mechanischen Belastungen des Einlagerungsstreckenverschlusses und noch weniger von Behältern auszugehen, dass es zu einer relevanten Beeinträchtigung von deren Rückhaltefähigkeit kommt.

Über den Schacht kann Kerosin in das Tiefenlagerbergwerk eindringen. Eine Aussage, wieviel Kerosin unmittelbar vor einem Abschlussbauwerk einer Einlagerungsstrecke abbrennen kann oder über die Monitoringsohle in die Bohrlöcher gelangen kann, ist rein spekulativ. Auch Aussagen, ob die Bedingungen (hauptsächlich Sauerstoffangebot) für eine Entzündung des Kerosins gegeben sein können sowie ggf. wie lange mit welchen Temperaturen ein Brand möglich ist, ist mit großen Ungewissheiten behaftet.

Der Verlust der Rückhaltefähigkeit des Einlagerungsstreckenverschlusses und zusätzlich von Behältern ist nicht wahrscheinlich, aber auch nicht völlig auszuschließen.

SEWD

Die sonstige Einwirkung Dritter erfolgt an einem der Schachtansatzpunkte oder durch Eindringen in das Tiefenlagerbergwerk.

Aufgrund des Abstands zur Erdoberfläche ist davon auszugehen, dass Einwirkungen, die an der Erdoberfläche an einem der Schachtansatzpunkte erfolgen, zwar den Bergwerksbetrieb massiv beeinflussen können, aber nicht zur Aufhebung der Rückhaltefähigkeit von Einlagerungsstreckenverschluss und Behälter führen.

Täter können aber über den Schacht ein- und bis zu den Einlagerungsstreckenabschlussbauwerken vordringen oder durch die Monitoringsohle zu den Monitoringbohrungen gelangen. Dort könnten zum Beispiel Sprengmittel eingesetzt werden. Im ersten Fall würde das Abschlussbauwerk sicher zerstört. Auch eine Beeinträchtigung der Behälterintegrität und damit der Rückhaltefähigkeit für Radionuklide ist nicht auszuschließen. Letzteres gilt ebenso bei einer Nutzung der Monitoringbohrungen zum Einsatz von Sprengmitteln.

KRIEG

Die kriegerische Einwirkung erfolgt an der Erdoberfläche.

Die Auswirkungen von kriegerischen Handlungen, die gezielt auf den offenen Schacht ausgerichtet sind, sind schwer zu prognostizieren. Bei einem gezielten Einbringen mehrerer Sprengmittelwaffen in den Schacht können unter Tage Druckwellen erzeugt werden, die zum Integritätsverlust von Einlagerungsstreckenverschluss und Behältern und damit zum teilweisen Verlust der Rückhaltefähigkeit führen. Gleiches könnte durch Einbringen von großen Mengen brennender Flüssigkeiten erreicht werden, sofern für den Brand unter Tage ausreichend Sauerstoff zur Verfügung steht.

Gesamtaussage

Für das ENTRIA-Referenzmodell zur Tiefenlagerung mit Monitoring und mit Vorkehrungen zur Rückholbarkeit ist der Erhalt der Rückhaltefunktion für Radionuklide nach schwerwiegenden Einwirkungen von außen für die Barriere geologische Formation für alle drei in diesem Bericht betrachteten Szenarien gegeben. In Bezug auf schwerwiegende Einwirkungen auf den offenen Schacht oder im offenen Schacht und die nicht verschlossenen Hohlräume trifft das nicht zu. Für einen Flugzeugabsturz ist die teilweise Aufhebung der Rückhaltefunktion nicht völlig auszuschließen, für sonstige Einwirkungen Dritter nicht auszuschließen und für kriegerische Einwirkungen möglich.

8.4 Oberflächenlagerung

Die Oberflächenlagerung wurde im Kapitel 7 ausführlich behandelt und der Erhalt der Rückhaltefähigkeit bewertet. Für die beiden redundanten Barrieren Behälter und Gebäude wurde für alle in diesem Bericht betrachteten Szenarien für schwerwiegende Einwirkungen von außen der Verlust oder teilweise Verlust der Rückhaltefähigkeit festgestellt. Daraus lässt sich folgende Gesamtaussage ableiten:

Gesamtaussage

Für das ENTRIA-Referenzmodell zur Oberflächenlagerung (OL) ist die Aufhebung der Rückhaltefunktion für Radionuklide nach schwerwiegenden Einwirkungen von außen für alle drei in diesem Bericht betrachteten Szenarien gegeben.

