



BGE TECHNOLOGY GmbH

FuE-Verbundvorhaben KoBrA

**Bericht zum Arbeitspaket 3:
Herleitung und Zusammenstellung der Anforderungen
an Endlagerbehälter für ein HAW-Endlager in den drei
potenziellen Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und
Kristallingestein**

BGE TEC 2019-18

FuE-Verbundvorhaben KoBrA

Bericht zum Arbeitspaket 3: Herleitung und Zusammenstellung der Anforderungen an Endlagerbehälter für ein HAW-Endlager in den drei potenziellen Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein

BGE TEC 2019-18

Autor(en)

BGE TEC

Ansgar Wunderlich

Wilhelm Bollingerfehr

Sabine Prignitz

BAM

Christian Herold

Teresa Orellana Pérez

Holger Völzke

Dietmar Wolff

Datum

30.09.2020

Auftraggeber

Bundesministerium für Wirtschaft und
Energie (BMWi)

Förderkennzeichen

02E11527 und 02E11537

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Vorhaben wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, vertreten durch den Projektträger Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), unter den Förderkennzeichen 02E11527 und 02E11537 gefördert und von der BGE TECHNOLOGY GmbH in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) ausgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Herleitung und Zusammenstellung generischer Behälteranforderungen	3
2.1	Vorgehensweise	3
2.2	Regulatorische Anforderungen	6
2.3	Herleitung grundlegender Anforderungen an Endlagerbehälter	6
2.3.1	Herleitung der grundlegenden Anforderungen und Funktionen	7
2.3.2	Herleitung der behälterspezifischen Nutzungsphasen von Endlagerbehältern	11
2.3.3	Ausführung von Endlagerbehältern	13
2.4	Herleitung der grundlegenden Behälteranforderungen in Abhängigkeit von den Nutzungsphasen	13
3	Mögliche Einwirkungen auf Endlagerbehälter	19
3.1	Klassifikation relevanter Einwirkungen	19
3.2	Zeitliche Ausprägung relevanter Einwirkungen auf die Behälterfunktion	22
3.2.1	Mechanische Einwirkungen	24
3.2.1.1	Mechanische Einwirkungen während der Einlagerungsphase	24
3.2.1.2	Mechanische Einwirkungen während der Rückholbarkeitsphase	25
3.2.1.3	Mechanische Einwirkungen während der Bergbarkeitsphase	25
3.2.1.4	Mechanische Einwirkungen im späten Nachbetrieb	25
3.2.2	Thermische Einwirkungen	26
3.2.2.1	Thermische Einwirkungen während der Einlagerungsphase	26
3.2.2.2	Thermische Einwirkungen in der Rückholbarkeitsphase	26
3.2.2.3	Thermische Einwirkungen in der Bergbarkeitsphase	27
3.2.2.4	Thermische Einwirkungen in der späteren Nachbetriebsphase	27
3.2.3	Radiologische Einwirkungen	27
3.2.4	Chemische und biologische Einwirkungen	28
3.2.4.1	Korrosionsprozesse	28
3.2.4.2	Materialversprödung durch Wasserstoff	30
3.2.4.3	Zersetzungsprozesse	31
4	Spezifizieren grundlegender Behälteranforderungen und -funktionen	33
4.1	Endlagerung im Wirtsgestein Steinsalz	33

4.1.1	Sicherheitskonzept für die Betriebsphase	34
4.1.2	Sicherheitskonzept für die Nachverschlussphase	35
4.1.3	Nachweiskonzept für die Nachbetriebsphase	37
4.1.4	Zeitliche Abhängigkeit der Behälteranforderungen für das Wirtsgestein Steinsalz	38
4.1.5	Endlager- und Behälterkonzepte im Steinsalz	42
4.2	Endlagerung im Wirtsgestein Tonstein	44
4.2.1	Sicherheitskonzept für die Betriebsphase	44
4.2.2	Sicherheitskonzept für die Nachverschlussphase	45
4.2.3	Nachweiskonzept beim Wirtsgestein Tonstein	46
4.2.4	Zeitliche Abhängigkeiten der Behälterfunktionen im Wirtsgestein Tonstein	46
4.2.5	Endlager- und Behälterkonzepte im Tonstein	51
4.3	Endlagerung im Wirtsgestein Kristallin	53
4.3.1	Sicherheitskonzept für die Betriebsphase	53
4.3.2	Modifiziertes KBS-3-Konzept	54
4.3.2.1	Zielsetzungen für die Nachverschlussphase	54
4.3.2.2	Nachweiskonzept für das modifizierte KBS-3-Konzept	55
4.3.2.3	Zeitliche Abhängigkeit der Behälterfunktionen für das modifizierte KBS-3-Konzept	55
4.3.3	Konzept des Multiplen ewG in Kristallin	59
4.3.3.1	Zielsetzungen für die Nachverschlussphase	59
4.3.3.2	Nachweiskonzept für den multiplen ewG	60
4.3.3.3	Zeitliche Einordnung der Behälteranforderungen für den multiplen ewG	60
4.3.4	Konzept des überlagernden ewG	62
4.3.4.1	Zielsetzungen für die Nachverschlussphase	62
4.3.4.2	Nachweiskonzept für den überlagernden ewG	63
4.3.4.3	Zeitliche Abhängigkeit der Behälterfunktionen für den überlagernden ewG	63
4.3.5	Endlager- und Behälterkonzepte für das Wirtsgestein Kristallin	67
5	Quantifizierung der Einwirkungen auf Endlagerbehälter	71
5.1	Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern im Steinsalz	71
5.1.1	Mechanische Einwirkungen	71
5.1.1.1	Statische Einwirkungen	71
5.1.1.2	Dynamische Einwirkungen	73

5.1.2	Thermische Einwirkungen	74
5.1.3	Radiologische Einwirkungen	75
5.1.3.1	Materialversprödung durch Strahlung	75
5.1.3.2	Zersetzung von Organika	75
5.1.4	Chemische Einwirkungen	76
5.1.4.1	Korrosionsprozesse	76
5.1.4.2	Materialversprödung durch Wasserstoff	78
5.2	Vertikale Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen im Steinsalz	89
5.2.1	Mechanische Einwirkungen	89
5.2.1.1	Statische Einwirkungen	89
5.2.1.2	Dynamische Einwirkungen	90
5.2.2	Thermische Einwirkungen	91
5.2.3	Radiologische Einwirkungen	91
5.2.3.1	Materialversprödung durch Strahlung	91
5.2.3.2	Zersetzung von Organika	91
5.2.4	Chemische Einwirkungen	92
5.2.4.1	Korrosionsprozesse	92
5.2.4.2	Materialversprödung durch Wasserstoff	92
5.3	Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern	101
5.3.1	Mechanische Einwirkungen	101
5.3.1.1	Statische Einwirkungen	101
5.3.1.2	Dynamische Einwirkungen	102
5.3.2	Thermische Einwirkungen	103
5.3.3	Radiologische Einwirkungen:	104
5.3.3.1	Materialversprödung durch Strahlung	104
5.3.3.2	Zersetzung von Organika	104
5.3.4	Chemische Einwirkungen	104
5.3.4.1	Korrosion	104
5.3.4.2	Materialversprödung durch Wasserstoff	104
5.4	Streckenlagerung im Tonstein	115
5.4.1	Mechanische Einwirkungen	115
5.4.1.1	Statische Einwirkungen	115
5.4.1.2	Dynamische Einwirkungen	116

5.4.2	Thermische Einwirkungen	116
5.4.3	Radiologische Einwirkungen	116
5.4.3.1	Materialversprödung durch Strahlung	116
5.4.3.2	Zersetzung von Organika	116
5.4.4	Chemische und biologische Einwirkungen	117
5.4.4.1	Korrosionsprozesse	117
5.4.4.2	Materialversprödung durch Wasserstoff	118
5.5	Bohrlochlagerung im Tonstein	129
5.5.1	Mechanische Einwirkungen	129
5.5.1.1	Statische Einwirkungen	129
5.5.1.2	Dynamische Einwirkungen	130
5.5.2	Thermische Einwirkungen	130
5.5.3	Radiologische Einwirkungen	130
5.5.3.1	Materialversprödung durch Strahlung	130
5.5.3.2	Zersetzung von Organika	130
5.5.4	Chemische und biologische Einwirkungen	131
5.5.4.1	Korrosionsprozesse	131
5.5.4.2	Materialversprödung durch Wasserstoff	131
5.6	Modifiziertes KBS-3-Konzept im Kristallin	140
5.6.1	Mechanische Einwirkungen	140
5.6.1.1	Statische Einwirkungen	140
5.6.1.2	Dynamische Einwirkungen	141
5.6.2	Thermische Einwirkungen	141
5.6.3	Radiologische Einwirkungen	141
5.6.3.1	Materialversprödung durch Strahlung	141
5.6.3.2	Zersetzung von Organika	142
5.6.4	Chemische und biologische Einwirkungen	142
5.6.4.1	Korrosionsprozesse	142
5.6.4.2	Materialversprödung durch Wasserstoff	144
5.7	Konzept multipler ewG im Kristallin	154
5.7.1	Mechanische Einwirkungen	154
5.7.1.1	Statische Einwirkungen	154
5.7.1.2	Dynamische Einwirkungen	154

5.7.2	Thermische Einwirkungen	155
5.7.3	Radiologische Einwirkungen	155
5.7.3.1	Materialversprödung durch Strahlung	155
5.7.3.2	Zersetzung von Organika	155
5.7.4	Chemische Einwirkungen	155
5.7.4.1	Korrosion	155
5.7.4.2	Materialversprödung durch Wasserstoff	156
5.8	Konzept überlagernder ewG im Kristallin	163
5.8.1	Mechanische Einwirkungen	163
5.8.1.1	Statische Einwirkungen	163
5.8.1.2	Dynamische Einwirkungen	163
5.8.2	Thermische Einwirkungen	164
5.8.3	Radiologische Einwirkungen	164
5.8.3.1	Materialversprödung durch Strahlung	164
5.8.3.2	Zersetzung von Organika	164
5.8.4	Chemische und biologische Einwirkungen	164
5.8.4.1	Korrosionsprozesse	164
5.8.4.2	Materialversprödung durch Wasserstoff	165
6	Quantifizierung der Behälterfunktionen	175
6.1	Einschluss des radioaktiven Inventars	175
6.2	Abschirmung ionisierender Strahlung	177
6.3	Kritikalitätsausschluss	178
6.4	Temperaturbeschränkung	179
6.5	Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion	181
6.6	Handhabbarkeit	182
7	Anforderungen an die Bergbarkeit bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und ihre Auswirkungen auf Behälterkonzepte	185
7.1	Begriff der Bergung	185
7.2	Anforderungen an Endlagerbehälter	187
7.3	Sicherheitstechnische Nachweisführung	193
7.4	Konsequenzen aus der Forderung nach Bergbarkeit der Behälter	197
7.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen zur Bergbarkeit	199

8	Zusammenfassung	203
9	Abkürzungsverzeichnis	205
10	Literatur	207
11	Tabellenverzeichnis	215
Anhang A:	Auszüge aus internationalen Regelwerken	221
Anhang B:	Auszüge aus nationalen Regelwerken	229

1 Einleitung und Zielsetzung

Das Ziel des Vorhabens „KoBrA“ besteht in der Zusammenstellung und Herleitung von Randbedingungen, Beanspruchungsgrößen und Anforderungen an Behälter für die Endlagerung ausgedienter Brennelemente und von radioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung. Im Standortauswahlverfahren für ein Endlager in tiefen geologischen Formationen in Deutschland werden dafür drei potenzielle Wirtsgesteine betrachtet: Steinsalz, Tonstein und kristalline Gesteinsformationen. Dementsprechend werden auch im Vorhaben „KoBrA“ Randbedingungen und Anforderungen für die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in diesen drei Wirtsgesteintypen zusammengestellt und verschiedene Behälterkonzepte in Betracht gezogen.

Das Verbundvorhaben ist in vier Arbeitspakete unterteilt, für die jeweils definierte Teilziele formuliert sind: Im ersten Arbeitspaket (AP1) wurde im Rahmen einer umfassenden Literaturrecherche der nationale und internationale Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich Behälterkonzepten und Behälteranforderungen erfasst. Dabei wurde eine umfangreiche Dokumentensammlung zusammengestellt und sortiert, die als Quellenbasis für alle weiteren Arbeiten zur Verfügung steht. Die Auswertung der gesammelten Informationen resultiert in einem Überblick über internationale Behälterentwicklungen sowie einer detaillierten Übersicht über die Behälterkonzepte und die ihnen zugrundeliegenden Anforderungskataloge aus elf fortgeschrittenen Endlagerprogrammen.

Im zweiten Arbeitspaket (AP2) wurden, aufbauend auf bisherigen Untersuchungen und Forschungsarbeiten, die geologischen und betrieblichen Randbedingungen und Beanspruchungsgrößen für Endlagerbehälter ermittelt und zusammengestellt. Grundlage hierfür waren bereits erarbeitete Endlagerkonzepte und Ergebnisse von Versuchen und Erkundungen in den drei potenziellen Wirtsgesteinen. Neben den Randbedingungen aus Geologie und Endlagerbetrieb wurde auch auf die Anforderungen aus möglichen Störfallszenarien sowie aus der für die Einlagerung und eine mögliche Rückholung erforderlichen Technik eingegangen.

Das hier vorliegende dritte Arbeitspaket (AP3) baut auf den Ergebnissen der internationalen Recherche (AP1) sowie der Zusammenstellung der Randbedingungen und Beanspruchungsgrößen für die Endlagerbehälter (AP2) auf. Die Anforderungen an die Behälter – regulatorische, betriebliche sowie solche aus der Standortgeologie und den Einwirkungen und Prozessen, denen die Behälter ausgesetzt sind – wurden hergeleitet und systematisch dargestellt. Die für das Endlagersystem zu betrachtenden Nutzungsphasen wurden aus den regulatorischen Anforderungen hergeleitet und charakterisiert. Die Einwirkungen auf die Behälter in den drei potenziellen Wirtsgesteinen sowie die sich für die Erfüllung der Sicherheitsfunktionen des Behälters als Teil des Endlagersystems ergebenden Behälterfunktionen wurden ebenfalls wirtsgesteins- und zeitphasenabhängig betrachtet. Schließlich wurden aus den Einwirkungen auf die Behälter und den Anforderungen an die Behälterfunktionen auch quantifizierbare Behälterfunktionen für alle drei potenziellen Wirtsgesteine abgeleitet.

Das vierte Arbeitspaket dient zwei Zielen: Zum einen sollen die im ersten Arbeitspaket ermittelten vorhandenen bzw. entwickelten Behälterkonzepte dahingehend untersucht werden, ob die jeweiligen Behälterfunktionen unter den im zweiten und dritten Arbeitspaket ermittelten

Randbedingungen und Einwirkungen den im dritten Arbeitspaket ermittelten Anforderungen an endlagerfähige Behälter in einem deutschen Endlager genügen. Zum anderen sollen, basierend auf den im zweiten Arbeitspaket ermittelten Randbedingungen und den im dritten Arbeitspaket hergeleiteten und zusammengestellten Anforderungen an die Endlagerbehälter, Vorschläge für mögliche generische Endlagerbehälter in den drei potenziellen Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein erarbeitet werden. Die im ersten Arbeitspaket recherchierten Behälterkonzepte, deren Entwicklungslinien und zugrundeliegende Behälteranforderungen bilden hier den Ausgangspunkt für unabhängige eigene Überlegungen und zur Skizzierung generischer Konzepte für zukünftige Endlagerbehälter.

2 Herleitung und Zusammenstellung generischer Behälteranforderungen

2.1 Vorgehensweise

Endlagerbehälter sind ein wesentlicher Bestandteil jedes Endlagersystems und des entsprechenden Mehrbarrierensystems. In Abhängigkeit vom Wirtsgestein, vom verfolgten Sicherheitskonzept und dem daraus abgeleiteten Endlagerkonzept, von den Standort- und Einlagerungsbedingungen sowie von den Eigenschaften der endzulagernden Abfälle müssen die Behälter unter Berücksichtigung geltender regulatorischer Anforderungen verschiedene Sicherheitsfunktionen übernehmen. Vom Zeitpunkt der Bereitstellung zur Endlagerung bis zum Ende des Nachweiszeitraumes müssen sie entsprechenden Anforderungen genügen. Insbesondere aufgrund der drei zu betrachtenden Wirtsgesteine, der möglichen Sicherheits- und Endlagerkonzepte sowie der spezifischen Standort- und Einlagerungsbedingungen, aber auch wegen der Diversität nationaler regulatorischer Vorgaben sind die an die Endlagerbehälter zu stellenden Anforderungen sehr vielfältig.

In Deutschland besteht mit dem Neuanfang bei der Standortauswahl für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle und mit der Vorgabe des StandAG, den Standort mit bestmöglicher Sicherheit auszuwählen und dabei alle in Betracht kommenden Wirtsgesteine zu berücksichtigen, die besondere Situation, dass für einen Standortvergleich unterschiedliche Endlager- und damit Behälterkonzepte zu entwickeln sind. Um die Vergleichbarkeit der Standorte jedoch nicht von vornherein durch die Unterschiedlichkeit postulierter Behälteranforderungen zu beeinträchtigen, erscheint es geboten, diese einer einheitlichen Systematik folgend abzuleiten.

Diesen Überlegungen folgt der gewählte und nachfolgend beschriebene Top-Down-Ansatz. Das heißt, ausgehend von geltenden regulatorischen Vorgaben werden zunächst generische (allgemeine bzw. abstrakte) Anforderungen abgeleitet und zusammengestellt, die dann für die verschiedenen Wirtsgesteine und Einlagerungskonzepte den jeweiligen Sicherheitskonzepten folgend und unter Berücksichtigung spezifischer regulatorischer Vorgaben schrittweise konkretisiert sowie spezifiziert und, soweit möglich, quantifiziert werden. Hierbei fließen auch die aus der Analyse der internationalen Endlager- und Behälterkonzepte gewonnenen Informationen ein.

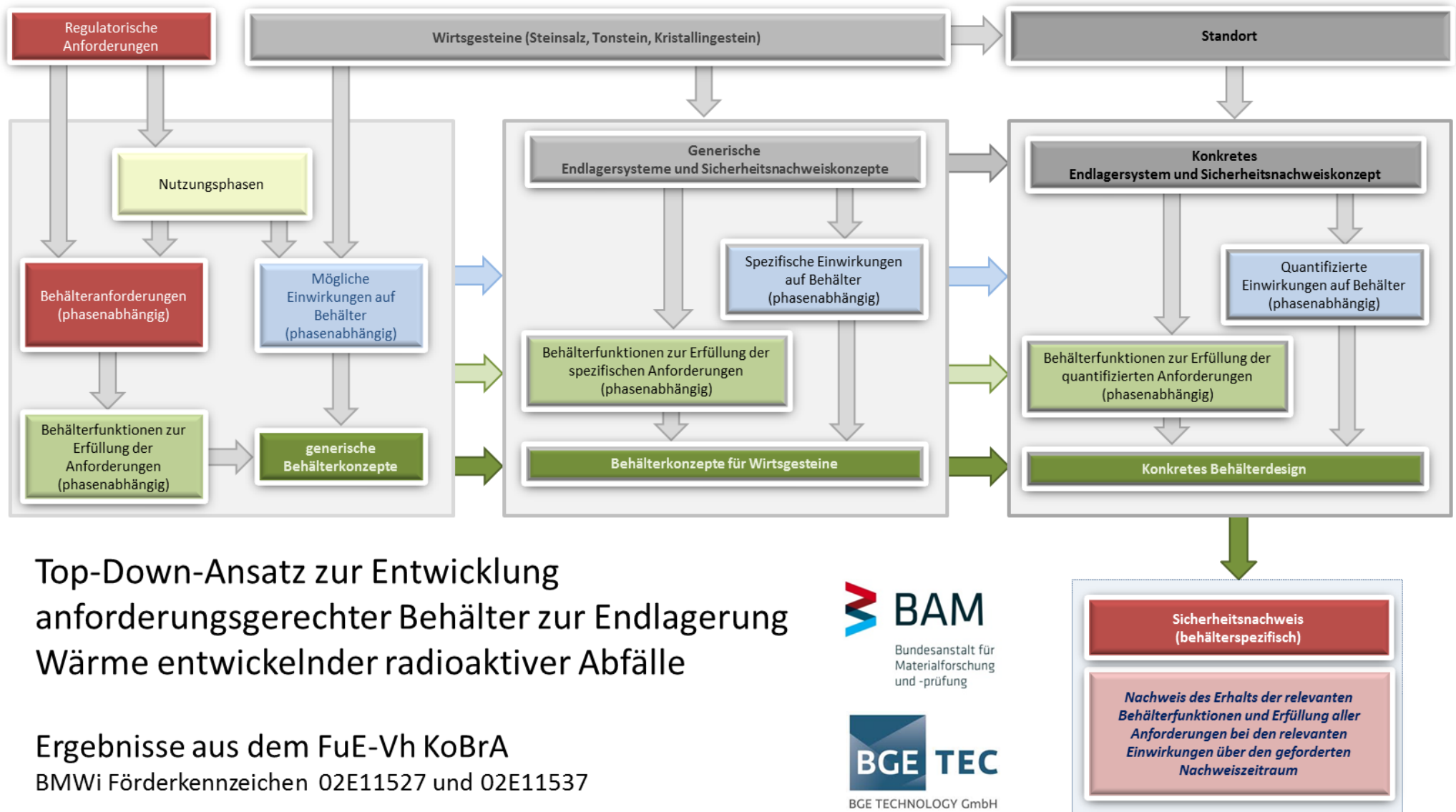
In einem ersten Schritt werden zunächst allgemeine regulatorische Vorgaben ausgewertet, um die wesentlichen Anforderungen und zu deren Erfüllung benötigter Funktionen zu ermitteln, die ein Endlagerbehälter während seines Nutzungszeitraumes erfüllen bzw. bereitstellen muss. Dabei wird der Nutzungszeitraum in einzelne Nutzungsphasen unterteilt, für die unterschiedliche Anforderungsprofile bestehen.