8.5 Risikovergleich

Der hier vorgenommene Risikovergleich wird nicht auf Grundlage der Bewertungen für die einzelnen Barrieren, sondern in Bezug auf die Rückhaltefähigkeit für Radionuklide der Gesamtsysteme der ENTRIA-Referenzmodelle durchgeführt.

Für den Vergleich wird der Zeitpunkt gewählt, an dem alle hoch radioaktiven Abfälle eingelagert sind und die jeweils für die weitere Lagerung vorgesehenen Arbeiten abgeschlossen sind (Phase 2). Das bedeutet für die ENTRIA-Referenzmodelle:

- Tiefenlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (TE).
Alle Abfälle sind untertägig eingelagert und das Bergwerk ist vollständig verschlossen. Dieser Zustand bleibt bei normalem Verlauf des prognostizierten Verhaltens während der gesamten Tiefenlagerdauer erhalten.
- Tiefenlagerung mit Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (TM).
Alle Abfälle sind untertägig eingelagert und die Einlagerungsstrecken versetzt und verschlossen. Der Schacht, die Monitoringsohle mit ihren Bohrungen und die übrigen Hohlräume (Infrastruktur) auf der Einlagerungssohle sind offen und zugänglich. Dieser Zustand soll bis zu einem bestimmten Zeitpunkt erhalten bleiben. Dieser Zeitraum wird jeweils vom Wirtsgestein abhängig zwischen mehreren Jahrzehnten und wenigen 100 Jahren betragen.⁹ Treten während dieses Zeitraumes keine Probleme ein, wird das Bergwerk wie bei der Tiefenlagerung vollständig verschlossen.
- Oberflächenlagerung (OL).
Alle Abfälle sind übertägig eingelagert. Die beiden redundanten Barrieren Behälter und Gebäude sind intakt. Dieser Zustand soll über die festgelegte Lagerungsdauer von 200 Jahren erhalten bleiben. Was danach mit den Abfällen geschieht ist nicht festgelegt.

In den Kapiteln 8.2 bis 8.4 wurde das Verhalten der Barrieren gegen schwerwiegende Einwirkungen von außen für die drei ENTRIA-Referenzmodelle bewertet. Der folgende Vergleich wird hinsichtlich der Sicherheitsfunktion „Rückhaltefähigkeit für Radionuklide“ durchgeführt. Das heißt, es wird das Risiko für die Freisetzung von Radionukliden in die Umgebung bewertet. Dabei bedeutet in der Tabelle 8.5-1:

- + Rückhaltefähigkeit bleibt erhalten
- o Teilweiser Verlust der Rückhaltefunktion nicht völlig auszuschließen
- x Verlust oder teilweiser Verlust der Rückhaltefunktion ist nicht auszuschließen
- mindestens teilweiser Verlust der Rückhaltefähigkeit wahrscheinlich

⁹ Über die für die unterschiedlichen Wirtsgesteine möglichen Offenhaltungszeiträume liegen im Rahmen der ENTRIA-Forschung noch keine Aussagen vor.

	FLAB	SEWD	KRIEG
Tiefenlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit	+	+	+
Tiefenlagerung mit Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit	○	x	x
Oberflächenlagerung	-	-	-

Tabelle 8.5-1: Risikovergleich für schwerwiegende Einwirkungen von außen nach Abschluss der Einlagerung aller Abfälle bei den ENTRIA-Referenzmodellen

Der Tabelle ist als Ergebnis zu entnehmen, dass es für die ENTRIA-Referenzmodelle für die Phase nach jeweiligem Abschluss der Einlagerung hoch radioaktiver Abfälle Unterschiede hinsichtlich des Risikos für die Aufhebung der Rückhaltefähigkeit bei schwerwiegenden Einwirkungen von außen und damit der Freisetzung von Radionukliden in die Umgebung gibt.

Für die Tiefenlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (TE) ist das Risiko für die Freisetzung von Radionukliden am geringsten bzw. nicht gegeben. Die hoch radioaktiven Abfälle sind von mehreren technischen und natürlichen Barrieren umgeben die teilweise so mächtig sind, das durch die betrachteten Szenarien keine Belastungen zu erwarten sind, die zur Aufhebung der Rückhaltefähigkeit führen. Es ist somit nicht von einer Freisetzung von Radionukliden in die Biosphäre auszugehen.

Für die Tiefenlagerung mit Monitoring und mit Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (TM) ist ein Risiko gegeben. Die geologische Formation ist zwar auch hier – wie bei TE – eine Barriere, die für die Erhaltung der Rückhaltefähigkeit sorgt, wenn sie belastet wird, der offene Schacht und die offenen Hohlräume für Monitoring und Infrastruktur sowie die offenen Strecken bis zu den geschlossenen Einlagerungsstrecken sind jedoch Schwachpunkte. Hier kann zumindest für die sonstigen Einwirkungen Dritter (SEWD) und die kriegerischen Einwirkungen eine Aufhebung der Rückhaltefähigkeit nicht ausgeschlossen werden und für den Flugzeugabsturz nicht völlig ausgeschlossen werden. Es ist somit eine Freisetzung von Radionukliden in das untertägige Bergwerk und dann auch in die Biosphäre möglich.

Für die Oberflächenlagerung (OL) ist das Risiko der mindestens teilweisen Aufhebung der Rückhaltefähigkeit gegeben. Es ist somit von einer Freisetzung von Radionukliden in die Biosphäre auszugehen.

9 Ergebnis des Risikovergleichs bzgl. schwerwiegender Einwirkungen von außen in der Risikokarte

In der im Arbeitspaket „Interdisziplinäre Risikoforschung“ von ENTRIA zur optischen Darstellung der vergleichenden Risikobewertung entwickelten Risikokarte (siehe Anhang zu diesem Kapitel) werden sicherheitstechnische Risiken mit naturwissenschaftlichen, ingenieurtechnischen und gesellschaftspolitischen Ursachen berücksichtigt. Aus dem hier vorliegenden Bericht zu schwerwiegenden menschlichen Einwirkungen von außen (Teil III der vergleichenden Risikobewertung) wird in diesem Kapitel die Übertragung der Risiko-Bewertungen für die drei ENTRIA-Referenzmodelle (TE, TM, OL) in die Risikokarte beschrieben.

Die Risiken durch Strahlenbelastungen nach schwerwiegenden Einwirkungen von außen gehören zu den in (Eckhardt 2017) „kalkulierbar“ genannten Risiken. Es wäre aber methodisch sehr schwierig, die Risiken aus diesem Bericht in die Bewertungszeilen für die „kalkulierbaren Risiken“ in der Risikokarte einzubeziehen. Das Zustandekommen des Ergebnisses für die Rangfolgen in der Risikokarte würde auch zunehmend intransparenter. Außerdem wird der Bedeutung von schwerwiegenden Einwirkungen (Flugzeugabsturz, terroristische Einwirkungen und kriegerische Einwirkungen) in der öffentlichen Diskussion mit einer getrennten Ausweisung dieser Risiken in der Risikokarte besser Rechnung getragen.

Die Risikokarte ist in charakteristische Zeitabschnitte unterteilt (Eckhardt 2017):

- Jahr 0 bis ca. Jahr 10 ab Start der Entsorgungsoption
- Jahr 10 bis 30 nach Start der Entsorgungsoption
- Jahr 30 bis 55 nach Start der Entsorgungsoption
- Jahr 55 bis 90 nach Start der Entsorgungsoption
- Jahr 90 bis Jahr 200 nach Start der Entsorgungsoption
- Jahr 200 bis ca. Jahr 1'000 nach Start der Entsorgungsoption
- Jahr 1'000 bis ca. Jahr 10'000 nach Start der Entsorgungsoption
- Jahr 10'000 bis ca. 1 Mio. Jahre nach Start der Entsorgungsoption

Für die Übertragung der Ergebnisse der Gesamtrisiken für schwerwiegende Einwirkungen von außen sind die ersten sechs Zeiträume (0 – 1'000 Jahre) relevant. Die in den Tabellen 7.3-2 im Kapitel 7.3 und 8.5-1 in Kapitel 8.5 dargestellten Ergebnisse können diesen Zeiträumen allerdings nicht direkt zugeordnet werden. Diese Tabellen beziehen sich jeweils auf unterschiedliche Phasen bei der Umsetzung der ENTRIA-Referenzmodelle.