Im Weiteren wird ermittelt, welchen Einwirkungen der Endlagerbehälter in den verschiedenen Nutzungsphasen ausgesetzt ist und welche Funktionen erforderlich sind, um die sicherheits- und funktionstechnischen Anforderungen über den gesamten Nutzungszeitraum zu erfüllen. Diese Randbedingungen bestimmen die möglichen Behälterkonzepte (vgl. Abb. 2-1).

In einem weiteren Schritt werden die phasenabhängigen Behälteranforderungen und -funktionen für generische Endlagersysteme und zugehörige Sicherheitsnachweiskonzepte unter Berücksichtigung der spezifischen Einwirkungen zunächst qualitativ spezifiziert. Hieraus lassen sich zugehörige Behälterkonzepte für Wirtsgesteine entwickeln.

Im Rahmen der Standortauswahl lassen sich für konkrete Endlagersysteme quantifizierte Einwirkungen in Verbindung mit quantifizierten Anforderungen definieren. Die zur Erfüllung der quantifizierten Anforderungen unter Berücksichtigung der quantifizierten Einwirkungen erforderlichen Behälterfunktionen bestimmen schließlich das konkrete, für das Endlagersystem geeignete, Behälterdesign.

Im Rahmen des Sicherheitsnachweises ist letztlich der Erhalt aller relevanten Behälterfunktionen im Hinblick auf die Erfüllung der quantifizierten Anforderungen für das konkrete Endlagersystem zu zeigen. Dieser Schritt bleibt dem späteren Genehmigungsverfahren vorbehalten und ist nicht Bestandteil dieses FuE-Vorhabens.



Top-Down-Ansatz zur Entwicklung anforderungsgerechter Behälter zur Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle

Ergebnisse aus dem FuE-Vh KoBrA

BMWi Förderkennzeichen 02E11527 und 02E11537

Abbildung 1: Top-Down-Ansatz zur Entwicklung anforderungsgerechter Behälter zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle

2.2 Regulatorische Anforderungen

Anforderungen an Behälter zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle resultieren grundsätzlich aus den nationalen gesetzlichen Vorgaben sowie aus nachgeordneten nationalen und internationalen Regelwerken. Hierzu zählen insbesondere:

- Atomgesetz /AtG 2017/ und Strahlenschutzgesetz /StrlSchG 2017/ mit den zugehörigen Verordnungen
- Standortauswahlgesetz /StandAG 2017/
- Sicherheitsanforderungen des BMU an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle vom 30. September 2010 /BMU 2010/
- Entwurf der Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung – EndlSi-AnfV), Bearbeitungsstand: 06.04.2020 /BMU 2020/
- Leitlinien und Empfehlungen der Entsorgungskommission (ESK), z. B. /ESK 2017/
- Bundesberggesetz /BbergG 2017/
- Wasserhaushaltsgesetz /WHG 2017/
- Gesundheits- und Arbeitsschutz-Gesetze und -Verordnungen
- Technisches Regelwerk (z. B. KTA, DIN-EN-ISO)
- Gefahrgutbeförderungsvorschriften (ADR, RID) /UNECE 2016/
- Empfehlungen der IAEA, (z. B. /IAEA 2011a/) der EURATOM (z. B. /EURATOM 2009/) und der ICRP (z. B. /ICRP 2013/)
- Das Gemeinsame Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle (eng. *IAEA Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management*) /IAEA 1997/

Im Anhang zu diesem Bericht sind grundlegende Anforderungen aus internationalen und nationalen Regelwerken auszugsweise zusammengestellt.

Auf eine Aufführung der sicherheitstechnischen Regeln des Kerntechnischen Ausschusses (KTA) und einschlägiger Arbeitsschutzvorschriften wird an dieser Stelle verzichtet. Sie werden für die Herleitung generischer Anforderungen zunächst als entbehrlich angesehen und erst später für die Quantifizierung der Anforderungen an Endlagerbehälter bzw. der dadurch zu erfüllenden Funktionen für konkrete Endlager- und Behälterkonzepte benötigt.

2.3 Herleitung grundlegender Anforderungen an Endlagerbehälter

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Anforderungen an Endlagerbehälter hergeleitet. Basis dafür sind die vorher aufgeführten relevanten Regelwerksauszüge. Für die Belange der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland sind vor allem die *Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle* des BMU vom 30. September 2010 /BMU 2010/ maßgeblich. Diese greifen nahezu vollständig die internationalen Regelwerke auf, weshalb sie überwiegend für die Herleitung der grundlegenden Anforderungen an Endlagerbehälter in Deutschland herangezogen werden. Zum Redaktionsschluss des

vorliegenden Berichtes liegen die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle nach Überarbeitung durch das BMU als Verordnungsentwurf vor. Diese Endlagersicherheitsanforderungsverordnung /BMU 2020/ ist zu diesem Zeitpunkt aber noch nicht verabschiedet und daher noch nicht rechtskräftig. In der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung wurden im Grunde die Sicherheitsanforderungen von 2010 bestätigt und in Teilen weiter spezifiziert. Mit ihrem Inkrafttreten wird die Endlagersicherheitsanforderungsverordnung die Grundlage zur Herleitung der grundlegenden Anforderungen an Endlagerbehälter in Deutschland bilden.

2.3.1 Herleitung der grundlegenden Anforderungen und Funktionen

Aus den in Kapitel 2.2 dargestellten regulatorischen Anforderungen lassen sich die maßgeblichen Funktionen, die der Endlagerbehälter als technische Barriere erfüllen muss, herleiten. Diese grundlegenden Anforderungen werden zunächst unabhängig vom Wirtsgestein, dem Endlagerkonzept und den Nutzungszeiträumen (siehe Kapitel 2.3.2) beschrieben.

Die vier grundlegend von Endlagerbehältern zu erfüllenden Sicherheitsanforderungen lauten:

- Einschluss des radioaktiven Inventars
- Abschirmung ionisierender Strahlung
- Ausschluss von Kritikalität
- Temperaturbeschränkung der Abfallgebinde

Diese Sicherheitsanforderungen entsprechen denjenigen, die grundsätzlich auch von Transport- und Zwischenlagerbehältern zu erfüllen sind. Zu Ihrer Quantifizierung (z. B. hinsichtlich Freisetzung; Dosisleistung) sind die zugehörigen gesetzlichen und nachgeordneten Regelwerke heranzuziehen.

Neben diesen vier grundsätzlichen Sicherheitsanforderungen ist bei der Endlagerung noch die Verträglichkeit mit den weiteren Barrieren des Endlagersystems zu erfüllen. Die Integrität und Wirksamkeit weiterer Barrieren darf durch die Endlagerbehälter nicht negativ beeinflusst werden. Die Anforderung an die Verträglichkeit mit weiteren Barrieren lässt sich in folgende Unterpunkte aufteilen:

- Temperaturbeschränkung zum Schutz weiterer Barrieren
- Abschirmung ionisierender Strahlung zur Vermeidung von Barrierschäden
- Begrenzung von Korrosion oder Zersetzung von Behältermaterialien zur Vermeidung unzulässig hoher Gasdrücke

Die beiden zuerst genannten Punkte werden im Vorhaben KoBrA von den grundlegenden Sicherheitsanforderungen Temperaturbeschränkung und Abschirmung ionisierender Strahlung mit abgedeckt. Zur Vermeidung unzulässig hoher und ggfs. barriereschädigender Gasdrücke, wird zusätzlich die Anforderung „Begrenzung von Korrosion und Gasproduktion“ eingeführt.

Ebenfalls ist für die Endlagerbehälter die Handhabbarkeit zu fordern. Diese ist in dem Sinne keine Sicherheitsanforderung. Für den Endlagerbetrieb, bzw. die mögliche Rückholung oder Bergung ist sie aber unabdingbar.

Mit der Anforderung nach Einschluss des radioaktiven Inventars wird die unzulässige Freisetzung von radioaktiven Stoffen ausgeschlossen. Hierzu muss der Endlagerbehälter über entsprechende Dichtheitsfunktionen unter den zu berücksichtigenden Einwirkungen und den zu Grunde gelegten Nutzungszeiträumen verfügen. Dies schließt auch die Aufrechterhaltung der Integrität des Endlagergebindes bei zu berücksichtigenden Einwirkungen aus Betriebsstörungen und potenziellen Störfällen ein.

Im Hinblick auf einen sicheren Endlagerbetrieb ist die hinreichende Abschirmung von ionisierender Strahlung durch den Endlagerbehälter zu gewährleisten. Zur Verträglichkeit mit den weiteren Barrieren ist ebenfalls eine Abschirmwirkung zur Vermeidung von Schädigungen an weiteren technischen, geotechnischen oder geologischen Barrieren notwendig.

Von grundlegender Bedeutung für die Endlagersicherheit ist der Kritikalitätsausschluss, d. h. der Ausschluss selbsterhaltender Kettenreaktionen von Kernbrennstoffen. Um die endzulagernden ausgedienten Brennelemente unter allen zu berücksichtigenden Einwirkungen in einer unterkritischen Anordnung zu belassen, müssen die Endlagerbehälter in einer geeigneten Form beladen werden und über entsprechende Sicherheitsfunktionen und eine hinreichende Stabilität ihrer Inneneinbauten verfügen. Im Sinn einer konservativen Auslegung ist zudem die reaktivste Anordnung der Kernbrennstoffe zu betrachten.

Die Temperaturbeschränkung der Abfallgebinde ist sowohl unter betrieblichen Gesichtspunkten als auch im Hinblick auf mögliche Schädigungen der technischen, geotechnischen und geologischen Barrieren (Wirtsgestein) des Endlagers, einschließlich des Behälters und dessen Inventars, eine wesentliche Sicherheitsanforderung. Hierzu müssen die Endlagerbehälter über entsprechende Wärmeleitungsfunktionen verfügen, bzw. ist die Wärmeleistung des Inventars zu beschränken.

Neben den thermischen Einwirkungen und ionisierender Strahlung, können geologische, geotechnische und technische Barrieren auch durch schnell ansteigende, hohe Gasdrücke in ihrer Wirksamkeit beeinträchtigt werden. Gasbildung ist als Folge von Korrosions- oder Zersetzungsprozessen der Behältermaterialien möglich. Neben dem Druckaufbau stellen sich bildende Gase auch einen möglichen Transportweg für Radionuklide dar. Daher ist die Begrenzung von Korrosion und Gasproduktion eine weitere zu berücksichtigende Sicherheitsanforderung.

Zuletzt müssen Endlagerbehälter auch Anforderungen hinsichtlich ihrer Handhabbarkeit erfüllen. Die diesbezüglichen Anforderungen z. B. Abmessungen, Masse, Transportfähigkeit ergeben sich zusammen mit dem Endlagerkonzept und vor allem der geplanten Transport- und Einlagerungstechnik. Die Handhabbarkeit ist auch mit den grundlegenden Sicherheitsfunktionen wie Einschluss, Abschirmung und Temperaturbeschränkung verknüpft.

In Tabelle 2-1 sind die aus den bestehenden regulatorischen Vorgaben hergeleiteten Anforderungen und die zu ihrer Erfüllung notwendigen Funktionen, mit Verweis auf die entsprechenden Regelwerkspassagen zusammengestellt.

Tabelle 2-1: Zusammenstellung der grundlegenden Anforderungen und Funktionen eines Endlagerbehälters

Grundlegende Anforderung	Generische Behälterfunktion	Regelwerksverweise
Einschluss des radioaktiven Inventars	Verhinderung der Freisetzung radioaktiver Stoffe	/IAEA 1997/: § 4 (iv) - (vii), § 7 (i), § 11 (iv) - (vii); § 14 (i)
		/IAEA 2011a/: 2.8, 2.9, 2.17, 3.3, 3.21
		/IAEA 2011b/: 4.7, R5, R7, R8
		/ICRP 2013/: §§ 50, 53, 90
		/WENRA 2014/: DI-22, 23, 24, 26, 27, 38
		/StrlSchG 2017/: § 8
		/StandAG 2017/: §§ 23 (4), 26 (2)
		/WHG 2017/: § 48 (1) und (2)
		/BMU 2010/: Ziff. 3.1, 3.2, 7.2.3, 8.7
		/BMU 2020/: §§ 4, 6 (1)
Abschirmung ionisierender Strahlung	Begrenzung der von radioaktiven Abfällen ausgehenden ionisierenden Strahlung	/IAEA 1997/: § 4 (iv) - (vii), § 7 (i), § 11 (iv) - (vii), § 14 (i)
		/IAEA 2011a/: 2.8, 2.9, 2.10, 3.3, 3.21, 3.32, 3.33, R7, 3.35, R8, 3.39, 3.40
		/ICRP 2013/: §§ 49, 50
		/WENRA 2014/: DI-22, 23, 38, 46
		/StrlSchG 2017/: §§ 8, 9, 77, 78
Kritikalitätsausschluss	Ausschluss selbsterhaltender Kettenreaktionen von Kernbrennstoffen	/IAEA 1997/: § 4 (i), § 11 (i)
		/WENRA 2014/: DI-38
		/StandAG 2017/: § 27 (4)
		/BMU 2010/: Ziff. 2.4
		/BMU 2020/: § 8
Temperaturbeschränkung	Vermeidung thermischer Schädigung natürlicher, technischer und geotechnischer Barrieren	/IAEA 1997/: § 4 (i), § 11 (i)
		/WENRA 2014/: DI-34, 38
		/BMU 2020/: §§ 5 (4), 6 (2)
Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion	Vermeidung der Schädigung natürlicher, technischer und geotechnischer Barrieren durch hohe Gasdrücke und der Ausbildung sicherheitsgefährdender Gas-transportpfade	/IAEA 2011a/: 2.17
		/WENRA 2014/: DI-34, 38
		/BMU 2020/: §§ 5 (2), 6 (2)
Handhabbarkeit	Gewährleistung der Einlagerung der Endlagergebäude und ihrer Rückholung bzw. Bergung im Zusammenwirken mit Handhabungsgeräten	/IAEA 2011a/: 2.10
		/StandAG 2017/: §§ 1 (4), 26 (2), 26 (3)
		/BMU 2010/: Ziff. 8.6
		/BMU 2020/: §§ 13 (1), 14 (1, 2), 16 (2)

2.3.2 Herleitung der behälterspezifischen Nutzungsphasen von Endlagerbehältern

Ausgehend von den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 2010/ lässt sich der Nutzungszeitraum eines Endlagerbehälters grundsätzlich in vier Nutzungsphasen unterteilen, in denen er teilweise unterschiedliche Anforderungen erfüllen muss, verschiedenen Einwirkungen ausgesetzt sein kann und damit unterschiedliche Behälterfunktionen gewährleisten muss.

Während für die Betriebsphase des Endlagers sowohl der Zeitraum von der Bereitstellung bis zur Einlagerung als auch der Zeitraum nach Einlagerung bis zum endgültigen Verschluss der Rampen und Schächte zu betrachten ist, in dem die Rückholung des Behälters uneingeschränkt möglich sein muss, kann die Nachbetriebsphase unterteilt werden in die ersten 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers, für die eine Bergbarkeit der Endlagerbehälter gefordert wird, und in den Zeitraum danach.

Aus der Anforderung 3.40 in /IAEA 2011a/, *“The containment of the radionuclides in the waste form and the packaging over a defined period has to ensure that the majority of shorter lived radionuclides decay in situ. For low level waste, such periods would be of the order of several hundred years; for high level waste the period would be several thousands of years. For high level waste, it also has to be ensured that any migration of radionuclides outside the disposal system would occur only after the heat produced by radioactive decay has substantially decreased”*, wird darüber hinaus eine zeitlich begrenzte Einschlusswirkung des hochradioaktiven Abfalls durch die Abfallmatrix und den Behälter von mehreren Tausend Jahren gefordert. Dieser Regelungsvorschlag hat bislang keinen Eingang in die für ein deutsches Endlager entwickelten Sicherheitsanforderungen gefunden. Der genannte Zeitraum übersteigt dabei deutlich die 500 Jahre, die im Zusammenhang mit der Bergbarkeit der Behälter gefordert sind. Würde man der Forderung des IAEA-Regelwerks Rechnung tragen, so müsste die Nachbetriebsphase in insgesamt drei Phasen unterteilt werden: Bergbarkeitsphase, Zeitraum bis zum weitgehenden Zerfall der kurzlebigen Nuklide (einige tausend Jahre) sowie der Zeitraum danach. Hierbei wäre zu klären, inwieweit der Einschluss der Radionuklide über einige tausend Jahre in Abhängigkeit vom jeweiligen Endlager- und Sicherheitskonzept auch durch andere Komponenten des Endlagersystems gewährleistet werden kann. In den Sicherheitsanforderungen des BMU (siehe Ziffer 4.1 und 4.2) /BMU 2010/ wird am Konzept des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs festgehalten. Der Endlagerbehälter dient hier primär dazu, die Abfälle für die Endlagerung geordnet zu konditionieren und bis zum Zeitraum von potentieller Rückholung oder Bergung handhabbar zu halten. Der langzeitige Einschluss der hochradioaktiven Abfälle soll in Deutschland durch den auszuweisenden einschlusswirksamen Gebirgsbereich in Kombination mit den geotechnischen Verschlussbauwerken erfüllt werden. Es wird daher unterstellt, dass der maximale Nutzungszeitraum der Endlagerbehälter, zunächst auf die Bergbarkeitsphase bis zu 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers beschränkt werden kann und danach der sichere Einschluss in Abhängigkeit vom jeweiligen Endlager- und Sicherheitskonzept durch andere Komponenten des Endlagersystems, wie die geologische und die geotechnischen Barrieren gewährleistet wird. Mögliche wirtsgesteinsspezifische bzw. endlagerkonzeptabhängige Abweichungen davon werden nachfolgend in diesem Bericht adressiert.

Ausgehend von diesen Erläuterungen und den Sicherheitsanforderungen /BMU 2010/ /BMU 2020/ sind in Tabelle 2-2 die behälterspezifischen Nutzungsphasen dargestellt.

Tabelle 2-2: *Behälterspezifische Nutzungsphasen des Endlagerbehälters nach den Sicherheitsanforderungen /BMU 2010/ und /BMU 2020/*

Nutzungszeitraum	Beginn	Ende
Einlagerungsphase	Bereitstellung des Behälters zur Einlagerung	Abschluss der Einlagerung des Behälters
Rückholbarkeitsphase	Abschluss der Einlagerung des Behälters	Verschluss des Endlagers (Schächte bzw. Rampen)
Bergbarkeitsphase	Verschluss des Endlagers	500 Jahre nach Verschluss des Endlagers
Spätere Nachbetriebsphase	500 Jahre nach Verschluss des Endlagers	Ende des Nachweiszeitraumes

Ergänzend zu den Sicherheitsanforderungen hat die Entsorgungskommission sich in der Empfehlung der Entsorgungskommission „Anforderungen an Endlagergebäude zur Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle“ /ESK 2017/ mit der Herleitung von Anforderungen an Endlagergebäude beschäftigt. Dabei verwendet die Entsorgungskommission eine von Tabelle 2-2 abweichende zeitliche Einteilung, diese ist in Tabelle 2-3 dargestellt.