Den zeitlichen Endpunkt der Betrachtungen zu Risiken durch schwerwiegende Einwirkungen von außen stellen der Verschluss des Tiefenlagers ohne Monitoring (TE) oder der Verschluss des Tiefenlagers mit Monitoring (TM) nach der Monitoringphase sowie das geplante Ende der Oberflächenlagerung (OL) dar. Für das Tiefenlager ohne Monitoring wird hier für den Zeitpunkt des Verschlusses nach 30 bis 40 Jahren Einlagerungsdauer das Ende des Zeitraumes 55 bis 90 Jahre in der Risikokarte ausgegangen. In den Zeitraum 90 – 200 Jahre der Risikokarte fällt der Verschluss des Tiefenlagers nach dem Monitoring und am Ende dieses Zeitraumes auch die Aufhebung der Oberflächenlagerung.

Bei der nachfolgenden Angabe der Rangfolgen wird als erstes das ENTRIA-Referenzmodell mit den geringsten Risiken für schwerwiegende Einwirkungen von außen genannt. Die weitere Reihenfolge wird mit steigendem Risiko durch das Zeichen „<“ angegeben. Die Unterschiede der Risiken werden damit nicht dargestellt. Wird das Risiko für Referenzmodelle als gleich bewertet, ist mit „=“ gekennzeichnet.

0 – 10 Jahre

Die Entscheidung für die Entsorgungsoption ist gefallen. Bezüglich der mit bestrahlten Brennelementen oder HAW-Kokillen beladenen Transport- und Lagerbehälter (TLB) finden keine Veränderungen statt.

Rangfolge: Risiko (TE) = Risiko (TM) = Risiko (OL)

10 – 30 Jahre

Für die Referenzmodelle zur Tiefenlagerung wird entschieden, fünf regionale Zwischenlager zu errichten und in Betrieb zu nehmen. Für das Oberflächenlager wird parallel das Konzept entwickelt und der Standort ausgewählt sowie anschließend das Lager genehmigt, errichtet und am Ende des Zeitraumes in Betrieb genommen.

Bis zum Jahr 25 lagern alle beladenen TLB in den derzeit betriebenen Zwischenlagern. Dann erfolgen bei den beiden ENTRIA-Referenzmodellen zur Tiefenlagerung (TE, TM) der Transport und die Einlagerung in die regionalen Zwischenlager. Dies soll bis zum Ende des Zeitraums abgeschlossen sein. Beim Referenzmodell zur Oberflächenlagerung verbleiben die beladenen TLB bis zum Ende des Zeitfensters in ihren Zwischenlagern.

Die Gebäude der regionalen Zwischenlager sind sicherheitstechnisch widerstandsfähiger ausgelegt als die bisherigen Zwischenlager. Die Transporte relativieren den Vorteil des Gebäudeschutzes bei TE und TM gegenüber OL zwar, heben ihn aber nicht vollständig auf. Dies insbesondere auch deshalb, weil Flugzeugabsturz und kriegerrische Einwirkungen auf ein bewegtes Ziel weniger wahrscheinlich

wie auf eine Anlage sind. Außerdem ist das Risiko von Strahlenbelastungen aufgrund des begrenzteren Quellterms bei Transporten geringer.

Rangfolge: Risiko (TE) = Risiko (TM) < Risiko (OL)

30 – 55 Jahre

Bei den Referenzmodellen für die Tiefenlagerung befinden sich die beladenen TLB während der Einrichtung der Lager in den regionalen Zwischenlagern. Bezüglich schwerwiegender Einwirkungen von außen ist das Risiko für beide Referenzmodelle gleich.

Beim Referenzmodell für die Oberflächenlagerung werden die beladenen TLB ab Beginn der Zeitspanne über einen Zeitraum von etwa 20 Jahren aus den alten Zwischenlagern in das Oberflächenlager transportiert, dort in einer Heißen Zelle ausgeladen, gekapselt, wieder in TLB geladen und dort gelagert. Die angenommene Kapselung stellt gegenüber den regionalen Zwischenlagern eine zusätzliche Barriere dar. Andererseits werden die Brennelemente eine Zeitlang ohne die Barriere Behälter gehandhabt. Das Gebäude der Heißen Zelle ist dagegen genauso ausgelegt, wie die Lagergebäude.