Tabelle 2-3: *Behälterspezifische Nutzungsphasen des Endlagerbehälters nach der ESK Empfehlung /ESK 2017/*

Nutzungsphase	Beginn	Ende
Einlagerungsphase	Bereitstellung des Behälters zur Einlagerung	Abschluss der Einlagerung des Behälters
Rückholbarkeitsphase	Abschluss der Einlagerung des Behälters	Verschluss des Endlagers (Schächte bzw. Rampen)
Bergbarkeitsphase	Verschluss des Endlagers	500 Jahre nach Verschluss des Endlagers
Übergangsphase nach ESK (Steinsalz und Tonstein)	500 Jahre nach Verschluss des Endlagers	Vollständige Übernahme der Einschlussfunktion durch das geotechnische Barrierensystem
Spätere Nachbetriebsphase	Vollständige Übernahme der Einschlussfunktion durch das geotechnische Barrierensystem	Ende des Nachweiszeitraumes

In der Empfehlung der Entsorgungskommission ist die Nachbetriebsphase ein weiteres Mal unterteilt worden. Für die Sedimentgesteine Steinsalz und Tonstein schließt sich die sogenannte Übergangsphase an. Hier trifft die Entsorgungskommission die Annahme, dass die geotechnischen Barrieren einen gewissen Zeitraum benötigen, um wirksam zu werden. Daher soll zunächst der Einschluss des radioaktiven Inventars weiter durch den Behälter gewährleistet werden. Der genaue Zeitraum des Wirksamwerdens der geotechnischen Barrieren wird von der ESK nicht genannt, es werden lediglich Abschätzungen angegeben. Auch die im Endlager zu dieser Zeit vorherrschenden Umgebungsbedingungen werden nicht weiter adressiert. Für das Vorhaben KoBrA wird daher am Prinzip des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches festgehalten, und es werden die behälterspezifischen Nutzungsphasen nach Tabelle 2-2 verwendet. Sollten Anforderungen auftreten, die zeitlich begrenzt über die Bergbarkeitsphase hinausgehen, wird dafür keine Übergangsphase eingeführt. Diese werden als Anforderungen in

der späteren Nachbetriebsphase mit entsprechender Angabe der zeitlichen Begrenzung aufgeführt.

Behälteranforderungen bzw. -funktionen, die aus Prozessen vor der Bereitstellung zur Endlagerung resultieren, z. B. aus Behälterherstellung, Beladung, potentieller weiterer Zwischenlagerung beladener Endlagerbehälter oder Transport, werden im Rahmen des Vorhabens KoBrA nicht berücksichtigt. Die hier formulierten Anforderungen beziehen sich ausschließlich auf den zur Endlagerung bereitgestellten Behälter. Sofern sich aus den genannten vorgelagerten Prozessen weitere Anforderungen an den Behälter ergeben, dürfen diese nicht im Widerspruch zu den für die Endlagerung zu erfüllenden Anforderungen stehen. Das letztlich zu entwickelnde Behälterkonzept muss dann zusätzlich um diese Anforderungen bzw. Funktionen erweitert werden und auch diese verlässlich erfüllen.

2.3.3 Ausführung von Endlagerbehältern

Bei der Ausführung von Endlagerbehältern sind nach /ESK 2017/ zwei unterschiedliche Herangehensweisen in Form integraler oder modularer Behälterkonzepte denkbar.

Bei den integralen Behälterkonzepten verfügt eine einzige technische Komponente, der Endlagerbehälter selbst, über alle Funktionen zur Erfüllung der Anforderungen. Der Endlagerbehälter stellt also gleichzeitig den Einschluss der Abfälle, die Abschirmung ionisierender Strahlung, den Kritikalitätsausschluss und die weiteren Behälterfunktionen sicher. Der in Deutschland entwickelte POLLUX® -Behälter ist ein derartiger integraler Endlagerbehälter.

Bei einem modularen Behälterkonzept wird die Erfüllung der Anforderungen von mehreren technischen Komponenten und deren funktionellem Zusammenwirken sichergestellt. Zum Beispiel ist die Verwendung eines dünnwandigen Behälters zur Aufnahme der Abfälle denkbar, der den Anforderungen des Einschlusses der radioaktiven Abfälle und des Kritikalitätsausschlusses genügt. Zur Handhabung des Behälters und zur Erfüllung der diesbezüglichen Anforderungen bzgl. der Abschirmung wird ein sog. Transferbehälter als abschirmende Umverpackung (Overpack) notwendig. Für das Konzept der Bohrlochlagerung kann die Bohrlochverrohrung als weitere technische Komponente betrachtet werden, die die entsprechende Handhabbarkeit der Behälter für Rückholung oder Bergung ermöglicht. Ein Beispiel dafür wäre ein System aus Transferbehälter, Brennstabkockille und Bohrlochverrohrung bei der vertikalen Bohrlochlagerung im Steinsalz.

2.4 Herleitung der grundlegenden Behälteranforderungen in Abhängigkeit von den Nutzungsphasen

Im nachfolgenden Abschnitt erfolgt eine Herleitung der grundlegenden Behälteranforderungen unter Berücksichtigung der einzelnen Nutzungsphasen. Hierbei wird auch betrachtet, welche daraus hergeleiteten Anforderungen in welchen Nutzungsphasen zu beachten sind und welche Behälterfunktionen während der verschiedenen Nutzungsphasen benötigt werden.

Einschluss der radioaktiven Abfälle

Der Einschluss der radioaktiven Abfälle muss aus Gründen der nuklearen und betrieblichen Sicherheit einschließlich der Handhabungssicherheit von der Bereitstellung des Endlagerbehälters zur Einlagerung bis zum Ablauf der Bergbarkeitsphase 500 Jahre nach geplantem Endlagerverschluss gewährleistet sein. Für die Bergbarkeitsphase ist der Einschluss der radioaktiven Abfälle nach den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 2010/ und /BMU 2020/ für wahrscheinliche bzw. zu erwartende Entwicklungen des Endlagers zu gewährleisten. Inwieweit auch danach in der späteren Nachbetriebsphase der sichere Einschluss durch den Behälter gewährleistet sein muss, hängt vom jeweiligen Sicherheits- und Sicherheitsnachweis-konzept ab. Zu beachten ist dabei auch, welche Rolle das Einschlussvermögen des Behälters hinsichtlich der geforderten Redundanz und Diversität der Barrieren übernehmen soll (vgl. R7 /IAEA 2011a/ und /IAEA 2011b/, DI-23 /WENRA 2014/, Ziff. 8.7 /BMU 2010/ und §§ 5 und 6 /BMU 2020/).

Abschirmung ionisierender Strahlung

Von der Bereitstellung des Endlagerbehälters bis zum Abschluss der Rückholbarkeitsphase muss eine hinreichende Abschirmung der von den radioaktiven Abfällen ausgehenden ionisierenden Strahlung zum Schutz des Betriebspersonals und der Bevölkerung sowie der Umwelt hinreichend gewährleistet sein. Gegebenenfalls kann die erforderliche Abschirmung auch im Zusammenwirken mit einem Transferbehälter oder Overpack gewährleistet werden. Inwieweit für den Bergbarkeitszeitraum in den ersten 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers die gleichen Anforderungen an die Abschirmwirkung zu stellen sind, bedarf ggf. der Präzisierung von Ziffer 8.6. in /BMU 2010/ bzw. § 14 in /BMU 2020/. Gegenwärtig bezieht sich diese Anforderung nur auf die wahrscheinlichen bzw. zu erwartenden Entwicklungen des Endlagersystems, wobei die Gründe für eine Bergungsentscheidung heute nicht eingeschätzt werden können und eine Abschirmungsfunktion der Behälter nicht explizit gefordert wird.

Darüber hinaus ist eine Begrenzung der Strahlendosis an der Behälteroberfläche auch dadurch erforderlich, dass sowohl der Behälter und seine Komponenten als auch Versatz bzw. Buffer und das Wirtsgestein vor einer Beeinträchtigung ihrer notwendigen Sicherheitsfunktionen zu bewahren sind. Mit zunehmendem Zerfall der kurzlebigen Radionuklide nimmt die Strahlung an der Behälteroberfläche ab. Mit der Zeit reduziert sich somit auch die Anforderung an die Abschirmwirkung des Behälters, sodass zu erwarten ist, dass zumindest eventuelle Degradationen der Abschirmwirkung der Behältermaterialien und -komponenten dadurch abgedeckt sind.

Kritikalitätsausschluss

Der Ausschluss einer sich selbst tragender nuklearen Kettenreaktion (Ausschluss von Kritikalität) ist eine grundlegende Anforderung, die bei Transport, Handhabung, Gebrauch und Lagerung spaltfähigen Materials stets zu erfüllen ist. Die Entstehung einer kritischen Anordnung führt zu einem Kritikalitätsstö- bzw. -unfall, verbunden mit der Abgabe großer Strahlungs- und Wärmemengen und möglichen katastrophalen Konsequenzen. Um im Endlagersystem die Unversehrtheit des Multibarrierensystems und im Gesamtkontext die Sicherheit von Mensch und Umwelt zu gewährleisten, gelten sowohl für die Endlagergebinde als auch für das Endlagersystem Anforderungen an den Kritikalitätsausschluss. Diese Anforderungen sind international einheitlich und legen einen maximalen effektiven Neutronenmultiplikationsfaktor $k_{\text{eff}} < 1$ fest

(kritisches System: $k_{\text{eff}} = 1$). In Deutschland wird zukünftig nach § 8 des vorliegenden Entwurfs der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndLSiAnfV) /BMU 2020/ ein Grenzwert von $k_{\text{eff}} < 0,95$ bis 500 Jahre nach dem Verschluss des Endlagers und $k_{\text{eff}} < 0,98$ über den gesamten weiteren Nachweiszeitraum von bis zu 1 Million Jahren nach dem Verschluss des Endlagers gelten.

Laut Endlagersicherheitsanforderungsverordnung hat die Berechnung des effektiven Neutronenmultiplikationsfaktors anhand der reaktivsten Anordnung des Kernbrennstoffs zu erfolgen. Damit ist auch der unwahrscheinliche, aber im Sinne einer konservativen Nachweisführung zu betrachtende Fall der Flutung des Endlagergebindes mit Wasser bzw. Lösung und einer entsprechenden Moderatorwirkung zu berücksichtigen. Hierbei sollte Berücksichtigung finden, dass die Einschlussfunktion durch den Behälter zumindest bis zum Abschluss der Bergbarkeitsphase gefordert ist, was die Möglichkeit eines Wasserzutritts während dieses Zeitraumes faktisch ausschließt.

Temperaturbeschränkung

Während des Einlagerungszeitraumes bestehen vorrangige Anforderungen an die Begrenzung der Temperatur an der Oberfläche des Abfallgebindes bzw. des Transferbehälters, die im Wesentlichen dem Arbeitsschutz dienen. Die gleichen Anforderungen gelten grundsätzlich auch im Falle einer Rückholung bzw. Bergung.

Neben der Temperaturbeschränkung auf Grund des Arbeitsschutzes und der Handhabbarkeit bestehen thermische Anforderungen hinsichtlich des Schutzes weiterer Barrieren. Zunächst ist die Temperatur zum Schutz von Abfallmatrix und Brennelementhüllrohren zu begrenzen. Nach der Einlagerung bestehen darüber hinaus Anforderungen hinsichtlich der Vermeidung einer thermischen Schädigung des Wirtsgesteins, des Versatzes, bzw. Buffers, die zu Beeinträchtigung oder Verlust ihrer Sicherheitsfunktion führen können.

Die Einhaltung der erforderlichen Temperaturbeschränkungen kann grundsätzlich durch eine Begrenzung der Wärmeleistung des radioaktiven Behälterinventars und durch eine ausreichende Wärmeabgabe ggf. im Zusammenwirken mit einem Transferbehälter oder Overpack gewährleistet werden.

Begrenzung von Korrosion und Gasproduktion

Die geforderte Verträglichkeit der Endlagergebinde mit den Barrieren des Endlagersystems steht in direktem Zusammenhang mit einer hinreichenden Korrosionsbeständigkeit der Behältermaterialien und einer Begrenzung der möglichen Gasentwicklung durch Korrosions-, Radiolyse- und Zersetzungsprozesse. Während der vergleichsweise kurzen Einlagerungsphase kann davon ausgegangen werden, dass Korrosions- und Gasbildungsprozesse durch Werkstoffauswahl und sorgfältige Trocknung von Behältern und Inventar weitestgehend ausgeschlossen sind. Nach der Einlagerung hingegen sind Korrosions- und Gasbildungsprozesse unter Berücksichtigung der chemischen und mikrobiologischen Umgebungsbedingungen des Wirtsgesteins einschließlich eines möglichen Zutritts wässriger Lösungen zu betrachten. Hierbei sind Korrosionsraten, die eine Gefährdung der Einschlussfunktion der Behälter darstellen, mindestens bis zum Ende des Bergbarkeitszeitraums auszuschließen. Unzulässig hohe Gasdrücke sind auch darüber hinaus weiterhin zu vermeiden.

Handhabbarkeit

Die Handhabbarkeit der Endlagergebinde muss vom Beginn der Einlagerungsphase bis zum Ende der Bergbarkeitsphase 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers gewährleistet sein, auch wenn es sich hierbei um keine originäre Sicherheitsfunktion handelt. Dabei können während der Einlagerungsphase, der Rückholungsphase und der Bergbarkeitsphase jeweils unterschiedliche Handhabungstechniken verwendet werden. Danach bestehen keine Anforderungen mehr hinsichtlich der Handhabbarkeit, da weder Handhabungen vorgesehen sind, noch ermöglicht werden sollen.

Bezieht man bei den grundlegenden Behälteranforderungen die in Kapitel 2.3.2 identifizierten Nutzungsphasen mit ein, so lässt sich ermitteln, welche Behälteranforderungen für welche Nutzungsphase von Bedeutung sind. Tabelle 2-4 fasst die diesbezüglich ermittelten Ergebnisse zusammen.

Tabelle 2-4: Überblick zur zeitlichen Abhängigkeit der grundlegenden Behälteranforderungen

Grundlegende Anforderung	Nutzungsphase			
	Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	später Nachbetrieb
Einschluss des radioaktiven Inventars	Uneingeschränkt zu gewährleisten			Abhängig vom Sicherheits- und Nachweiskonzept
Abschirmung ionisierender Strahlung	Hinreichend zu gewährleisten <i>Schutz des Personals, der Bevölkerung und der Biosphäre; ggf. im Zusammenwirken mit Transferbehälter</i>			
		Hinreichend zu gewährleisten <i>Vermeidung von sicherheitsrelevanten radiolytischen bzw. radiolytisch begünstigten Schädigungen der Barrieren</i>		
Kritikalitätsausschluss	Uneingeschränkt zu gewährleisten <i>für die reaktivste Anordnung des Kernbrennstoffs</i>			
Temperaturbeschränkung	Hinreichend zu gewährleisten <i>Gefahrlose Handhabung ggf. im Zusammenwirken mit Transferbehälter</i>			
		Hinreichend zu gewährleisten <i>Vermeidung der sicherheitsrelevanten thermischen Schädigung der Barrieren, des Wirtsgesteins und des Behälterinventars</i>		
Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion		Hinreichend zu gewährleisten <i>Vermeidung der Schädigung der Barrieren durch hohe Gasdrücke und der Ausbildung sicherheitsgefährdender Gastransportpfade</i>		
Handhabbarkeit	Hinreichend zu gewährleisten			

3 Mögliche Einwirkungen auf Endlagerbehälter

Während der verschiedenen Nutzungsphase ist das Endlagergebäude externen und internen Einwirkungen ausgesetzt. Diese beeinflussen sowohl das Verhalten des Endlagergebäudes selbst, des gesamten Endlagersystems und das Verhalten der eingesetzten Materialien. Sofern diese Einwirkungen die zur Erfüllung der Sicherheitsanforderungen zu gewährleistenden Behälterfunktionen beeinflussen, sind sie sicherheitsrelevant. Es ist daher nachzuweisen, dass das Endlagergebäude diesen Einwirkungen standhält und nötige Sicherheitsfunktionen weiterhin gewährleistet. Da die Einwirkungen den Sicherheitsfunktionen des Endlagergebäudes entgegenwirken, ist ihre möglichst genaue Kenntnis eine wesentliche Voraussetzung für die Auslegung der Schutz- und Sicherheitsfunktionen des Endlagerbehälters.

Grundlage zur Aufstellung der relevanten Einwirkungen sind die im Bericht zum Arbeitspaket 2 des Vorhabens KoBrA /BGETEC 2020/ ermittelten behälterrelevanten Randbedingungen und Beanspruchungen. Diese sind abhängig vom Wirtsgestein, dem jeweiligen technischen Endlagerkonzept, Betriebsstörungen- und Störfallanalysen sowie möglicher Rückholung und Bergung.

3.1 Klassifikation relevanter Einwirkungen

Die zur Erfüllung der Anforderungen notwendigen Behälterfunktionen werden durch vielfältige Einwirkungen auf die Behälter gefährdet. Dabei lassen sich die folgenden grundlegenden Einwirkungen unterscheiden:

Mechanische Einwirkungen beinhalten statische und dynamische Einwirkungen. Statische Einwirkungen umfassen über längere Zeiträume konstante Einwirkungen, wie isotrope und anisotrope Drücke bzw. Spannungen und mögliche Scherbeanspruchungen. Diese sind überwiegend geologischen Ursprungs, können aber auch durch Anschlaglasten bei der Handhabung erzeugt werden.

Dynamische mechanische Lasten entstehen im Zusammenhang mit der Bewegung der Endlagergebäude bei Transport- und Handhabungsvorgängen bei Einlagerung und ggf. Rückholung bzw. Bergung. Im Wesentlichen sind dies Einwirkungen, die auf Grund von Beschleunigungen, Vibrationen oder Schlägen bzw. Stößen auftreten können. Das Auftreten dieser Einwirkungen ist stark von der verwendeten Einlagerungstechnik abhängig. Weitere dynamische Einwirkungen können bei Betriebsstörungen oder Störfällen auftreten und umfassen zum Beispiel mögliche Fallszenarien bei der Handhabung oder Lasten aus Einwirkungen von außen, wie z. B. Erdbeben.

Mechanische Einwirkungen sind unmittelbar vom Endlagerkonzept, insbesondere vom Standort (Wirtsgestein, Teufe), sowie von der verwendeten Transport- und Einlagerungstechnik abhängig.

Thermische Einwirkungen basieren auf der durch die radioaktiven Zerfallsprozesse im Abfallinventar freigesetzten Wärme. Diese wird über das Endlagergebäude an die Umgebung abgegeben und bestimmt das Temperaturfeld in der Behälterumgebung. Durch erhöhte Temperaturen werden vor allem thermisch induzierte mechanische Spannungen im Endlagerbehälter selbst und dem Wirtsgestein hervorgerufen. Daneben werden Alterungsprozesse der Behälter und der sie umgebenden Komponenten durch thermische Einwirkungen beschleunigt. Schließlich beeinflusst die mit der Tiefe ansteigende Gebirgstemperatur das jeweilige Temperaturniveau und es sind störfallbedingte thermische Einwirkungen entsprechend der zu berücksichtigenden Störfallszenarien (Brand) zu betrachten.

Radiologische Einwirkungen resultieren aus dem durch die Zerfallsprozesse im Abfallinventar erzeugten Strahlungsfeld. Radiologische Einwirkungen führen abhängig von den auftretenden Strahlungsarten (vorrangig Neutronen- und Gammastrahlung) und der Dosisleistung zu materialspezifischen Schädigungsprozessen wie z. B. einer Versprödung metallischer Werkstoffe oder zur Zersetzung organischer Materialien einschließlich Radiolysegasbildung durch ionisierende Strahlung und schnelle Neutronen.

Chemische und biologische Einwirkungen umfassen sämtliche Einwirkungen, die durch das hydrochemische bzw. geochemische Milieu in der Behälterumgebung, die chemische Zusammensetzung des Endlagergebäudes und vorkommende Mikroben bzw. deren Stoffwechselprodukte hervorgerufen werden. Chemische Einwirkungen befördern vor allem die Korrosion der zumeist metallischen Behältermaterialien. Durch den bei anaerober Korrosion entstehenden Wasserstoff ist zudem eine Materialversprödung durch in das Gefüge diffundierenden Wasserstoff möglich. Organische Materialien, z. B. als Moderator verwendetes Graphit oder Kunststoffe werden sich während der langen Zeiträume der Endlagerung zersetzen. Die den chemischen Einwirkungen zu Grunde liegenden Prozesse können zudem durch thermische, radiologische und auch mechanische Einwirkungen beeinflusst werden. Dabei kann es sowohl zu einer Verstärkung der Folgen chemischer und biologischer Einwirkungen kommen, z. B. in Form von Spannungsrisskorrosion, als auch zu einer Verminderung, z. B. durch das Absterben von Mikroorganismen bei hohen Temperaturen.

In Tabelle 3-1 sind die relevanten Einwirkungen schematisch klassifiziert.

Tabelle 3-1: Klassifikation relevanter Einwirkungen auf Endlagerbehälter

Einwirkungsklasse	Art der relevanten Einwirkung		Mögliche Folgen
Mechanisch	Statisch	Gebirgsdruck Schwelldruck Wasserdruck (isotrop, anisotrop)	Werkstoff- oder Bauteilversagen; Gefährdung der Sicherheitsfunktionen
		Scherung	
		Montage, Handhabung	
	Dynamisch	Beschleunigungen, Vibrationen, Stöße aus Handhabung und Endlagerbetrieb	
		Störfallszenarien, wie z. B. Behälterabsturz	
Thermisch	Zerfallswärme der radioaktiven Abfälle		Thermische Schädigung technischer, geotechnischer und/ oder geologischer Barrieren
	Gebirgstemperatur		
	Brand		
Radiologisch	Gamma- und Neutronenstrahlung		Materialversprödung oder -zersetzung; Radiolysegasbildung
Chemisch und biologisch	Korrosive Medien freies Wasser Mikroorganismen		Korrosion Materialzersetzung Wasserstoffversprödung Spannungsrissskorrosion Gasbildung

Die genannten Einwirkungen sind in der gegebenen Auflistung generischer und qualitativer Natur. Das tatsächliche Ausmaß mechanischer, radiologischer, thermischer und chemischer Einwirkungen wird letztlich erst durch den konkreten Endlagerstandort sowie durch das zugehörige Endlagerkonzept inklusive Behälterkonzept bestimmt. Mit dem konkreten Behälterdesign und dem konkreten Endlagersystem können vorhandene Einwirkungen bzw. ihre Folgen reduziert werden (z. B. durch langzeitwirksame Barrieren gegen den Zutritt wässriger Lösungen oder die Verwendung korrosionsresistenter Materialien). Einen ersten Ansatz zu einer systematischen Quantifizierung von Einwirkungen erfolgt anhand bisheriger erstellter generischer Endlagerkonzepte im Kapitel 5 dieses Berichtes.

3.2 Zeitliche Ausprägung relevanter Einwirkungen auf die Behälterfunktion

In diesem Abschnitt werden die für den Erhalt der Behälterfunktionen relevanten Einwirkungen für die unterschiedlichen Nutzungsphasen analysiert. Dabei erfolgt die Beschreibung zunächst qualitativ und auch unabhängig von den Wirtsgesteinen. Eine wirtsgesteinsspezifische Betrachtung erfolgt später in Kapitel 5 mit der Quantifizierung der Einwirkungen.

Nach § 17 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung /BMU 2020/ sind die für die Sicherheit des Endlagersystems relevanten Anlagenzustände während der Errichtung, des Betriebs und der Stilllegung des Endlagers systematisch zu ermitteln und einzuordnen. Dabei soll nach Normalbetrieb, anomalem Betrieb, Auslegungsstörfällen und auslegungsüberschreitenden Störfällen eingeordnet werden. Für die Endlagerbehälter ergeben sich daraus planmäßige Einwirkungen aus dem Normalbetrieb, Einwirkungen aus Betriebsstörungen bzw. anormalem Betrieb, Einwirkungen aus Auslegungsstörfällen und Einwirkungen aus auslegungsüberschreitenden Ereignissen und Unfällen. Für den Normal- und Anormalbetrieb sowie für Auslegungsstörfälle ist der Behälter auszulegen, die dort vorkommenden Einwirkungen müssen durch den Behälter ausgehalten werden. Für auslegungsüberschreitende Unfälle und Ereignisse sind Maßnahmen vorzusehen, die die Auswirkungen des Ereignisses auf die Umgebung des Endlagers soweit wie möglich begrenzen. Eine Übersicht der daraus abgeleiteten Klassifizierung von Einwirkungen nach ihrem Auftreten ist in Tabelle 3-2 gegeben.

Für die nach Endlagersicherheitsanforderungsverordnung ermittelten Anlagenzustände sind im Rahmen des Sicherheitskonzeptes gestaffelte Abwehr- und Schutzmaßnahmen zu entwickeln und bei Bau des Endlagers umzusetzen. Eine genaue Einteilung der im Vorhaben KoBrA quantifizierten Einwirkungen nach diesem Schema ist nicht erfolgt. Dies ist bei Erstellung des Sicherheitskonzeptes im Rahmen der Endlagerplanung durch den Betreiber durchzuführen. Eine Zusammenfassung bisher erfolgter Betriebsstörungs- bzw. Störfallanalysen ist im Bericht zum Arbeitspaket 2 /BGETEC 2020/ zu finden.

Tabelle 3-2: Klassifizierung von Einwirkungen während verschiedener Nutzungsphasen

Im Endlagerbetrieb	Einlagerungs- und Rückholbarkeitsphase	Planmäßige Einwirkungen aus Normalbetrieb		
		Außerplanmäßige Einwirkungen	Betriebsstörungen bzw. anormaler Betrieb	
			Störfälle	Auslegungsstörfälle
				Auslegungs- überschreitende Unfälle und Ereignisse
Nach Endlagerbetrieb	Bergbarkeitsphase und späte Nachbetriebsphase	Einwirkungen durch zu erwartende Entwicklungen des Endlagers		
		Einwirkungen durch abweichende Entwicklungen des Endlagers		

Nach Endlagerbetrieb findet sich diese Unterteilung nach /BMU 2020/ in Einwirkungen durch zu erwartende oder abweichende Endlagerentwicklungen wieder. Dabei sind diejenigen Entwicklungen als zu erwartende Entwicklungen einzuordnen, wenn diese sicher oder in Regel eintreten werden. Insbesondere zu beachten sind dabei die Entwicklung der geologischen und klimatischen Situation am Endlagerstandort, sowie die Entwicklungen der geologischen, geotechnischen und technischen Barrieren des jeweiligen Endlagerkonzeptes. Weiterhin sind die Entwicklungen der einzulagernden Abfälle zu beachten.

Als abweichende Entwicklungen sind diejenigen Entwicklungen einzuordnen, die nicht zu erwarten sind, die aber hinsichtlich der geologischen und klimatischen Situation am Endlagerstandort, der technischen und geotechnischen Barrieren sowie der einzulagernden Abfälle eintreten können.

Weiterhin nennt die Endlagersicherheitsanforderungsverordnung noch hypothetische Entwicklungen und beschreibt diese als Entwicklungen, die selbst unter ungünstigen Annahmen nach menschlichem Ermessen auszuschließen sind. Deshalb wurden hypothetische Entwicklungen

und daraus resultierende Einwirkungen im Rahmen des Vorhabens KoBrA nicht weiter betrachtet.

Ebenfalls zunächst nicht betrachtet wurden Einwirkungen die auf Entwicklungen auf Grundlage zukünftiger menschlicher Aktivität, wie z. B. das unbeabsichtigte menschliche Eindringen in das verschlossene Endlager ausgelöst werden können.

3.2.1 Mechanische Einwirkungen

3.2.1.1 Mechanische Einwirkungen während der Einlagerungsphase

Die mechanischen Einwirkungen auf die Behälterfunktionen während des Einlagerungszeitraums können grundsätzlich unterschieden werden als solche vor und nach Beendigung der Einlagerung, d. h. dem Absetzen des Behälters in der Strecke, in der Kammer oder im Bohrloch.

Vor Beendigung der Einlagerung sind zunächst die üblichen Handhabungslasten maßgebend, denen der Behälter beim Transport von Über- nach Untertage, beim Transport unter Tage und beim Absetzen im Bohrloch oder in der Strecke ausgesetzt ist. Sie sind als planmäßige Einwirkungen dem ungestörten Betrieb zuzurechnen, bei dem sämtliche Behälterfunktionen uneingeschränkt gewährleistet werden müssen. Hierzu zählen insbesondere Beschleunigungen, Vibrationen und anisotrope Drücke bzw. Spannungen durch die Anschlaglasten.

Zusätzliche mechanische Einwirkungen infolge von Betriebsstörungen, die als außerplanmäßige Einwirkungen gelten, sind hauptsächlich in Form größerer negativer Beschleunigungen im Falle der abrupten Unterbrechung der Einlagerungsvorgänge zu erwarten. Während der Einwirkungen aus Betriebsstörungen sind alle Behälterfunktionen uneingeschränkt zu gewährleisten.

Bei Auslegungsstörfällen ist zu unterscheiden zwischen solchen, bei denen sämtliche Behälterfunktionen uneingeschränkt gewährleistet werden sollen und der Behälter wie geplant eingelagert werden kann, und solchen, bei denen lediglich die Begrenzung der Auswirkungen insbesondere durch Aufrechterhaltung des Einschlusses der Abfälle und die Kritikalitätssicherheit sicherzustellen ist. Während letzteren in der Regel Gebindeabstürze aus geringen Höhen, z. B. in der Strecke und der horizontale Aufprall von Transportfahrzeugen zuzurechnen sind, zählt z. B. das harte Aufsetzen des Behälters (ohne Herabsetzen der Transportgeschwindigkeit) zu ersteren.

Auslegungsüberschreitenden Einwirkungen werden die mechanischen Einwirkungen bei schweren Störfällen, insbesondere beim Absturz des Behälters aus größeren Höhen, beim Transport von über nach unter Tage sowie beim Ablassen im Bohrloch zugeordnet. Hierzu zählt auch das Herabstürzen von größeren Gesteinsbrocken oder Anlagenteilen.

Nach Beendigung der Einlagerung ist der Behälter vor allem statischen und mechanischen Einwirkungen durch den Versatz und das auflaufende Gebirge sowie Stapellasten ausgesetzt.

Gegebenenfalls ist mit Scherbeanspruchungen im Falle von Verschiebungen im Gebirge zu rechnen.

3.2.1.2 Mechanische Einwirkungen während der Rückholbarkeitsphase

Hierbei ist zu unterscheiden zwischen der oben beschriebenen fortdauernden mechanischen Beanspruchung nach Beendigung der Einlagerung und den mechanischen Beanspruchungen bei der Rückholung selbst. Zu den letztgenannten zählen grundsätzlich vergleichbare Handhabungslasten wie beim Einlagerungsbetrieb. Der wesentliche Unterschied besteht dabei darin, dass eine Beeinträchtigung der Behälterfunktionen für die Nachbetriebsphase nicht mehr ausgeschlossen werden muss.

Zusätzlich sind mechanische Einwirkungen zu berücksichtigen, die beim Freilegen und Aufnehmen des Behälters sowie dem Abtransport auftreten können. Da die Rückholbarkeit der Endlagergebinde vor der Einlagerung erprobt und demonstriert werden muss, sind spätestens dann die genauen Einwirkungen für die Behälterauslegung verfügbar.

3.2.1.3 Mechanische Einwirkungen während der Bergbarkeitsphase

Grundsätzlich ist das Fortwirken der Einwirkungen nach Einlagerung zu berücksichtigen.

Hinsichtlich der Bergung, sind wahrscheinlich mit dem Einlagerungsbetrieb vergleichbare Handhabungslasten zu berücksichtigen. Gefordert wird in /BMU 2020/ eine Handhabung ganzer Endlagergebinde. Inwieweit dabei auch außerplanmäßige Einwirkungen und Einwirkungen beim Freilegen und Aufnehmen des Behälters zu berücksichtigen sind, ergibt sich erst nach Präzisierung der Sicherheitsanforderungen. Gefordert ist die Bergbarkeit bislang für zu erwartende Entwicklungen des Endlagers.

Die genauen Mechanischen Einwirkungen bei der Bergung sind stark von der Art und Weise der Bergung und der dabei verwendeten Technik abhängig. Zum jetzigen Zeitpunkt ist eine Vorhersage über die zukünftig vorhandenen technischen Möglichkeiten nur schwer möglich.

3.2.1.4 Mechanische Einwirkungen im späten Nachbetrieb

Grundsätzlich sind die Einwirkungen auf versetzte Behälter nach der Einlagerung weiterhin zu betrachten. Während sich diese in den ersten 500 Jahren der Nachbetriebsphase noch relativ zuverlässig prognostizieren lassen, sind über längere Zeiträume ggf. verschiedene Entwicklungsmöglichkeiten mit unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten, z. B. hinsichtlich zusätzlicher Überdeckungen durch Eis, Sedimente oder Meerwasser bzw. hinsichtlich des Abtrags bestehender Überdeckungen zu betrachten. Abhängig vom Endlagerstandort sind diese den zu erwartenden oder abweichenden Entwicklungen zuzuschreiben und entsprechend in der Auslegung zu berücksichtigen. Daraus ergeben sich größere Unsicherheiten in der Prog-

nose der auf die Endlagergebäude einwirkenden mechanischen Lasten. Zusätzliche Einwirkungen können aus dem Eindringen zukünftiger Generationen in das Endlager entstehen. Da aber sowohl die Gründe als auch die Art und Weise des Eindringens heute unbekannt sind, können hieraus keine weiteren Einwirkungen abgeleitet werden.

3.2.2 Thermische Einwirkungen

3.2.2.1 Thermische Einwirkungen während der Einlagerungsphase

Grundsätzlich muss eine ausreichende Wärmeabfuhr gewährleistet werden, um die Beeinträchtigung der Behälterfunktionen und die mögliche Schädigung anderer technischer, geotechnischer und geologischer Barrieren zu vermeiden.

Während vor dem Versetzen die Wärmeabfuhr maßgeblich durch Wärmestrahlung, Konvektion und die Abwetter erfolgt, ist danach die Wärmeleitung über den Versatz, die Ausbauten oder direkt ins Wirtsgestein der einzig vorhandene Wärmetransportmechanismus. Daher wird die Temperatur im Behälternahfeld und im Behälterinneren nach der Einlagerung und dem Versatz des Einlagerungsbereiches stark ansteigen, bis ein thermisches Gleichgewicht mit der Umgebung hergestellt ist. Die sich ergebende Maximaltemperatur wird maßgeblich von den Wärmeleitungseigenschaften der den Behälter umgebenden Bereiche sowie der Überlagerung der Wärme aus mehreren Behältern beeinflusst. Nach dem Erreichen des thermischen Maximums wird das Temperaturfeld im Endlagersystem mit zunehmendem Zerfall der radioaktiven Abfälle über lange Zeiträume absinken.

Bei Betriebsstörungen während der Einlagerung ist insbesondere zu berücksichtigen, dass längere Verweildauern bei ungünstigen Bedingungen für die Wärmeabgabe, z. B. bei höheren Umgebungstemperaturen nicht zu unzulässigen Überhitzungen führen. Zu solchen Betriebsstörungen zählen grundsätzlich auch unplanmäßige längere Zeiten ohne ausreichende Bewetterung oder Versatz.

Störfälle mit erhöhten thermischen Einwirkungen sind insbesondere Brände, die auslegungskonform oder auslegungsüberschreitend sein können. Bei auslegungskonformen Störfällen sind mindestens die Kritikalitätssicherheit und der Einschluss der Abfälle zu gewährleisten.

3.2.2.2 Thermische Einwirkungen in der Rückholbarkeitsphase

Grundsätzlich ist, wie auch nach der Einlagerung, sicherzustellen, dass eine ausreichende Wärmeableitung thermische Schädigungen an den Barrieren des Endlagersystems vermeidet. Zusätzliche Wärmeeinträge können ggf. infolge der Hydratation von abbindenden Baustoffen in der Behälterumgebung zu berücksichtigen sein, während die thermische Wirkung einer beginnenden Behälterkorrosion eher als geringfügig eingeschätzt werden kann.

Im Falle der Rückholung ist vor der Freilegung der Gebinde grundsätzlich mit einer höheren Temperatur als bei der Einlagerung zu rechnen, wobei die Anforderung des Erhalts der Behälterfunktionen in den nachfolgenden Nutzungsphasen nicht mehr besteht. Nach der Freilegung ist mit einem Absinken der Behältertemperatur durch die wieder begonnene Bewetterung der Einlagerungsbereiche zu rechnen.

3.2.2.3 Thermische Einwirkungen in der Bergbarkeitsphase

Grundsätzlich ist ein Ansteigen der Temperaturen nach vollständigem Verschluss des Endlagers anzunehmen. Die Behältertemperatur wird bis zur maximalen Überlagerungstemperatur ansteigen. Danach wird die Behältertemperatur durch die abnehmende Zerfallswärmeleistung kontinuierlich abnehmen.

Während der Bergung selbst sind erhöhte Gebirgstemperaturen gegenüber dem Ausgangszustand anzunehmen. Es ist daher davon auszugehen, dass eine Abkühlung des Bereichs, in dem gerade geborgen wird, stattfinden muss. Durch Bewetterung wird daher die Gebindetemperatur absinken. In welcher Form zukünftige Generationen dieses bei ihrer Bergungsplanung berücksichtigen ist heute noch ungewiss.

3.2.2.4 Thermische Einwirkungen in der späteren Nachbetriebsphase

Durch Abklingen des radioaktiven Zerfalls wird die Zerfallswärmeleistung der Abfallgebinde kontinuierlich weiter absinken bis diese der umgebenden Gebirgstemperatur entspricht.

3.2.3 Radiologische Einwirkungen

Im Unterschied zu den anderen betrachteten Einwirkungen handelt es sich bei den radiologischen Einwirkungen um eine Einwirkung, die ausschließlich durch das im Behälter befindlichen Inventar hervorgerufen wird. Bei einem abschirmenden Behälter betreffen radiologische Einwirkungen nur den Behälter selbst, bei nicht abgeschirmten Behältern auch die weiteren Barrieren in direkter Behälterumgebung. Auf eine zeitliche Unterteilung der Behandlung der Materialversprödung von metallischen Behälterkomponenten nach den verschiedenen Nutzungsphasen des Behälters wird daher verzichtet. Zu berücksichtigen ist, dass die absorbierte Strahlungsdosis durch den Behälter mit der Zeit zunimmt. Dadurch wird auch die Anzahl der Defekte im Gefüge größer. Die dadurch hervorgerufene Versprödung nimmt daher tendenziell mit der Zeit nach Beladung des Behälters zu. Allerdings wird sich die Zunahme der Defekte im Gefüge durch Absinken der absorbierten Strahlungsdosis mit der Zeit verlangsamen.

Neben der Materialversprödung durch Strahlung ist auch die Zersetzung organischer Behältermaterialien, zum Beispiel Polymere als Neutronenmoderator, zu berücksichtigen. Hierbei können ähnliche Annahmen wie zur Materialversprödung getroffen werden. Die absorbierte Strahlung wird mit der Zeit zunehmen und damit auch die Zersetzung organischer Materialien,

bis entweder sämtliche organischen Materialien zersetzt sind oder die Strahlung soweit abgeklungen ist, dass kein Material mehr zersetzt wird. Bei der Zersetzung ist mit Gasproduktion zu rechnen, welche Gasdruck innerhalb des Endlagergebindes erzeugen kann.

Weiterhin ist mit Radiolyse, hervorgerufen durch die ionisierende Strahlung, zu rechnen. Durch Radiolyse ist sowohl die Bildung von Gasen und damit die Entstehung von Gasdruck als auch eine Veränderung des Umgebungsschemismus möglich. Dadurch kann vor allem die Korrosion metallischer Behältermaterialien verstärkt werden.