Rangfolge: Risiko (TE) = Risiko (TM) < Risiko (OL)

55 – 90 Jahre

Bei den Referenzmodellen für die Tiefenlagerung befinden sich die Abfälle zunächst noch einige Jahre in den regionalen Zwischenlagern. Dann werden die TLB zu den Eingangslagern transportiert, dort puffergelagert, in die Heiße Zelle gebracht, dort sukzessive für die Endlagerung konditioniert und unter Tage eingelagert. Zwischen den beiden Referenzmodellen existiert kein Risikounterschied, da die eingesetzten Behälter und die Konditionierung für die hoch radioaktiven Abfälle bzgl. der Auswirkungen von Einwirkungen von außen gleich sind. Die Brennelemente sind über einen längeren Zeitraum in der Heißen Zelle nicht durch den Behälter geschützt.

Beim Referenzmodell Oberflächenlager befinden sich die beladenen TLB unverändert im Lager. Die Brennelemente sind zusätzlich gekapselt.

Rangfolge: Risiko (OL) < Risiko (TE) = Risiko (TM)

90 – 200 Jahre

Bei den Referenzmodellen für die Tiefenlagerung ist die Einlagerung der beladenen TLB abgeschlossen und die Einlagerungsbereiche sind verfüllt. Das Tiefenlager ohne Monitoring wird zu Beginn dieser Phase vollständig verschlossen und Einwirkungen von außen sind dann nicht mehr möglich. Das Tiefenlager mit Monitoring bleibt zwecks Monitoring mindestens den größten Teil dieses Zeitab-

schnittes offen. Durch die Offenhaltung ist der Verlust der Rückhaltefunktion zumindest für bestimmte Szenarien nicht auszuschließen.

Beim Referenzmodell Oberflächenlager wird hier angenommen, dass die hoch radioaktiven Abfälle aus dem TLB ausgeladen und inspiziert und dann in neue oder gewartete/instandgesetzte TLB eingeladen werden. Die Oberflächenlagerung wird anschließend fortgesetzt. Der Verlust der Rückhaltefunktion ist mindestens teilweise wahrscheinlich.

Rangfolge: Risiko (TE) < Risiko (TM) < Risiko (OL)

200 – 1'000 Jahre

Bei den Referenzmodellen für die Tiefenlagerung sind die untertägigen Bereiche verschlossen. Es können keine Risiken durch Einwirkungen von außen auftreten.

Beim Referenzmodell Oberflächenlager befinden sich die beladenen TLB in den ersten Zehnerjahren noch in der Oberflächenlagerung. Dann müssen sie zu einer anderen Anlage transportiert und zur weiteren Entsorgung mit ihnen und dem Inventar umgegangen werden.

Rangfolge: Risiko (TE) = Risiko (TM) < Risiko (OL)

Resümee

Über den gesamten in der Risikokarte betrachteten Zeitraum ist in Bezug auf schwerwiegende Einwirkungen von außen die Tiefenlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit das ENTRIA-Referenzmodell mit dem geringsten Risiko. An zweiter Stelle folgt die Tiefenlagerung mit Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit. Die Oberflächenlagerung ist im Zeitraum bis einige 100 Jahre mit dem höchsten Risiko verbunden. Über diesen Zeitraum hinaus ist keine Bewertung möglich, da hierfür der Verbleib der hoch radioaktiven Abfälle nicht bekannt ist. Lediglich im Zeitraum zwischen 55 und 90 Jahre hat die Oberflächenlagerung das geringste Risiko.