Bei hinreichend abschirmenden Behältern sind negative Auswirkungen der ionisierenden Strahlung auf die direkte Behälterumgebung nicht zu erwarten.

3.2.4 Chemische und biologische Einwirkungen

Chemische und biologische Einwirkungen ergeben sich aus der Umgebung der Behälter. Durch Vorhandensein oder Zutritt von korrosiven Medien oder Lösungen bzw. freiem Wasser können Korrosionsprozesse der Behältermaterialien entstehen. Durch Besiedlung der Behälterumgebung mit Mikroorganismen können ebenfalls Korrosions- oder auch Zersetzungsprozesse in Gang gesetzt werden. Zersetzungsprozesse von organischen Behältermaterialien können auch durch ionisierende Strahlung und thermische Einwirkungen ausgelöst werden. Durch Korrosions- oder Zersetzungsprozesse sowie Radiolyse kann Wasserstoff freiwerden, der eine Wasserstoffversprödung metallischer Behältermaterialien auslösen kann. Im Gegensatz zu den anderen Prozessen werden nachfolgend nicht die Einwirkungen in den einzelnen Nutzungsphasen beschrieben, sondern die dadurch ausgelösten Prozesse, da diese für die Bewertung von bestehenden und die Erstellung neuer Behälterkonzepte relevant sein können.

3.2.4.1 Korrosionsprozesse

3.2.4.1.1 Korrosionsprozesse in der Einlagerungsphase

Durch die Umgebungsbedingungen ist grundsätzlich mit Korrosion der Behältermaterialien zu rechnen. Dabei wird angenommen, dass im kurzen Zeitraum der Einlagerung bis zum Versetzen der Behälter Korrosionsprozesse vernachlässigt werden können. Erst nach Versetzen des Behälters wird durch Korrosionsprozesse ein Abtrag der Behältermaterialien beginnen können. Zunächst wird durch aerobe Korrosion der ebenfalls eingeschlossene Sauerstoff verbraucht werden, ehe der Korrosionsprozess auf anaerobe Korrosion übergeht. Wie stark die Korrosion ausfällt ist abhängig von der geochemischen Umgebung des Wirtsgesteins, dem Lösungsangebot und vor allem dem verwendeten Behältermaterial. Durch eine angepasste Werkstoffauswahl und Korrosionsschutzmaßnahmen kann die Korrosion soweit verringert werden, dass in der Einlagerungsphase keine nennenswerte Korrosion auftreten sollte.

Korrosionsprozesse im Inneren der Behälter sind durch ausreichende Trocknung des Inventars zu verhindern.

Neben aeroben und anaeroben Korrosionsprozessen sind auch mikrobiell ausgelöste oder verstärkte Korrosionsprozesse zu beachten. Für die Einlagerungsphase wird davon ausgegangen, dass vor Einlagerung des Behälters mikrobielle Korrosion noch keine Auswirkungen auf den Behälter hat. Nach Versetzen des Behälters ist mikrobielle Korrosion durch Kontakt des Behälters mit den Umgebungsbedingungen des Endlagers grundsätzlich möglich. Auf Grund der kurzen Zeitdauer der Einlagerungsphase wird hier noch nicht mit relevanter Korrosion gerechnet. Inwiefern bei der Einlagerung Mikroben oder Mikroorganismen ins Endlager eingetragen werden, die in späteren Nutzungsphasen zu relevanter Korrosion führen können, kann momentan noch nicht abgeschätzt werden.

3.2.4.1.2 Korrosionsprozesse in der Rückholbarkeitsphase

Wie oben beschrieben ist sowohl aerobe als auch die anaerobe Korrosion der Behälter- und Abfallmaterialien, durch Feuchtigkeit im und außerhalb des Behälters, insbesondere im Falle von Lösungszutritt zu berücksichtigen. Bei geeigneter Werkstoffauswahl kann die bis zur Rückholbarkeitsphase aufgetretene Korrosion als gering abgeschätzt werden. Für den Zeitraum bis zur spätestmöglichen Rückholung wird der Abtrag vom Behältermaterial weiter zunehmen.

Es wird weiterhin angenommen, dass die Korrosion als gleichmäßiger, flächenmäßiger Abtrag auftritt. Nur dann lassen sich belastbare Vorhersagen über die Korrosion in den langen Zeiträumen treffen. Lokale Korrosionseffekte, z. B. Lochfraß, müssen durch eine angepasste Werkstoffauswahl ausgeschlossen werden.

In der Umgebung eines eingelagerten und versetzten Behälters ist grundsätzlich mit mikrobieller Besiedlung zu rechnen. Diese Mikroorganismen können die Korrosivität der Umgebung verändern, Abtragsraten vervielfachen und auch zu lokalen Korrosionseffekten führen. Das Auftreten von mikrobieller Korrosion ist auch von der Temperatur an der Behälteroberfläche abhängig. Bei sehr hohen Temperaturen kann von einer Sterilisation der direkten Umgebung ausgegangen werden, geringere Temperaturen können im Gegenzug das Wachstum mikrobieller Populationen in Behälternähe begünstigen. Die dazu relevanten Temperaturen und die Auswirkungen davon sind noch zu ermitteln.

Während der Rückholung selbst wird durch Freilegung der Behälter wieder Sauerstoff für aerobe Korrosion zur Verfügung stehen. Durch die geringe Dauer zwischen Freilegung und Abtransport der Behälter wird die dadurch auftretende Korrosion jedoch als vernachlässigbar eingeschätzt.

3.2.4.1.3 Korrosionsprozesse in der Bergbarkeitsphase

Der Abtrag von Behältermaterial wird über die 500 Jahre der Bergbarkeitsphase weiter zunehmen. Durch sich auf der Behälteroberfläche ablagernde Korrosionsprodukte werden die Abtragsraten wahrscheinlich abnehmen. Allerdings kann sich über den Zeitraum der Bergbarkeitsphase das geochemische Umfeld der Endlagerbehälter insbesondere in nichtsalinaren

Wirtsgesteinen verändern. Grundsätzlich gelten aber die bereits genannten Bedingungen für versetzte Behälter weiter fort. Bei Auftreten von mikrobieller Korrosion ist auch hier von einem weiter zunehmenden Abtrag auszugehen, dieser wird wahrscheinlich höher ausfallen als der Abtrag durch anaerobe Korrosion.

Es ist davon auszugehen, dass bei der Bergung wieder Sauerstoff für aerobe Korrosion zur Verfügung steht. Dadurch kann es wieder zu aeroben Korrosionsprozessen kommen. Durch die geringe Dauer zwischen Freilegung und Abtransport der Behälter wird die dadurch auftretende Korrosion jedoch als vernachlässigbar eingeschätzt.

3.2.4.1.4 Korrosionsprozesse in der späteren Nachbetriebsphase

Grundsätzlich gelten ähnliche Randbedingungen für die versetzten Behälter fort. Jedoch nehmen die Ungewissheiten bzgl. eines potenziellen Lösungszutritts und des geochemischen Milieus zu. Es ist anzunehmen, dass der Abtrag durch anaerobe und mikrobielle Korrosion an den Endlagerbehältern weiter zunimmt.

3.2.4.2 Materialversprödung durch Wasserstoff

3.2.4.2.1 Materialversprödung durch Wasserstoff während der Einlagerungsphase

Während der Einlagerung selbst wird zunächst von aerober Korrosion ohne Wasserstoffproduktion ausgegangen. Daher ist zunächst nicht mit einer Wasserstoffversprödung der Behälter zu rechnen. Denkbar ist hier nur eine Vorschädigung der Endlagerbehälter durch Wasserstoffversprödung während der Fertigung. Diese muss mit geeigneten Maßnahmen ausgeschlossen werden.

Nach Versetzen der Behälter ist anaerobe Korrosion mit Wasserstoffproduktion grundsätzlich möglich. Es wird allerdings angenommen, dass die Wasserstoffbildungsraten für die Einlagerungsphase so gering sind, dass Wasserstoffversprödung zu diesem Zeitpunkt noch vernachlässigbar ist.

3.2.4.2.2 Materialversprödung durch Wasserstoff während der Rückholbarkeitsphase

Durch anaerobe Korrosion ist grundsätzlich Wasserstoff in der Behälterumgebung vorhanden. Dieser kann potentiell in das Gefüge eindringen und dort für Schädigungen sorgen. Da die Versatzkompaktion noch abläuft und die restlichen Bereiche des Endlagers noch bewettert werden, wird angenommen, dass noch kein Druckaufbau durch Wasserstoffgas und keine Versprödung erfolgt.

Nach Freilegen des Behälters zur Rückholung gibt es keine Möglichkeit für weitere Wasserstoffversprödung mehr. Der anaerobe Korrosionsprozess wird zum Erliegen kommen und Wasserstoffgas mit den Abwettern aus dem Bergwerk getragen werden.

3.2.4.2.3 Materialversprödung durch Wasserstoff während der Bergbarkeitsphase

Grundsätzlich gelten ähnliche Randbedingungen wie im Rückholbarkeitszeitraum weiter fort. Die anaeroben Korrosionsprozesse laufen weiter ab und die Wasserstoffkonzentration in Behälterumgebung nimmt zu. Durch den Verschluss des Endlagers, die Kompaktion des Versatzes und die nicht mehr stattfindende Bewetterung kann es zur Bildung von Gasdruck in Behälternahe kommen. Daher ist es denkbar, dass Materialversprödung durch Wasserstoff auftritt.

Nach Freilegung der Endlagergebinde zur Bergung wird keine Wasserstoffversprödung stattfinden. Durch die wieder aufgenommene Bewetterung des Bergwerks wird der Korrosionsprozess zu aerober Korrosion wechseln und Wasserstoffgas wird durch die Bewetterung ausgetragen werden.

3.2.4.2.4 Materialversprödung durch Wasserstoff in der späteren Nachbetriebsphase

Grundsätzlich gelten die gleichen Bedingungen für versetzte Behälter fort. Da die Ungewissheiten bezüglich Lösungszutritt und Korrosion zunehmen, werden auch die Unsicherheiten bezüglich des Auftretens von Wasserstoffversprödung größer. Es ist anzunehmen, dass anaerobe Korrosionsprozesse Wasserstoff produzieren und im verschlossenen Endlager ein Gasdruck entsteht. Es ist daher möglich, dass eine Wasserstoffversprödung der Behälter auftritt.

3.2.4.3 Zersetzungsprozesse

3.2.4.3.1 Zersetzungsprozesse während des Einlagerungszeitraums

Mit den Behältern in das Endlager eingebrachte organische Materialien, z. B. Moderatormaterial, Beschichtungen oder Lackierungen des Behälters, werden sich im Laufe der Zeit zersetzen. Zersetzung kann chemische, radiologische, thermische oder mikrobielle Ursachen haben. Bei chemischer Zersetzung erfolgt eine Reaktion mit dem umgebenden chemischen Milieu. Durch die radioaktive Strahlung kann zusätzlich die Zersetzung gefördert werden, und es kommt zum Beispiel zu Eigenschaftsveränderungen bei Kunststoffen durch Aufspaltung der Kohlenwasserstoffketten. Oberhalb spezifischer Temperaturen ist eine Aufspaltung organischer Stoffe möglich. Zudem bieten organische Stoffe die Möglichkeit als Nahrungsquelle für Mikroorganismen zu dienen und werden dementsprechend durch diese zersetzt. Zersetzungsprozesse können grundsätzlich mit der Beladung der Behälter beginnen.

Während des Einlagerungsprozesses selbst wird allerdings keine Zersetzung organischer Behältermaterialien angenommen. Innenliegende Moderatormaterialien sind durch die bestehende Dichtheit des Behälters vor dem Zugriff von Mikroorganismen und chemisch reaktiver Umgebung geschützt. Durch die Temperaturbeschränkung auf Grund des Arbeitsschutzes werden die notwendigen Temperaturen für die thermische Zersetzung nicht erreicht. Auch die

Grenzwerte für die Zersetzung durch radioaktive Strahlung werden im Zeitraum nach Beladung noch nicht erreicht werden.

3.2.4.3.2 Zersetzungsprozesse in der Rückholbarkeitsphase

Nach Versetzen des Behälters steigt die Temperatur der Endlagergebinde an. Hier ist zu prüfen, ob thermische Zersetzung der organischen Materialien bei den entsprechend begrenzten Temperaturen möglich ist. Über die Zeit wird die akkumulierte Strahlendosis ansteigen und begünstigt damit Eigenschaftsänderungen bzw. Zersetzung organischer Materialien. Bei Vorhandensein von Mikroorganismen können diese zudem mit der Zersetzung von organischem Material beginnen.

Im Zeitraum der Rückholbarkeit ist von bestehender Integrität und Dichtheit der Endlagergebinde auszugehen. Innenliegende organische Materialien stehen daher nicht in Kontakt mit dem geochemischen Zustand außerhalb des Behälters oder mit Mikroorganismen, diese Arten der Zersetzung sind hier nicht zu erwarten. Thermische und radiologische Zersetzung ist auf Grund der zu erwartenden Temperaturen bzw. Strahlungsdosis nur geringfügig zu erwarten.

Sollte die Außenseite der Behälter mit organischen Stoffen lackiert oder beschichtet sein, ist eine Zersetzung dieser denkbar.

3.2.4.3.3 Zersetzungsprozesse in der Bergbarkeitsphase

In der Bergbarkeitsphase ist die grundsätzliche Integrität und Dichtheit der Endlagergebinde weiterhin anzunehmen. Daher sind innenliegende organische Materialien für chemische und mikrobielle Zersetzung weiter unzugänglich. Thermische Zersetzung ist auf Grund der zu erwartenden zulässigen Gebirgstemperatur weiterhin nur geringfügig zu erwarten. Die akkumulierte Strahlendosis der organischen Materialien steigt weiter an und führt ab Überschreitung der Grenzwerte zu Eigenschaftsveränderungen bzw. Zersetzung.

3.2.4.3.4 Zersetzungsprozesse in der späteren Nachbetriebsphase

In der späteren Nachbetriebsphase ist mit einem weiteren Voranschreiten der Zersetzung von organischen Behältermaterialien und der zugehörigen Gasproduktion zu rechnen. Zersetzungsprozesse werden fortschreiten, bis entsprechende organische Materialien aufgebraucht sind.

4 Spezifizieren grundlegender Behälteranforderungen und -funktionen

Nachfolgend werden die in den vorausgegangenen Abschnitten zugrunde gelegten Behälteranforderungen und Behälterfunktionen unter Berücksichtigung der spezifischen Einwirkungen für die verschiedenen Nutzungsphasen anhand der wirtsgesteinsspezifischen Sicherheits- und Nachweiskonzepte der bisher in Deutschland betrachteten Endlagerkonzepte spezifiziert. Dies zielt darauf ab, eine erste Übersicht wirtsgesteinsspezifischer Behälteranforderungen zu erstellen. Grundlage dafür sind die im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben erstellten Sicherheits- und Nachweiskonzepte und Machbarkeitsstudien. Dazu werden zunächst die jeweiligen behälterrelevanten Aspekte der bisherigen Sicherheits- und Nachweiskonzepte zusammengefasst und die zugrunde gelegten Behälteranforderungen unter Berücksichtigung der spezifischen Einwirkungen für die betrachteten Nutzungsphasen herausgearbeitet. Anschließend erfolgt die zeitliche Einteilung der Behälteranforderungen nach den ermittelten Nutzungsphasen der Endlagerbehälter bei der Endlagerung. Die Betrachtungen erfolgen zunächst qualitativ. Abschließend erfolgt in diesem Kapitel eine kurze Erläuterung der im jeweiligen Wirtsgestein geplanten und im Rahmen von Machbarkeitsstudien gewählten Endlager- und Behälterkonzepte. Für weitergehende Details und Erläuterungen wird ergänzend auf den Bericht zum Arbeitspaket 2 /BGETEC 2020/ dieses Vorhabens verwiesen.

Die nachfolgenden Spezifizierungen grundlegender Behälteranforderungen und Behälterfunktionen für das jeweils betrachtete Wirtsgestein sind als Beispiele für den mit dem Top-Down Ansatz erstellten Ablauf der Endlagerbehälterentwicklung zu verstehen. Im Rahmen des Standortauswahlverfahrens sind die Sicherheits- und Nachweiskonzepte entsprechend zu überarbeiten bzw. neu zu erstellen. Dies gilt auch für die Entwicklung der jeweils zugehörigen Endlagerbehälter.

4.1 Endlagerung im Wirtsgestein Steinsalz

Im Folgenden werden die grundlegenden Anforderungen an Endlagerbehälter für die Endlagerung im Wirtsgestein Steinsalz spezifiziert. Grundlage dafür ist das innerhalb der Vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) erstellte Sicherheits- und Nachweiskonzept. Dieses wurde den beiden Berichten zum Arbeitspaket 4 der VSG /GRS 2011a/ und /GRS 2012a/ entnommen. Die genannten Sicherheits- und Nachweiskonzepte wurden vor der Veröffentlichung der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung erstellt. Der Wortlaut wurde entsprechend den Vorgaben der Endlagersicherheitsanforderungsverordnungen angepasst.

4.1.1 Sicherheitskonzept für die Betriebsphase

Zunächst werden die Zielsetzungen des Sicherheitskonzeptes für die Betriebsphase zusammengefasst /GRS 2011a/ und daran die generischen Behälteranforderungen für das Wirtsgestein Steinsalz spezifiziert. Zur Betriebsphase eines Endlagers zählen die Zeiträume der Einlagerungsphase und der Rückholbarkeitsphase bis zum Verschluss der Zugänge. Im Falle einer späteren Bergung der Endlagergebinde ist zu klären, ob Anforderungen aus dem Endlagerbetrieb auch bei der Bergung weiter Gültigkeit besitzen.

1. Zur Handhabung in der Betriebsphase des Endlagers werden die Abfälle in Endlagerbehältern dicht eingeschlossen. Die Endlagerbehälter sind als technische Barrieren so auszulegen, dass Betriebsstörungen zu keiner Freisetzung von Radionukliden führen. Für die Endlagerbehälter lassen sich hieraus die Anforderungen Einschluss des radioaktiven Inventars und Handhabbarkeit während der Einlagerung ableiten. Diese sind nicht nur im Normalbetrieb, sondern auch bei Betriebsstörungen weiter zu gewährleisten.
2. Die Endlagerbehälter und gegebenenfalls Transferbehälter müssen ionisierende Strahlung abschirmen und einen sicheren Endlagerbetrieb, sowie die Behebung von Betriebsstörungen oder Störfällen am Transport- und Einlagerungssystem, ermöglichen. Abgeleitet wird hier die Anforderung der Abschirmung von ionisierender Strahlung. Diese ist zur Sicherstellung des Endlagerbetriebs durch den Endlagerbehälter selbst oder konzeptabhängig durch weitere Komponenten zu gewährleisten. Nach dem Versetzen werden die Einlagerungsorte durch den Versatz abgeschirmt, sodass aus radiologischen Gesichtspunkten ein uneingeschränkter Betrieb ermöglicht wird.
3. Bis zum Verschluss des Endlagers muss die Rückholung der Abfälle möglich sein, dazu sind Transport- und Lagermöglichkeiten einzuplanen. Für die Rückholbarkeitsphase sind durch den Behälter daher die folgenden Anforderungen zu erfüllen: Die Endlagerbehälter müssen das radioaktive Inventar weiterhin einschließen, zudem muss die Handhabbarkeit der Behälter gewährleistet sein. Die Abschirmung der ionisierenden Strahlung ist ebenfalls für den Rückholungsbetrieb zu gewährleisten, ggfs. durch die Verwendung weiterer technischer Hilfsmittel.
4. Für zu erwartende Entwicklungen des Endlagersystems sollen die Behälter für einen Zeitraum von bis zu 500 Jahren nach dem Verschluss des Endlagers geborgen werden können. Zur Bergung muss die Handhabung der Behälter möglich sein, eine Freisetzung radioaktiver Aerosole ist zu vermeiden. Die Behälter sind entsprechend auszulegen und einzulagern. Der Gebirgsdruck sowie die in der Umgebung herrschenden chemischen Verhältnisse sind zu berücksichtigen. Für den Zeitraum der Bergbarkeit können folgende Anforderungen abgeleitet werden: Die Endlagerbehälter müssen weiterhin den Einschluss des radioaktiven Inventars gewährleisten, zur Bergung müssen die Behälter außerdem handhabbar sein. Die Abschirmung der ionisierenden Strahlung ist für den sicheren Bergungsbetrieb ebenfalls durch den Endlagerbehälter und ggfs. verwendete technische Hilfsmittel sicherzustellen.
5. Die Unterkritikalität ist durch entsprechende Auslegung und Beladung der Behälter mit den Abfällen stets zu gewährleisten. Dies entspricht der Anforderung des Kritikalitätsausschlusses.