10 Begriffe

Barriere	Natürliche oder technische Komponente einer kerntechnischen Anlage, die vor Einwirkungen schützen oder die Freisetzung radioaktiver Stoffe verhindern bzw. verringern soll
Entsorgungsoption	Bestimmter Umgang mit radioaktiven Abfällen und deren Verbleib mit dem Ziel, Menschen und Umwelt zu schützen
Hoch radioaktive Abfälle	Abfälle, die ein hohes Radioaktivitätsinventar besitzen und deshalb Wärme entwickelnd sind. Die in der vergleichenden Risikobewertung berücksichtigten hoch radioaktiven Abfälle sind bestrahlte Brennelemente und verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente.
Interdisziplinär	Nutzung von wissenschaftlichen Ansätzen, Denkweisen und/oder Methoden unterschiedlicher Fachrichtungen (Natur- und Gesellschaftswissenschaften)
Monitoring	Beobachtung bzw. Überwachung von Zustand und Entwicklung einer Anlage und ihres Inventars
Oberflächenlager	Einrichtung zur Lagerung radioaktiver Abfälle in einem Gebäude an der Erdoberfläche für einen festgelegten Zeitraum (in diesem Bericht 200 Jahre)
Referenzmodell	Generisches Modell zur Ausgestaltung einer Entsorgungsoption
Risiko	Situation, in der ein Schaden mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eintreten oder nicht eintreten kann
Robustheit	Zuverlässigkeit und Qualität und somit Unempfindlichkeit einer Sicherheitsfunktion gegenüber den schwerwiegenden Einwirkungen von außen sowie ihre Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit
Robustheitsdefizit	Robustheitsdefizite zeigen Schwachstellen in der Robustheit von Sicherheitsfunktionen auf
Rückholbarkeit	Geplante technische Vorkehrungen zum Entfernen von radioaktiven Abfällen aus einer Anlage zur Lagerung der radioaktiven Abfälle

Sicherheitsfunktion	Sicherheitsfunktion ist in diesem Bericht eine Eigenschaft, die bei einer Komponente die Erfüllung der sicherheitsrelevanten Anforderungen gewährleistet
Sonstige Einwirkungen Dritter	In diesem Bericht sind damit terroristische Einwirkungen mittels Hohlladungsgeschossen oder anderen panzerbrechenden Waffen gemeint
Tiefenlager	Einrichtung zur Lagerung radioaktiver Abfälle in der Geosphäre mit großer Entfernung von der Biosphäre. In diesem Bericht werden die ENTRIA-Referenzmodelle Endlagerung ohne Monitoring und ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit sowie Einlagerung mit Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit als Tiefenlagerung bezeichnet

Literatur

- AtG 2016 Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz); Atomgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 26. Juli 2016 (BGBl. I S. 1843, 2930) geändert worden ist
- BAM 1982 Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM): Beurteilung behälterspezifischer Fragen der trockenen Zwischenlagerung abgebrannter Brennelemente in einem Transportbehälterlager bei Gorleben, Gutachten Az.1.02/3022, Berlin, November 1982
- Bauforum 2010 bauforumstahl e.V.: „Bemessung von Baustrukturen in Stahl- und Verbundbauweise für Anprall- und Explosionslasten“; Nr. B 502, Düsseldorf, Dezember 2010
- Becker 2017 Becker, O.: „Aktuelle Probleme und Gefahren bei deutschen Zwischenlagern für hoch-radioaktive Abfälle“; Studie im Auftrag von Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND), Oktober 2017
- BfS 1995 Bundesamt für Strahlenschutz: Aufbewahrungsgenehmigung für das Transportbehälterlager Gorleben, Az.: ET 3.3 – 2.1.1.13, Braunschweig, 02.06.1995
- BfS 2003a Bundesamt für Strahlenschutz: Genehmigung zur Aufbewahrung von Kernbrennstoffen im Standort-Zwischenlager in Gundremmingen der Kernkraftwerk Gundremmingen GmbH, Az.: GZ-V3 - 85345 10, Salzgitter, 19. Dezember 2003
- BfS 2003b Bundesamt für Strahlenschutz: Genehmigung zur Aufbewahrung von Kernbrennstoffen im Standort-Zwischenlager in Brunsbüttel der Kernkraftwerk Brunsbüttel GmbH & Co. oHG, Az.: GZ-V4 - 8544 510, Salzgitter, 28. November 2003
- BfS 2017 Bundesamt für Strahlenschutz: Dezentrale Zwischenlager – Standorte und Belegung; Stand 16.01.2017,
http://www.bfs.de/DE/themen/ne/zwischenlager/zwischenlager_node.html eingesehen am 23.01.2017
- BVerwG 2008 Bundesverwaltungsgericht: Urteil verkündet am 10. April 2008, Az.: BVerwG 7 C 39.07