6. Die Temperaturentwicklung der Endlagerbehälter ist so auszulegen, dass die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht verletzt wird. Die Oberflächentemperatur der Behälter wird durch Maßnahmen wie die Beladungsdichte oder geeignete Zwischenlagerzeit begrenzt. Die zugelassene Temperatur gewährleistet, dass die Integrität nicht durch chemische, mineralogische oder geomechanische Veränderungen gefährdet wird. Für den Endlagerbehälter ergibt sich daraus eine Anforderung hinsichtlich der Temperaturbeschränkung. Eine weitere Beschränkung der Oberflächentemperatur ist zudem für den Endlagerbetrieb und die Handhabung der Endlagerbehälter notwendig.
7. Störfälle, die wahrscheinlich eintreten, müssen bei der Planung und Auslegung des Endlagers berücksichtigt werden. Dadurch können bereits frühzeitig Maßnahmen ergriffen werden, um ihre betrieblichen und radiologischen Auswirkungen zu begrenzen. Für den Endlagerbehälter bedeutet dies, dass Behälteranforderungen auch unter den Einwirkungen eines Störfalls weiterhin zu erfüllen sind. Dies betrifft vor allem den Einschluss des radioaktiven Inventars und den Kritikalitätsausschluss.
8. Auswirkungen aus einem unbeabsichtigten menschlichen Eindringen in das Endlager sollen durch entsprechende Auslegung des Endlagers nach Möglichkeit reduziert werden, wenn die dafür zu treffenden Maßnahmen keine negativen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit haben werden. Weitere Behälteranforderungen auf Grund von Human Intrusion Szenarien sind grundsätzlich denkbar, können auf Grund des hypothetischen Charakters aber noch nicht abgeschätzt werden.

4.1.2 Sicherheitskonzept für die Nachverschlussphase

Zu den Nutzungsphasen in der Nachverschlussphase eines Endlagers gehören die Phase der Bergbarkeit und die spätere Nachbetriebsphase. Für die Bergbarkeitsphase ist dies vor allem der Zeitraum bei verschlossenem Endlager bis zur eigentlichen Bergung. Folgende wirtsgesteinsspezifische Behälteranforderungen wurden aus den Zielsetzungen des Sicherheitskonzeptes für die Nachverschlussphase abgeleitet /GRS 2011a/:

1. Die eingelagerten Abfallgebinde sollen schnell vom Salzgestein eingeschlossen werden. Hieraus lassen sich keine direkten Anforderungen für den Behälter ableiten. Es lässt sich allerdings ableiten, dass die Einschlussfunktion des Endlagers für die Nachbetriebsphase durch die geologische Barriere erfolgen soll.
2. Der ausgewiesene einschlusswirksame Gebirgsbereich muss im Nachweiszeitraum erhalten bleiben und seine Barrierenfunktion wird weder durch interne, noch durch externe Vorgänge und Prozesse beeinträchtigt werden. Eine Schädigung der Barrieren kann durch unzulässig hohe Gasdrücke oder Temperaturen auftreten. Aus den möglichen Schädigungsprozessen lassen sich die Anforderungen Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion und Temperaturbeschränkung ableiten. Zur Vermeidung radiolytischer Schädigung ist zudem eine ausreichende Abschirmung ionisierender Strahlung notwendig. Weiterhin lässt sich für den Einschluss des radioaktiven Inventars ableiten, dass dieser in der späteren Nachverschlussphase nicht mehr durch den Behälter erfolgen muss, sondern auf die Einschlussfunktion des Wirtsgesteins im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches übergeht.

3. Die Schädigung der Barriere Salzgestein durch gasdruckbedingte Risse ist zu verhindern. Dazu ist die Gasentwicklung und Gasdruckaufbaurrate in den Grubenbauen zu reduzieren. Dies entspricht der Anforderung Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion.
4. Für den Fall, dass es zu einer Mobilisierung von Schadstoffen aus den Endlagergebirgen kommt, wird der Transport dieser Schadstoffe aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch chemische und physikalische Prozesse behindert bzw. verzögert. Damit es zur Mobilisierung von Schadstoffen aus den Abfällen kommt, muss von einem defekten Behälter ausgegangen werden, der die gestellten Einschlussanforderungen nicht mehr erfüllen kann. Für die Zeiträume der Einlagerungsphase und der Rückholbarkeitsphase ist dies bei der Auslegung des Behälters mit ausreichender Wahrscheinlichkeit auszuschließen, für den Zeitraum der Bergbarkeitsphase ist zumindest Aerosoldichtheit explizit gefordert. Die hier angesprochene Mobilisierung von Schadstoffen aus den Endlagergebirgen kann daher frühestens in der späteren Nachbetriebsphase möglich sein, wenn die Anforderung an den Einschluss des radioaktiven Inventars an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich übergegangen ist. Bei einem defekten Behälter ist davon auszugehen, dass eine oder mehrere Anforderungen nicht mehr durch den Behälter erfüllt werden können. Ein defekter Behälter versagt demnach nicht direkt komplett. So ist z. B. bei einem in der späteren Nachbetriebsphase nicht mehr einschließenden Behälter trotzdem noch eine Erfüllung weiterer Anforderungen wie z. B. der Abschirmung ionisierender Strahlung, der Temperaturbeschränkung oder dem Kritikalitätsausschluss möglich.
5. Eine sich selbst erhaltende Kettenreaktion ist durch Einlagerungsplanung, sowie Beladung und Auslegung der Endlagerbehälter in jeder Phase der Endlagerentwicklung auszuschließen. Dies entspricht der Anforderung Kritikalitätsausschluss, die für alle Behälternutzungsphasen zu erfüllen ist.

In /GRS 2012a/ wurden zudem Leitgedanken und Grundanforderungen des Sicherheitsnachweiskonzeptes für das in der VSG untersuchte Endlagerkonzept formuliert. Diese werden ebenfalls zur Spezifizierung der grundlegenden generischen Behälteranforderungen herangezogen.

Als Leitgedanken wurden formuliert:

1. Es soll ein möglichst weitgehender Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich erreicht werden. Daraus lässt sich ebenfalls annehmen, dass der Einschluss des radioaktiven Inventars in der späteren Nachverschlussphase nicht mehr durch den Endlagerbehälter, sondern durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich erfolgen soll.
2. Der Einschluss soll dabei sofort nach Verschluss des Endlagerbergwerks wirksam werden und durch das Endlagersystem dauerhaft und nachsorgefrei sichergestellt sein. Hieraus lässt sich ebenfalls ableiten, dass der Einschluss des radioaktiven Inventars nicht dauerhaft durch die Endlagerbehälter erfolgen muss, sondern in der späteren Nachverschlussphase durch Wirtsgestein und die geotechnischen Barrieren sichergestellt werden soll.

3. Der sofortige und dauerhafte Einschluss des radioaktiven Inventars in einem definierten Gebirgsbereich soll vorrangig dadurch erreicht werden, dass ein Zutritt von Lösungen zu den Abfällen verhindert oder zumindest stark begrenzt wird. Hieraus lässt sich eine Einschlussfunktion durch den Endlagerbehälter ableiten. Wie schon vorher beschrieben hat diese allerdings nicht ausschließlich und dauerhaft durch den Endlagerbehälter zu erfolgen, sondern soll ebenfalls durch weitere Barrieren des Endlagersystems sichergestellt werden.

Als Grundanforderungen an das gesamte Endlagerkonzept aus der VSG wurden formuliert:

Grundanforderung A: "Die eingelagerten Abfallgebinde sollen schnell und möglichst dicht vom Salzgestein im Verbund mit den geotechnischen Barrieren eingeschlossen werden (Einschlussgedanke)." Hier findet sich die Anforderung des Einschlusses der Abfälle wieder. Obwohl hier ein schneller und möglichst dichter Einschluss durch das Salzgestein gefordert wird, ist eine Übernahme der Einschlussanforderung ausschließlich durch das Salzgestein frühestens nach Ablauf der Bergbarkeitsphase möglich. Bis dahin hat der Einschluss des radioaktiven Inventars zunächst durch den Endlagerbehälter zu erfolgen. Festgehalten werden kann hier, dass der Einschluss der Abfälle in der Nachverschlussphase nicht zwingend und ausschließlich durch den Endlagerbehälter erfolgen muss, sondern auch durch Wirtsgestein und geotechnische Barrieren gewährleistet werden kann. Der Endlagerbehälter muss den Einschluss des radioaktiven Inventars nicht uneingeschränkt über die Phase der Bergbarkeit hinaus gewährleisten.

Grundanforderung B: "Der ausgewiesene einschlusswirksame Gebirgsbereich bleibt im Nachweiszeitraum erhalten und seine Barrierenfunktion (geologische und geotechnische Barrieren) wird weder durch interne noch durch externe Vorgänge und Prozesse beeinträchtigt (Integritätsgedanke / Wartungsfreiheit)." Aus möglichen Schädigungsprozessen lassen sich Anforderungen an die Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion sowie Abschirmung der ionisierenden Strahlung ableiten. Dies gilt ebenfalls für Anforderungen hinsichtlich der Temperaturbeschränkung.

Grundanforderung C: "Eine Kritikalität muss in jeder Phase der Endlagerentwicklung ausgeschlossen werden." Dies entspricht der Behälteranforderung des Kritikalitätsausschlusses. Diese muss durch den Endlagerbehälter in jeder Phase der Endlagerung für die reaktivste Anordnung des Kernbrennstoffes sichergestellt werden.

4.1.3 Nachweiskonzept für die Nachbetriebsphase

Das Nachweiskonzept für die Nachbetriebsphase umfasst nach /GRS 2012a/ die Vorgehensweise zur Ausweisung der Lage und Grenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und den Nachweis des Erhalts des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Nachweiszeitraum. Ein Nachweisverfahren für die Betriebsphase des Endlagers wurde im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben nicht erstellt.

Für die Nachbetriebsphase sind nach Nachweiskonzept der VSG folgende Einzelnachweise über das gesamte Endlagersystem zu führen:

- Nachweis über die Mächtigkeit der Salzbarriere im einschlusswirksamen Gebirgsbereich
- Nachweis der Integrität der geologischen Barriere
- Nachweis der Integrität der geotechnischen Verschlussbauwerke
- Ausschluss selbsterhaltender Kettenreaktionen (Kritikalitätsausschluss)
- Einschluss der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich
- Nachweis radiologischer Konsequenzen in der Biosphäre anhand der Kriterien der Sicherheitsanforderungen bei Freisetzung von Radionukliden aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich

Im Nachweiskonzept der VSG für die Nachbetriebsphase soll kein Integritätsnachweis über den Endlagerbehälter geführt werden. Diesem wurde im dort betrachteten Endlagerkonzept keine Barriereneigenschaft für den Einschluss des radioaktiven Inventars über die Phase der Bergbarkeit hinaus zugesprochen, sodass für die betrachteten Endlagerkonzepte auf einen Integritätsnachweis des Endlagerbehälters verzichtet werden kann. Im Nachweiskonzept der VSG sind die Integritätsnachweise der geologischen und der geotechnischen Barrieren ausreichend. Aus dem Nachweiskonzept der VSG können daher keine weiteren Behälteranforderungen abgeleitet werden.

Der hier angesprochene Integritätsnachweis über den Endlagerbehälter ist nicht mit dem behälterspezifischen Sicherheitsnachweis zu verwechseln. Der behälterspezifische Sicherheitsnachweis ist unabhängig von einem endlagerkonzeptabhängigen Behälterintegritätsnachweis immer zu führen.

4.1.4 Zeitliche Abhängigkeit der Behälteranforderungen für das Wirtsgestein Steinsalz

Die aus den regulatorischen Anforderungen hergeleiteten grundlegenden generischen Behälteranforderungen sollen hier anhand der angeführten, für die VSG entwickelten Sicherheits- und Nachweiskonzepte für ein Endlager im Steinsalz, entsprechend der in Kapitel 2.3.2 vorgenommen Einteilung in Nutzungsphasen eingeordnet werden. Dadurch erfolgt eine Konkretisierung der in Kapitel 2.3 beschriebenen zeitlichen Abhängigkeit der generischen Behälterfunktionen für das Wirtsgestein Steinsalz. Nach der Erläuterung der zeitlichen Abhängigkeit der einzelnen Behälteranforderungen werden kurz die Absätze des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes, die zur Einordnung verwendet wurden, aufgelistet.

Einschluss des radioaktiven Inventars

Während der Einlagerung erfolgt der Einschluss des radioaktiven Inventars durch die Endlagerbehälter. Für den Zeitraum der Rückholbarkeitsphase kann auf Grund der Notwendigkeit, die Endlagergebäude aus den Einlagerungsbereichen entfernen zu müssen, ebenfalls eine Anforderung an den Einschluss der Abfälle durch den Endlagerbehälter abgeleitet werden. Für die Bergbarkeitsphase ist für wahrscheinliche nach /BMU 2010/ oder für zu erwartende Entwicklungen nach /BMU 2020/ des Endlagersystems die Bergbarkeit der Endlagergebäude

nachzuweisen, und es ist Dichtheit gegen Aerosole gefordert. Daher wird auch hier eine Anforderung an den Einschluss durch den Endlagerbehälter gestellt. In der späteren Nachbetriebsphase gehen bei den in der VSG betrachteten Endlagerkonzepten im Steinsalz die Anforderungen an den Einschluss des radioaktiven Inventars auf das Wirtsgestein und die geotechnischen Barrieren über. Die Endlagerbehälter haben die Anforderungen an den Einschluss des radioaktiven Inventars dann nicht mehr zu erfüllen.

Im Sicherheitskonzept gemäß /GRS 2011a/ und /GRS 2012a/ findet sich die Einschlussfunktion des Endlagerbehälters in Kapitel 4.1.1 dieses Berichtes in den Ziffern 1, 3 und 4 und in Kapitel 4.1.2 dieses Berichtes in Ziffer 2, sowie in den Leitgedanken 1 bis 3 und der Grundanforderung A.

Abschirmung ionisierender Strahlung

Zum Schutz des eingesetzten Personals während der Betriebsphase müssen die Endlagerbehälter die Abschirmung der vom Inventar ausgehenden ionisierenden Strahlung gewährleisten. Dadurch ist die Möglichkeit der Behebung von Betriebsstörungen in Behälterumgebung durch das Endlagerpersonal gegeben. Zur Erfüllung der Abschirmungsanforderungen ist die Verwendung weiterer technischer Hilfsmittel, z. B. Abschirm- oder Transferbehälter zulässig. Für die Nutzungsphasen Einlagerung und Rückholbarkeit, die in der Betriebsphase des Endlagers liegen, ergibt sich damit eine quantifizierbare Anforderung an die Abschirmleistung der Behälter. Für den Zeitraum der Bergbarkeit ergibt sich entsprechend unter den zu erwartenden Entwicklungen des Endlagersystems ebenfalls eine solche Anforderung. Auch hier ist zur sicheren Durchführung des Bergungsbetriebs eine Abschirmende Wirkung der Endlagerbehälter notwendig.

Im Sicherheitskonzept gemäß /GRS 2011a/ und /GRS 2012a/ ist dies in Kapitel 4.1.1 dieses Berichts in den Ziffern 2, 3 und 4 zu finden.

Weitere Anforderungen ergeben sich aus der Integrität der geologischen Barriere Salzgestein. Zur Vermeidung von radiologischen bzw. radiolytischen Schädigungen ist hier eine Abschirmung ionisierender Strahlung notwendig. Diese Anforderung ist ab dem Versetzen des Endlagerbehälters zu stellen. Sie beginnt damit mit der Phase der Rückholbarkeit und bleibt über den gesamten Nachweiszeitraum bestehen.

Im Sicherheitskonzept gemäß /GRS 2011a/ und /GRS 2012a/ findet sich diese Anforderung in Kapitel 4.1.2 dieses Berichts in Ziffer 2 sowie in der Grundanforderung B.

Kritikalitätsausschluss

Nach dem Sicherheitskonzept der VSG und den grundlegenden Sicherheitsanforderungen sind selbsterhaltende nukleare Kettenreaktionen zu verhindern. Es wird daher für alle Zeiträume der Kritikalitätsausschluss durch das Endlagergebäude gefordert. Dabei ist nach /BMU 2020/ die reaktivste Anordnung zu berücksichtigen. Unterkritikalität ist also auch für ein mögliches Eindringen wässriger Lösungen in das Endlagergebäude nachzuweisen.

Im Sicherheitskonzept gemäß /GRS 2011a/ und /GRS 2012a/ findet sich die abgeleitete Funktion des Kritikalitätsausschlusses in Kapitel 4.1.1 Ziffer 5 dieses Berichts und Kapitel 4.1.2 Ziffer

5 dieses Berichts und in der Grundanforderung C. Im Nachweiskonzept nach Kapitel 4.1.3 kann dies aus dem zu führenden Nachweis der Unterkritikalität abgeleitet werden.

Temperaturbeschränkung

Für einen sicheren Endlagerbetrieb ist die Oberflächentemperatur der Behälter für die Zeiträume der Einlagerung und Rückholbarkeit zu begrenzen. Für die eventuelle Bergung ist ebenfalls eine Begrenzung der Temperatur für zu erwartende Entwicklungen notwendig. Der Grund für diese Begrenzungen ist der Arbeitsschutz des eingesetzten Personals. Zur Erhaltung der Integrität der das Endlagergebäude direkt umschließenden geologischen Barriere Salzgestein ist deren thermische Schädigung auszuschließen. Dazu ist vom Beginn der Nutzungsphase Rückholbarkeit bis zum Ende des Nachweiszeitraums die Oberflächentemperatur des Behälters zu begrenzen.

Im Sicherheitskonzept gemäß /GRS 2011a/ und /GRS 2012a/ ist dies unter Kapitel 4.1.1 Ziffer 6 dieses Berichts und unter Kapitel 4.1.2 Ziffer 2 dieses Berichts sowie in der Grundanforderung B zu finden.

Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion

Zur Vermeidung unzulässig hoher Gasdrücke ist die Korrosion der Behälter und die davon abhängige Gasproduktion zu begrenzen. Anforderungen dafür werden an die Bergbarkeits- und spätere Nachbetriebsphase gestellt, da erst für die Nachverschlussphase von einem möglichen Zutritt wässriger Lösungen und damit verbundener Korrosion ausgegangen wird, da die Einlagerungsbereiche mit ausreichendem Abstand zu bei der Erkundung detektierten Lösungseinschlüssen angelegt werden. Für die Nutzungsphasen der Einlagerung und Rückholbarkeit wurde in den bisherigen Sicherheits- und Nachweiskonzepten für trockenes Steinsalz keine Korrosion angenommen. Zudem ist bei einem noch nicht verschlossenen Endlager kein schädigender Druckaufbau durch Gasbildung zu erwarten.

Im betrachteten Sicherheitskonzept gemäß /GRS 2011a/ und /GRS 2012a/ ist dies unter Kapitel 4.1.2 dieses Berichts in den Ziffern 2 und 3 sowie der Grundanforderung B zu finden.

Handhabbarkeit

Für die Einlagerung und Rückholung ist eine Handhabbarkeit der Endlagergebäude uneingeschränkt zu gewährleisten. Für eine eventuelle Bergung ist diese nur für nach /BMU 2010/ wahrscheinliche oder für nach /BMU 2020/ zu erwartende Entwicklungen zu gewährleisten. Nach Ablauf der Bergbarkeitsphase bestehen keine Anforderungen an die Handhabbarkeit der Endlagergebäude mehr, da entsprechend dem Grundsatz der passiven Sicherheit des Endlagersystems für den verbleibenden Nachweiszeitraum keine Handhabungen mehr in Betracht kommen.

Im Sicherheitskonzept gemäß /GRS 2011a/ und /GRS 2012a/ sind Anforderungen an die Funktion der Handhabbarkeit unter Kapitel 4.1.1 dieses Berichts in den Ziffern 1, 3 und 4 zu finden.

Die beschriebene zeitliche Einordnung der Behälteranforderungen ist in Tabelle 4-1 dargestellt.

Tabelle 4-1: Übersicht der grundlegenden Behälteranforderungen für die Endlagerung im Wirtsgestein Steinsalz

Grundlegende Anforderung	Nutzungsphase			
	Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	später Nachbetrieb
Einschluss des radioaktiven Inventars	Uneingeschränkt zu gewährleisten		Für nach /BMU 2010/ wahrscheinliche oder nach /BMU 2020/ zu erwartende Entwicklungen hinreichend zu gewährleisten	
Abschirmung ionisierender Strahlung	Für den Endlagerbetrieb hinreichend zu gewährleisten			
		Zur Vermeidung von radiologischen bzw. radiolytisch begünstigten Schädigungen der Barriere Wirtsgestein hinreichend zu gewährleisten		
Kritikalitätsausschluss	Für die reaktivste Anordnung des Kernbrennstoffes einschließlich unterstelltem Wasserzutritt uneingeschränkt zu gewährleisten			
Temperaturbeschränkung	Für den Endlagerbetrieb hinreichend zu gewährleisten		Für nach /BMU 2010/ wahrscheinliche oder nach /BMU 2020/ zu erwartende Entwicklungen hinreichend zu gewährleisten	
		Zur Vermeidung der thermischen Schädigung der Barrieren und des Wirtsgesteins hinreichend zu gewährleisten		
Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion		Bei Zutritt wässriger Lösungen zur Vermeidung unzulässiger Korrosion und Gasdrücke hinreichend zu gewährleisten		
Handhabbarkeit	Hinreichend zu gewährleisten		Für nach /BMU 2010/ wahrscheinliche oder nach /BMU 2020/ zu erwartende Entwicklungen hinreichend zu gewährleisten	

4.1.5 Endlager- und Behälterkonzepte im Steinsalz

Für die Endlagerung im Steinsalz wurden bislang im Rahmen von Forschungsvorhaben drei unterschiedliche Endlagerkonzepte betrachtet:

- Die Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern
- Die vertikale Bohrlochlagerung von rückholbaren Brennstabkokillen BSK-R
- Die direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern in horizontalen Kurzbohrlöchern

Streckenlagerung

Im Endlagerkonzept der Streckenlagerung sollen POLLUX®-Behälter in aufgefahrenen Strecken eines Endlagerbergwerkes innerhalb eines Salzstockes abgelegt und dort mit Salzgruß versetzt werden. Der POLLUX® besteht aus zwei Behältern. Der innere Behälter wird mit hochradioaktiven Abfällen beladen und mit einem Deckel verschweißt, der äußere Behälter dient der Abschirmung der ionisierenden Strahlung und wird mit einem Primärdeckel verschraubt. Ein POLLUX®-10-Behälter (ausgelegt für die Brennstäbe von 10 DWR-BE) hat einen Durchmesser von 1560 mm, eine Länge von 5517 mm und eine Masse von ca. 65 Mg. Ein POLLUX®-9-Behälter hat dieselben Dimensionen und ist geplant für die Aufnahme von 9 Kokillen mit hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung. Gefertigt sind die POLLUX® aus Stahl (Innenbehälter) und Gusseisen (Außenbehälter). Zur Handhabung sind an der äußeren Behälterkontur vier Tragzapfen angebracht. Weitere Informationen zum POLLUX®-Behälter, der Streckenlagerung und der verwendeten Einlagerungstechnik sind im Bericht zum Arbeitspaket 2 zu finden /BGETEC 2020/. Die Entwicklungsgeschichte der POLLUX®-Behälter ist im Bericht des Arbeitspaketes 1 dargestellt /BAM 2020/.



Abbildung 4-1: Einlagerungsvorrichtung mit POLLUX®-Behälter-Dummy /GRS 2011b/

Vertikale Bohrlochlagerung

Beim Einlagerungskonzept der vertikalen Bohrlochlagerung sollen je bis zu 50 Endlagergebinde in einem 300 m tiefen vertikalen Bohrloch eingelagert werden. Dazu sollen rückholbare Brennstabkokillen BSK-R, beladen mit den Brennstäben ausgedienter Brennelemente oder mit Kokillen mit Wiederaufarbeitungsabfällen verwendet werden. Die Brennstabkokillen sind

dicht mit einem Deckel verschweißt. Durch die geringe Wandstärke der BSK-R erfolgt keine ausreichende Abschirmung ionisierender Strahlung. Für den Transport und die Einlagerung muss die BSK-R deshalb in einem abschirmenden Transferbehälter verladen werden. Die Brennstabkokillen haben eine Länge von 4980 mm, einen Durchmesser von 430 mm und eine Masse von ca. 5,3 Mg. Als Material für die Brennstabkokille ist Stahl vorgesehen. Die Handhabung soll über einen Tragpilz am Deckel erfolgen. Die Bohrlöcher werden mit einer Verrohrung aus Stahl ausgestattet und sollen nach der Einlagerung der BSK-R mit Quarzsand versetzt werden. Verrohrung und Sandversatz sollen sicherstellen, dass sich die Brennstabkokille zur Rückholung oder Bergung aus dem Bohrloch ziehen lässt. Weitere Informationen zur vertikalen Bohrlochlagerung und der verwendeten Einlagerungstechnik sind im Bericht zum Arbeitspaket 2 zu finden /BGETEC 2020/. Die Entwicklungsgeschichte der Endlagerbehälterkonzepte für die Bohrlochlagerung im Steinsalz ist im Bericht zum Arbeitspaket 1 /BAM 2020/ dargestellt.

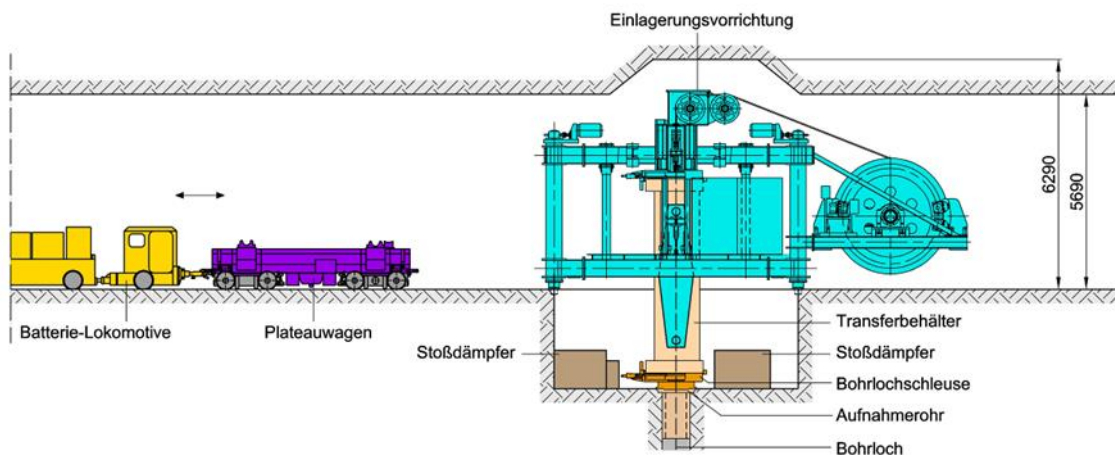


Abbildung 4-2: Komponenten des Einlagerungssystems bei der vertikalen Bohrlochlagerung /GRS 2011b/

Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern

Im Konzept der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern sollen die zur Zwischenlagerung genutzten Transport- und Lagerbehälter auch als Endlagerbehälter genutzt werden. Dazu sollen diese im Endlagerbergwerk mittels einer Streckentransport und Einlagerungsvorrichtung in kurze horizontale Bohrlöcher geschoben werden. Transport- und Lagerbehälter bestehen aus Gusseisen mit verschraubten Deckeln. Durch die große Wandstärke wird die vom Inventar ausgehende ionisierende Strahlung abgeschirmt. Die Eignung der Transport- und Lagerbehälter für die Endlagerung ist noch nachzuweisen. Zudem kann das aktuell gültige Temperaturkriterium von 100 °C nach StandAG auf Grund der hohen Wärmeleistung der Endlagergebinde nur eingehalten werden /DBETEC 2016b/, wenn die mögliche Beladung deutlich reduziert wird. Aus Gründen der Kritikalitätssicherheit sollen die Behälter mit Magnetit oder abgereichertem Uranoxid verfüllt werden. Damit würde die maximale Behältermasse bei voller Beladung 160 Mg betragen. Weitere Informationen zur direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern, den zur Verwendung geplanten Behältern und der Einlagerungstechnik sind im Bericht zum Arbeitspaket 2 zu finden /BGETEC 2020/.

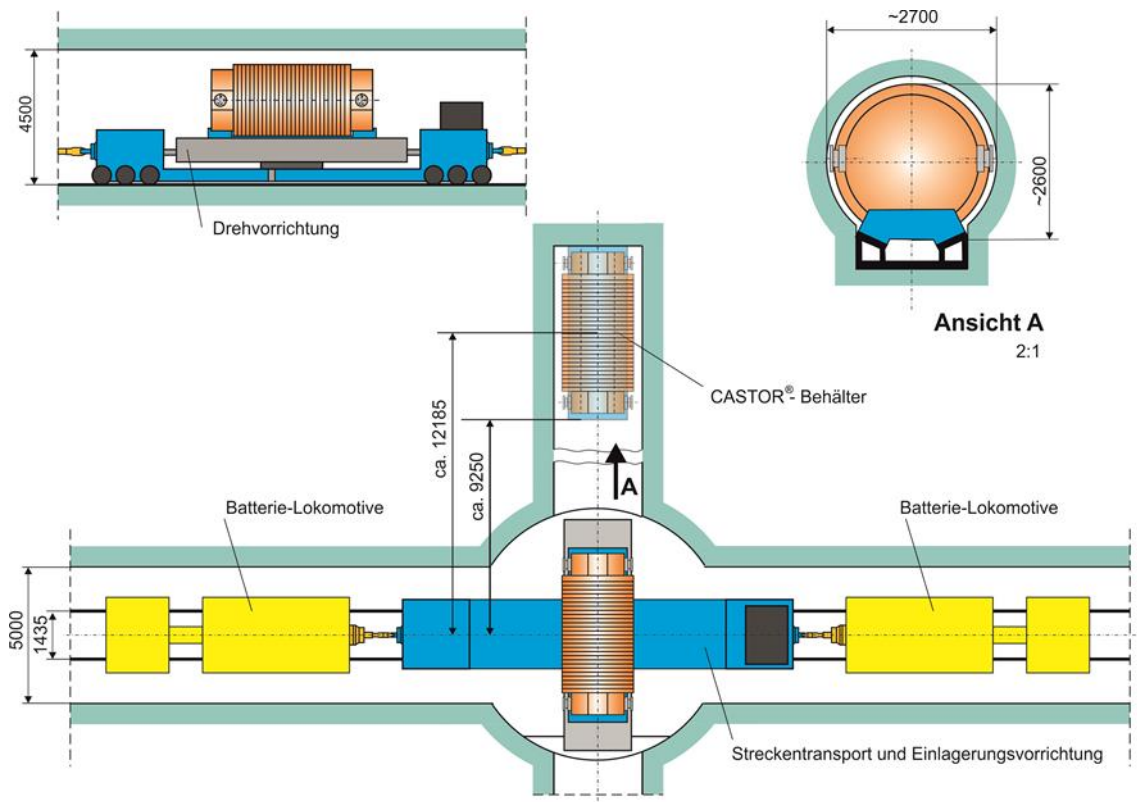


Abbildung 4-3: Situation am Einlagerungsort bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern /GRS 2012b/

4.2 Endlagerung im Wirtsgestein Tonstein

Im folgenden Kapitel werden die Behälteranforderungen für das Wirtsgestein Tonstein spezifiziert. Grundlage dafür sind die Anforderungen an die Endlagergebinde unter den durch die Einlagerung in einer Tonsteinformation gegebenen Randbedingungen. Im Forschungsvorhaben "Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager im Tongestein in Deutschland" (ANSICHT) /GRS 2014/ wurde ein Sicherheits- und Nachweiskonzept erstellt, anhand dessen die Behälteranforderungen qualitativ und quantitativ hergeleitet werden können.

4.2.1 Sicherheitskonzept für die Betriebsphase

Im Forschungsvorhaben ANSICHT /GRS 2014/ wurde kein Sicherheitskonzept für die Betriebsphase des Endlagers aufgestellt. Da die Betriebskonzepte im Tonstein und Steinsalz hinsichtlich der geplanten Vorgänge und der verwendeten Einlagerungstechnik vergleichbar sind, werden die abgeleiteten Anforderungen aus dem Sicherheitskonzept für Steinsalz aus Kapitel 4.1.1 hier übernommen.

4.2.2 Sicherheitskonzept für die Nachverschlussphase

Für die Nachverschlussphase gelten nach /GRS 2014/ die folgenden Zielsetzungen des Sicherheitskonzeptes:

1. Der ausgewiesene einschlusswirksame Gebirgsbereich bleibt im Nachweiszeitraum erhalten und seine Barrierenfunktion wird weder durch interne, noch durch externe Vorgänge und Prozesse beeinträchtigt. Um hieraus Anforderungen an die Endlagerbehälter abzuleiten, ist zunächst eine kurze Erläuterung möglicher Schädigungsprozesse für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich notwendig. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich kann durch den Aufbau eines Gasdrucks innerhalb des Endlagers geschädigt werden. Daher müssen die Endlagerbehälter Anforderungen an die Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion erfüllen. Zudem sind Radiolyse bedingte Schädigungen am Wirtsgestein möglich, sodass auch eine Abschirmung ionisierender Strahlung durch den Endlagerbehälter zu erfolgen hat.
2. Die maximalen Temperaturen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich werden durch eine entsprechende Auslegung begrenzt, so dass die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht unzulässig beeinflusst wird. Ableitbar ist hier die Behälteranforderung der Temperaturbeschränkung.
3. Der Ausschluss einer Kritikalität ist gemäß den Sicherheitsanforderungen durch einen entsprechenden Nachweis zu zeigen. Eine Kritikalität ist durch die Einlagerungsplanung, sowie Beladung und Auslegung der Endlagerbehälter in jeder Phase der Endlagerentwicklung auszuschließen. Dies entspricht der Behälteranforderung des Kritikalitätsausschlusses.
4. Auswirkungen bei einem unbeabsichtigten menschlichen Eindringen in das Endlager (Human-Intrusion-Szenarien) sowie ihre Eintrittswahrscheinlichkeiten werden durch entsprechende Auslegung des Endlagers nach Möglichkeit reduziert. Da unbekannt ist, in welcher Form ein zukünftiges menschliches Eindringen in das Endlager stattfindet, lassen sich hier noch keine Behälteranforderungen ableiten. Es ist möglich, dass sich zu einem späteren Zeitpunkt noch Anforderungen aus Human-Intrusion-Szenarien ergeben können.
5. Entsprechend den Sicherheitsanforderungen sollen die eingelagerten Abfallgebinde für einen Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers für eine eventuelle Bergung handhabbar sein. Dabei soll eine Freisetzung radioaktiver Aerosole vermieden werden. Daraus lassen sich direkt Anforderungen an den Einschluss des radioaktiven Inventars und die Handhabbarkeit ableiten. Für den Endlagerbetrieb im Falle der Bergung ist zudem eine Abschirmung ionisierender Strahlung durch den Endlagerbehälter zu gewährleisten.
6. Die Gasentwicklung und die dadurch induzierte Fluiddruckaufbaurrate in den Grubenbauen sollen durch eine entsprechende Auslegung so weit beschränkt werden, dass eine Beeinträchtigung des Wirtsgesteins durch die Bildung von Rissen, weder durch den Gasdruck, noch durch den Transport von Gasen erfolgt. Durch die im Tonstein vorhandenen Wässer und Lösungen ist Korrosion der Endlagerbehälter zu erwarten. Um die dadurch entstehende Gasentwicklung zu begrenzen, sind durch die Endlagerbehälter Anforderungen an die Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion zu erfüllen.

7. Mikrobielle Prozesse in den Grubenbauen sollen durch eine entsprechende Auslegung so weit wie möglich beschränkt werden. Behälterseitig wird vor allem die Korrosion durch mikrobielle Aktivität beeinflusst. Für den Endlagerbehälter ergibt sich daher die Anforderung Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion.

4.2.3 Nachweiskonzept beim Wirtsgestein Tonstein

Das Nachweiskonzept /GRS 2014/ für die Nachverschlussphase umfasst die folgenden zu führenden Nachweise:

- Integritätsnachweis der geologischen Barriere (ewG) über den Nachweiszeitraum
- Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren als Nachweis der Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems
- Radiologischer Nachweis
- Nachweis zum Ausschluss von Kritikalität

Der Endlagerbehälter hat in den in ANSICHT erarbeiteten Endlagerkonzepten /DBETEC 2015a/ und /DBETEC 2015b/ keine nachzuweisende Barrierenfunktion über den Endlagerbetrieb und die Phase der Bergbarkeit hinaus. Der Funktionszeitraum für den Einschluss des radioaktiven Inventars durch den Endlagerbehälter wurde für beide Endlagerkonzepte bis zum Ende der Bergbarkeitsphase festgelegt. Daher ist nach ANSICHT zunächst kein Integritätsnachweis über den Endlagerbehälter für die Nachverschlussphase zu führen. Durch radiologische Analysen sollte allerdings überprüft werden, ob weitere Anforderungen über den Zeitraum der Bergbarkeit hinaus an den Behälter gestellt werden müssen. Ein Einschluss des radioaktiven Inventars kann dann auch über diesen Zeitraum hinaus weiterhin gefordert werden.

4.2.4 Zeitliche Abhängigkeiten der Behälterfunktionen im Wirtsgestein Tonstein

Die aus dem Sicherheits- und Nachweiskonzept spezifizierten Behälteranforderungen sollen nun entsprechend der in Kapitel 2.3.2 vorgenommen Einteilung in Zeiträume eingeordnet werden. Dadurch erfolgt eine Konkretisierung der in Kapitel 2.4 beschriebenen zeitlichen Abhängigkeit der grundlegenden generischen Behälteranforderungen für die bisherigen Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Tonstein nach dem Vorhaben ANSICHT. Nach der Erläuterung der zeitlichen Abhängigkeit der einzelnen, spezifischen Behälteranforderungen werden kurz die Absätze des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes, die zur Herleitung verwendet wurden, aufgelistet. Anforderungen, die sich aus dem Betrieb des Endlagers ergeben, wurden aus dem Sicherheitskonzept für Steinsalz aus Kapitel 4.1.1 übernommen, da im Vorhaben ANSICHT kein Sicherheitskonzept für die Betriebsphase des Endlagers erstellt wurde. Da die grundlegenden betrieblichen Aspekte in den Wirtsgesteinen Steinsalz und Tonstein vergleichbar sind, ist eine Übernahme der Behälteranforderungen hier möglich.

Einschluss der radioaktiven Abfälle

Auf Grund der in den erarbeiteten Endlager- und Sicherheitskonzepten vergleichbaren betrieblichen Vorgänge werden hier die Anforderungen an den Einschluss des radioaktiven Inventars durch den Endlagerbehälter für die Zeiträume Einlagerung und Rückholbarkeit übernommen. Für den Zeitraum der Bergbarkeit kann aus den Sicherheitsanforderungen an Endlagerbehälter die Einschlussfunktion des Endlagerbehälters direkt abgeleitet und auf die Endlagerung im Tonstein übertragen werden. Dies gilt nach /BMU 2020/ für zu erwartende Entwicklungen des Endlagers. In der späteren Nachbetriebsphase sind zum jetzigen Zeitpunkt keine Anforderungen spezifiziert. Eine Einschlussfunktion wird hier nach den erarbeiteten Endlagerkonzepten und dem bisherigen Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein Endlager im Tonstein nicht gefordert. Es ist aber zu prüfen, ob dieses aus radiologischen Gesichtspunkten ausreichend ist oder ggf. weitere Anforderungen an den Endlagerbehälter zu stellen sind.