EADS 2003	European Aeronautic Defence and Space Company: Website unter www.eads.net eingesehen am 10.10.2003
Eckhardt 2017	Eckhardt, A.: „Vergleichende Risikobewertung von Entsorgungsoptionen für hoch radioaktive Abfälle“; Teil I der „Vergleichenden Risikobewertung“, ENTRIA-Arbeitsbericht in Veröffentlichung, Zürich, Stand 15. November 2017
Endlagerkommission 2016	Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe gemäß § 3 Standortauswahlgesetz, Abschlussbericht, Verantwortung für die Zukunft – Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes, K-Drs. 268, 18. Juli 2016
ENTRIA 2012	Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung vom Bewertungsgrundlagen; Vorhabenbeschreibung zur Bildung einer Forschungsplattform, nth niedersächsische technische hochschule, 11.07.2012
ENTRIA 2015a	ENTRIA-Arbeitsbericht-01: Darstellung von Entsorgungsoptionen. Detlef Appel, Jürgen Kreusch und Wolfgang Neumann. Hannover 2015
ENTRIA 2015b	ENTRIA-Arbeitsbericht-03: Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und Geotechnische Aspekte für die Auslegung. Stahlmann, Joachim; Mintzlaff, Volker; Leon-Vargas, Rocio. Braunschweig, 2015
ENTRIA 2015c	Ergebnisprotokoll zur Abstimmung ENTRIA-Referenzmodelle, TP4 – VP5 – VP6 – VP7, Braunschweig, 23.06.2015
ENTRIA 2016b	Protokoll Abstimmungstreffen zum Sicherheitskonzept der Langzeitzwischenlagerung, Braunschweig, 20.04.2016
ESK 2013	Entsorgungskommission: „Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern“; Empfehlung der Entsorgungskommission, revidierte Fassung vom 10.06.2013
GRS 2010	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH: „Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen“; GRS-A-3536, erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Dezember 2010

GRS 2011a	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH: „Endlagerkonzepte - Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“; GRS-272, erstellt von DBE Technology GmbH, Dezember 2011
GÖK 2004	Gruppe Ökologie e.V. (Neumann, W; Becker, O.; Burdorf, H; Hirsch, H.; Wurzbacher, K.): „Stellungnahme zu Auswirkungen für die Kläger gegen das Standort-Zwischenlager Grafenrheinfeld bei Flugzeugabsturz und Einwirkungen Dritter auf dieses Zwischenlager“; im Auftrag von Rechtsanwalt Dr. Ulrich Kaltenegger, Hannover, April 2004 und Gruppe Ökologie e.V. (Neumann, W; Becker, O.; Burdorf, H; Hirsch, H.): Stellungnahme zu Flugzeugabsturz und Einwirkungen Dritter auf das Standort-Zwischenlager Gundremmingen; im Auftrag von FORUM Gemeinsam gegen das Zwischenlager + für eine verantwortbare Energiepolitik e.V., Hannover, September 2004
GÖK 2005	Gruppe Ökologie e.V. (Neumann, W.): Stellungnahme zu einem Flugzeugabsturz auf das Standort-Zwischenlager am KKB; Hannover, Februar 2005
Hassel & Köhler 2016	Hassel, T. und Köhler, A.: „Die Rolle des Behälterkonzeptes bei der Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen für die Optionenanalyse im ENTRIA Verbund“; ENTRIA-Fachtagung Technische Aspekte von Optionen zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe, Braunschweig, 01.-02.11.2016
Hirsch et al. 1997	Hirsch, H.; Hofer, P.; Seidelberger, E.; Kromp, W. & Kromp-Kolb, H. (Hrsg.): Extended Safety Review for Krsko NPP; Institute of Risk Research of the Academic Senate of the University of Vienna, Risk Research Report Nr. 9, Vienna, November 1997
intac 2014	<i>intac</i> - Beratung-Konzepte-Gutachten zu Technik und Umwelt GmbH (Neumann, W.): Zur Notwendigkeit von Heißen Zellen an Zwischenlagerstandorten; Studie im Auftrag von Greenpeace e.V., Hannover, Mai 2014
Köhnke 2016	Köhnke, D.: „Herausforderungen, Lösungsansätze, Sicherheits- und Dauerhaftigkeitskonzepte“; ENTRIA-Fachtagung Technische Aspekte von Optionen zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe, Braunschweig, 01.-02.11.2016

- Kreusch & Neumann 2017 Kreusch, J. und Neumann, W.: „Identifizierung von Robustheitsdefiziten für die vergleichende Bewertung von Referenzmodellen zur Tiefenlagerung - Methodik und Ergebnisdarstellung –“, Teil IV der „Vergleichenden Risikobewertung“; ENTRIA-Arbeitsbericht in Veröffentlichung, Hannover, Stand November 2017
- Neumann & Kreusch 2017 Neumann, W. und Kreusch, J.: „Qualitativer Vergleich der radiologischen Risiken während der Betriebsphase der Entsorgungsoptionen“; Teil II der „Vergleichenden Risikobewertung“, ENTRIA-Arbeitsbericht in Veröffentlichung, Hannover, Stand Oktober 2017
- Mintzlaff 2016 Mintzlaff, V.: „Gegenüberstellung unterschiedlicher Wirtsgesteine auf Grundlage des generischen Tiefenlagerkonzepts“; ENTRIA-Fachtagung Technische Aspekte von Optionen zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe, Braunschweig, 01.-02.11.2016
- Oelschläger 2017 Oelschläger, L., persönliche Mitteilung per E-Mail an *intac* GmbH am 9.02.2017
- OVG S-H 2013 Schleswig-Holsteinisches Obergerverwaltungsgericht: Urteil verkündet am 19. Juni 2013, Az.: 4 KS 3/08
- Pretzsch & Maier 2003 Pretzsch, G. und Maier, R.: „German Approach to Estimate Potential Radiological Consequences Following a Sabotage Attack against Nuclear Interim Storages“; EUROSAFE, Paris, 25. & 26. November 2003
- Reichardt 2016 Reichardt, M.: „Widerstand gegen extreme, äußere Einwirkungen“; ENTRIA-Fachtagung Technische Aspekte von Optionen zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe, Braunschweig, 01.-02.11.2016
- Reichardt 2017 Reichardt, M.: „Challenges concerning long-term resistance of interim storage facilities against extreme mechanical loads and modelling approaches“; ENTRIA-Abschlusskonferenz „Research on Radioactive Waste Management“, Braunschweig, 26.-30.09.2017
- SCEE 2005 Scientific Consulting for Energy and the Environment (Becker, O.): Studie zu den Auswirkung eines Beschusses der im Standort-Zwischenlager Brunsbüttel aufbewahrten Behälter des Typs CASTOR® V/52 mit panzerbrechenden Waffen; Hannover, Januar 2005

StrlSchV 2012	Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlung (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV) vom 20. Juli 2001, Fassung vom 24. Februar 2012, BGBl. I S. 212, 249
Thomauske 2003	Thomauske, B. (Bundesamt für Strahlenschutz): „Realization of the German Concept for Interim Storage of Spent Nuclear Fuel – Current Situation and Prospects“; WM’03 Conference; Tucson, AZ, February 23-27, 2003
TÜV 2015	TÜV Nord EnSys Hannover GmbH & Co KG und Öko-Institut e.V.: „Gutachten zur Langzeitzwischenlagerung abgebrannter Brennelemente und verglaste Abfälle“; erstellt im Auftrag der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-MAT 44, Oktober 2015
UBA 2002	Umweltbundesamt Österreich: Grenzüberschreitende UVP gemäß Art. 7 UVP-RL zum Standortzwischenlager Gundremmingen; Bericht an das Österreichische Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft sowie an die Landesregierungen von Oberösterreich, Salzburg, Tirol und Vorarlberg, Wien, Januar 2002
UIM 2004	Umweltinstitut München e.V.: „Berechnung der Strahlenbelastung nach Flugzeugabsturz und Einwirkungen Dritter auf das Standort-Zwischenlager Gundremmingen“; im Auftrag von FORUM Gemeinsam gegen das Zwischenlager + für eine verantwortbare Energiepolitik e.V., München, September 2004