Die Anforderungen für die Zeiträume der Einlagerung und Rückholbarkeit finden sich in Kapitel 4.1.1 dieses Berichts in den Ziffern 1 und 3. Die Einschlussfunktion für den Zeitraum der Bergbarkeit entspricht Kapitel 4.2.2 dieses Berichts Ziffer 5. Die Aussagen für die spätere Nachverschlussphase können dem Nachweiskonzept gemäß /GRS 2014/ in Kapitel 4.2.3 dieses Berichts entnommen werden.

Abschirmung ionisierender Strahlung

Zur Durchführung des Einlagerungs- und möglichen Rückholungsbetriebs müssen die Endlagerbehälter ggfs. in Verbindung mit weiteren technischen Hilfsmitteln eine Abschirmung ionisierender Strahlung gewährleisten. Dies ist vor allem aus der Anforderung abzuleiten, dass die Behebung von Betriebsstörungen durch das Endlagerpersonal auch in Behälternähe möglich sein soll. Für eine eventuell stattfindende Bergung, kann davon ausgegangen werden, dass diese Anforderung ebenfalls zu stellen ist. Der zweite Grund für die Forderung der Behälterfunktion einer Abschirmung ionisierender Strahlung ist die geforderte Vermeidung der Schädigung der geologischen Barriere Wirtsgestein. Durch Radiolysevorgänge kann es zu Schäden im Wirtsgestein kommen. Um diese zu vermeiden, ist die ionisierende Strahlung in ausreichendem Maße durch den Endlagerbehälter abzuschirmen. Zeitlich ist dies ab dem Zeitraum der Rückholbarkeit bis zum Ende des Nachweiszeitraumes von einer Million Jahre zu gewährleisten.

Die Anforderungen für die dem Endlagerbetrieb zugehörigen Zeiträume können im Kapitel 4.1.1 dieses Berichts unter den Ziffern 2, 3 und 4 gefunden werden. Die Anforderung für den Zeitraum der Bergbarkeit findet sich auch in Kapitel 4.2.2 dieses Berichts unter Ziffer 5. Die Anforderung zur Vermeidung einer Schädigung der geologischen Barriere Wirtsgestein ist in Kapitel 4.2.2 dieses Berichts unter Ziffer 1 zu finden.

Kritikalitätsausschluss

Als grundlegende Sicherheitsanforderung sind selbsterhaltende nukleare Kettenreaktionen zu verhindern. Es wird daher für den gesamten Nachweiszeitraum der Kritikalitätsausschluss durch den Endlagerbehälter gefordert. Dieser hat dabei nach /BMU 2020/ für die jeweils reaktivste Anordnung des Kernbrennstoffes unter Berücksichtigung des Eindringens wässriger Lösungen in das Endlagergebäude zu erfolgen.

Im Sicherheitskonzept findet sich die abgeleitete Funktion des Kritikalitätsausschlusses in Kapitel 4.2.2 Ziffer 3 dieses Berichts. Weiterhin kann dies aus dem Nachweiskonzept gemäß /GRS 2014/ in Kapitel 4.2.3 dieses Berichts abgeleitet werden.

Temperaturbeschränkung

Die Oberflächentemperatur ist zunächst für den Endlagerbetrieb und die Handhabung der Behälter zu beschränken. Daher ist die Anforderung einer zum Schutz des eingesetzten Personals maximal zulässigen Oberflächentemperatur für die Nutzungsphasen Einlagerung, Rückholbarkeit und unter wahrscheinlichen /BMU 2010/ und zu erwartenden /BMU 2020/ Entwicklungen des Endlagers auch für die Phase der Bergbarkeit an den Endlagerbehälter zu stellen. Zur Erhaltung der Integrität der das Endlagergebäude direkt umschließenden geologischen Barriere Tonstein ist zum anderen deren thermische Schädigung auszuschließen. Abhängig von der zulässigen Grenztemperatur des Tonsteins ist die Oberflächentemperatur des Abfallgebüdes vom Beginn der Nutzungsphase Rückholbarkeit bis zum Ende des Nachweiszeitraums entsprechend zu begrenzen.

Die Anforderungen aus dem Endlagerbetrieb sind hier auf das Sicherheitskonzept der VSG gemäß /GRS 2011a/ und /GRS 2012a/ bezogen und können in Ziffer 6 in Kapitel 4.1.1 dieses Berichts wiedergefunden werden. Die Anforderung bezüglich einer Vermeidung von Schäden am Wirtsgestein ist Ziffer 1 in Kapitel 4.2.2 dieses Berichts entnommen worden.

Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion

Für Endlagerkonzepte im Tonstein ist mit dem Vorhandensein von Wässern und Lösungen sowie mikrobieller Aktivität zu rechnen. Die dadurch hervorgerufene oder beschleunigte Korrosion der Endlagerbehälter führt zu Gasbildung und dem Aufbau eines Gasdruckes, der die geologische Barriere sowie die geotechnischen Verschlussbauwerke schädigen kann. Es ist daher die Forderung nach der Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion an den Endlagerbehälter zu stellen. Diese beginnt zeitlich nach der Einlagerung mit dem Zeitraum der Rückholbarkeit und bleibt bis zum Ende des Nachweiszeitraums bestehen. Auf Grund der vor allem durch mikrobielle Aktivität verursachten hohen Korrosionsraten, ist die Begrenzung der Korrosion hier ab dem Zeitpunkt zu gewährleisten, ab dem der Behälter in Kontakt mit der hydrochemischen und mikrobiellen Umgebung des Endlagers steht.

Diese Anforderungen finden sich in den Ziffern 1, 6 und 7 in Kapitel 4.2.2 dieses Berichts.

Handhabbarkeit

Für Einlagerung und Rückholung ist eine Handhabbarkeit der Endlagergebäude uneingeschränkt zu gewährleisten. Für eine eventuelle Bergung ist diese unter wahrscheinlichen /BMU 2010/ oder zu erwartenden /BMU 2020/ Entwicklungen ebenfalls zu gewährleisten. Nach Ablauf des Bergungszeitraums gibt es hier keine Anforderungen mehr, da entsprechend dem in den Sicherheitsanforderungen verankerten Grundsatz der passiven Sicherheit des Endlagersystems in der späteren Nachverschlussphase keine Handhabungen stattfinden.

Im Sicherheitskonzept sind Anforderungen an die Funktion Handhabbarkeit in Kapitel 4.1.1 dieses Berichts in den Ziffern 1, 3 und 4 zu finden. Die Übersicht der für Tonstein spezifizierten

Behälteranforderungen für die unterschiedlichen Nutzungsphasen ist in Tabelle 4-2 dargestellt.

Tabelle 4-2: Übersicht der grundlegenden Behälteranforderungen für die Endlagerung im Wirtsgestein Tonstein

Grundlegende Anforderung	Nutzungsphase			
	Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	später Nachbetrieb
Einschluss des radioaktiven Inventars	Uneingeschränkt zu gewährleisten		Für nach /BMU 2010/ wahrscheinliche oder nach /BMU 2020/ zu erwartende Entwicklungen hinreichend zu gewährleisten	Weitere Anforderungen ggf. zu prüfen
Abschirmung ionisierender Strahlung	Für den Endlagerbetrieb hinreichend zu gewährleisten		Für nach /BMU 2010/ wahrscheinliche oder nach /BMU 2020/ zu erwartende Entwicklungen hinreichend zu gewährleisten	
		Zur Vermeidung von radiologischen bzw. radiolytisch begünstigten Schädigungen der Barriere Wirtsgestein hinreichend zu gewährleisten		
Kritikalitätsausschluss	Für die reaktivste Anordnung uneingeschränkt zu gewährleisten			
Temperaturbeschränkung	Für den Endlagerbetrieb hinreichend zu gewährleisten		Für nach /BMU 2010/ wahrscheinliche oder nach /BMU 2020/ zu erwartende Entwicklungen hinreichend zu gewährleisten	
		Zur Vermeidung der thermischen Schädigung der Barrieren und des Wirtsgesteins hinreichend zu gewährleisten		
Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion		Bei Kontakt mit dem hydrochemischen Milieu zur Vermeidung unzulässiger Korrosion und Gasdrücke hinreichend zu gewährleisten		
Handhabbarkeit	Hinreichend zu gewährleisten		Für nach /BMU 2010/ wahrscheinliche oder nach /BMU 2020/ zu erwartende Entwicklungen hinreichend zu gewährleisten	

4.2.5 Endlager- und Behälterkonzepte im Tonstein

Für die Endlagerung im Tonstein wurden im Vorhaben ANSICHT zwei verschiedene Endlager- und Behälterkonzepte betrachtet:

- Die Streckenlagerung von angepassten POLLUX®-Behältern im Opalinuston in der Modellregion "Süd"
- Die Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen (BSK-R) in Tonformationen in der Modellregion "Nord"

Streckenlagerung im Tonstein

Für die Streckenlagerung im Tonstein sollen verkleinerte POLLUX®-Behälter des Typs POLLUX®-3 verwendet werden, diese wurden im Forschungsvorhaben ERATO /DBETEC 2010b/ konzipiert. Die POLLUX-3® Behälter sollen entweder mit Brennstäben von 3 ausgedienten DWR-Brennelementen oder mit 3 Kokillen mit Wiederaufarbeitungsabfällen (CSD-V) beladen werden. Für die schwach wärmeentwickelnden Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (CSD-C, CSD-B) soll auf den größeren POLLUX®-9, der für die Aufnahme von 3x3 Kokillen vorgesehen ist, zurückgegriffen werden. Die Behälter sollen im Endlagerkonzept auf Tonfundamenten abgelegt und mit Tonstein-Granulat versetzt werden (s. Abbildung 4-4). Die Behälter vom Typ POLLUX®-3 wurden auf eine Masse von ca. 38 Mg und einen Durchmesser von 1200 mm abgeschätzt. Weitere Informationen zum Endlagerkonzept der Streckenlagerung im Tonstein sind in den Berichten zu AP1 /BAM 2020/ und AP2 /BGETEC 2020/ zu finden.

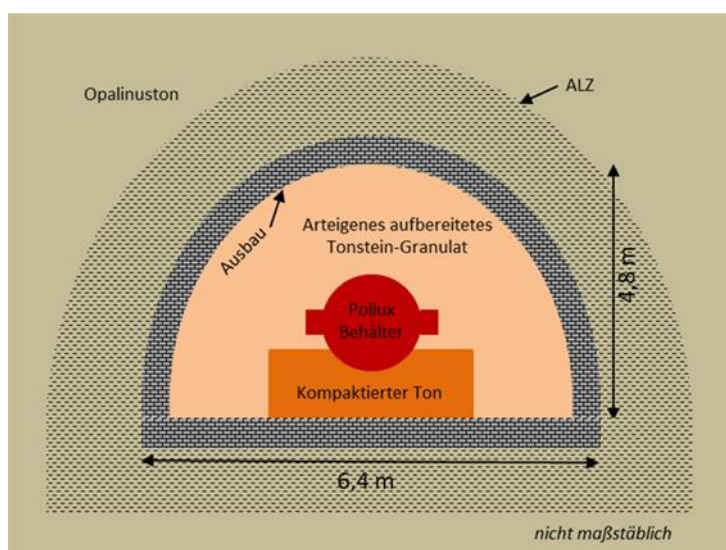


Abbildung 4-4: Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern im Tonstein /DBETEC 2015a/

Bohrlochlagerung im Tonstein

Bei der Bohrlochlagerung im Tonstein sollen rückholbare Kokillen (BSK-R) verwendet werden. Diese sollen mit ausgedienten Brennstäben, Wiederaufarbeitungsabfällen oder Brennelementstrukturteilen beladen werden. Um die Rückholung zu vereinfachen, sind die rückholbaren Kokillen konisch konzipiert. Ihr maximaler Durchmesser soll 520 mm betragen, die Länge 4885 mm. Die Masse ist vergleichbar zu der für Steinsalz konzipierten rückholbaren Kokille. Die Handhabung soll auch hier mit einem Tragpils am Deckel erfolgen. Bei der Einlagerung im Tonstein sollen nach dem Endlagerkonzept aus ANSICHT drei Kokillen in einem Bohrloch

platziert werden. Dieses wird zunächst mit einem perforierten Außenliner ausgestattet. Darin wird ein Bentonitbuffer eingebracht. In diesen soll ein lösungsdichter Innenliner eingebaut werden und darin sollen die Kokillen eingelagert werden. Der Versatz soll mit rieselfähigem Quarzsand erfolgen. Verschluss wird das Bohrloch mit einem Bohrlochverschluss aus Bentonit (s. Abbildung 4-5). Für Transport und Einlagerung der rückholbaren Kokillen muss auf Grund der nicht ausreichenden Abschirmfunktion der rückholbaren Kokille ein Transferbehälter verwendet werden. Weitere Informationen zum Endlager- und Behälterkonzept sind in /BGETEC 2020/ und /BAM 2020/ zu finden.

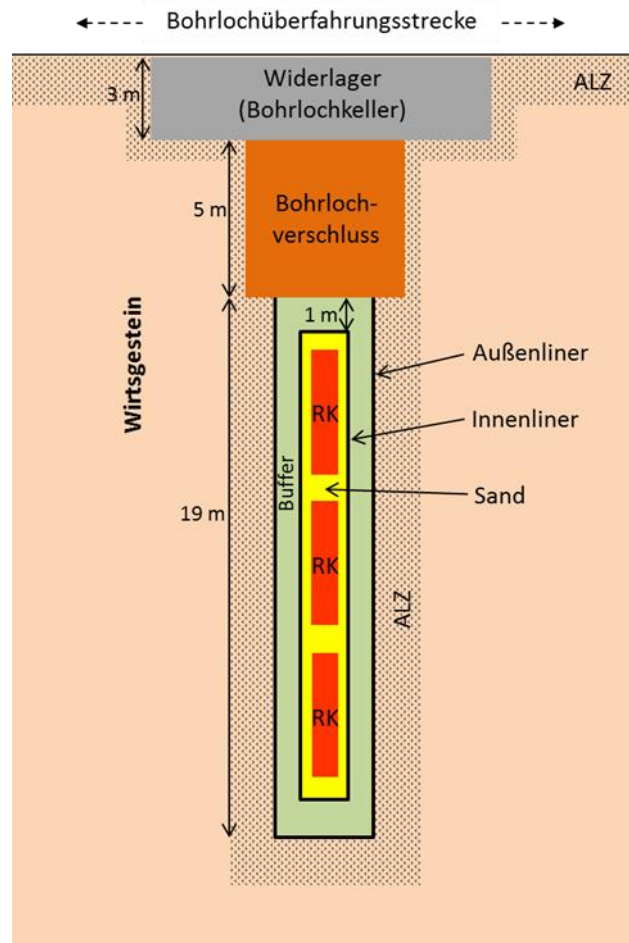


Abbildung 4-5: Bohrlochlagerung von Kokillen im Tonstein /DBETEC 2015b/

4.3 Endlagerung im Wirtsgestein Kristallin

Neben der Endlagerung in Steinsalz oder in Tonformationen wird im Rahmen der Standortauswahl auch kristallines Wirtsgestein betrachtet. Im Gegensatz zu Steinsalz und Ton ist eine Formulierung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für Kristallin in Deutschland noch nicht erfolgt. Zudem ist die Langzeitsicherheit eines Endlagers im Kristallin eng mit der Möglichkeit einer Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches verbunden. Diese ist hier im Gegensatz zu den anderen Wirtsgesteinen nicht ohne weiteres möglich. Zur Spezifizierung der Behälteranforderungen wurden daher die planerischen Festlegungen für drei Endlagerkonzepte aus dem Vorhaben KONEKD /DBETEC 2017a/ benutzt. Diese wurden so erstellt, dass die Sicherheitsanforderungen /BMU 2010/ an das Endlagersystem erfüllt werden. Den gleichen Stellenwert wie die Sicherheits- und Nachweiskonzepte aus den Vorhaben VSG oder ANSICHT besitzen diese allerdings nicht. Die in KONEKD betrachteten Endlagerkonzepte basieren auf im Vorhaben CHRISTA /DBETEC 2016a/ für Deutschland als realisierbar angesehenen Ausweisungsmöglichkeiten eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs.

Innerhalb des Vorhabens KONEKD wurden die folgenden Konzepte betrachtet:

- Das modifizierte KBS-3-Konzept. Dieses ist angelehnt an das schwedisch-finnische KBS-3-Konzept. Eine Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs erfolgt hier nicht. Der Nachweis der Langzeitsicherheit stützt sich auf technische und geotechnische Barrieren wie den Endlagerbehälter und Verschlussbauwerke.
- Das Konzept des multiplen ewG. Dieses beruht darauf, dass sich in einer Kristallinformation statt eines einzelnen zusammenhängenden ewG, der alle Abfälle aufnimmt, nur mehrere, räumliche getrennte, einschlusswirksame Gebirgsbereiche ausweisen lassen.
- Das Konzept eines überlagernden ewG. Hier liegt das kristalline Wirtsgestein unterhalb einer sedimentären Überdeckung aus Ton oder Salz. Die Einlagerung erfolgt dabei nicht innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, sondern in einer unterhalb liegenden Kristallinformation.

Aufgrund der vorgenannten Besonderheiten kann keine einheitliche Ableitung der Behälteranforderungen für Kristallin erfolgen. Die Ableitung der Behälteranforderungen ist daher abhängig vom Vorhandensein eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in den jeweiligen Endlagerkonzepten.

4.3.1 Sicherheitskonzept für die Betriebsphase

Ein Sicherheitskonzept für die Betriebsphase im Kristallin wurde noch nicht erstellt. Da die Betriebskonzepte im Kristallin hinsichtlich der geplanten Vorgänge und der verwendeten Einlagerungstechnik mit dem Tonstein und Steinsalz vergleichbar sind, wird auch hier auf das Sicherheitskonzept aus der VSG in Kapitel 4.1.1 zurückgegriffen. Die daraus abgeleiteten Behälteranforderungen werden übernommen. Zwei formale Abweichungen ergeben sich auf Grund der unterschiedlichen Einlagerungsmethoden. Die in Kapitel 4.1.1 in Punkt 6 angeführte Temperaturbeschränkung zum Schutz der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs besteht auch beim modifizierten KBS-3-Konzept, dient hier allerdings nicht dem Schutz

der Integrität des nicht vorhandenen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, sondern dem Schutz der Integrität der technischen oder geotechnischen Barrieren. Dies sind zum Beispiel der Behälter selbst oder ein ihn umgebender Buffer. Eine weitere Abweichung ergibt sich für das Konzept des überlagernden ewG. Hier erfolgt die Einlagerung der Endlagergebinde nicht innerhalb des ewG, sondern in einer Kristallinformation unterhalb des ewG. Deshalb kann die Anforderung an die Temperaturbeschränkung zum Schutz der Integrität des ewG hier entfallen, da die thermische Leistung der Endlagergebinde nicht auf den ewG einwirkt.

4.3.2 Modifiziertes KBS-3-Konzept

Das KBS-3-Konzept ist ein von SKB (Schweden) und POSIVA (Finnland) gemeinsam entwickeltes Endlagerkonzept für Kristallingestein. Im modifizierten KBS-3-Konzept soll dementsprechend der Einschluss abweichend vom üblichem ewG-Konzept in anderen FuE-Vorhaben in Deutschland durch die Barriereigenschaften von Endlagerbehälter und Buffer im Verbund gewährleistet werden. Die Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, wie aus dem Steinsalz oder dem Tonstein bekannt, erfolgt hier nicht.

4.3.2.1 Zielsetzungen für die Nachverschlussphase

Im Vorhaben KONEKD /DBETEC 2017a/ wurden für das modifizierte KBS-3-Konzept folgende Zielsetzungen für die Nachverschlussphase formuliert, mit denen die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen für das betrachtete Endlagerkonzept erreicht werden soll.

1. Die eingelagerten Behälter müssen lösungs- und gasdicht sein. Die Einschlussfunktion der Gebinde muss während des gesamten Nachweiszeitraumes von 1 Million Jahre erhalten bleiben. Damit wird eine direkte Anforderung an den Einschluss des radioaktiven Inventars gestellt.
2. Der Buffer muss das Endlagergebinde im Bohrloch vollständig umschließen. Er hat eine mechanische, chemische und hydraulische Schutzfunktion für den Behälter. Diese Funktionen müssen über den gesamten Nachweiszeitraum erhalten bleiben. Um den Buffer selbst und weitere Barrieren zu schützen und seine Schutzfunktionen zu erhalten, ist die Beschränkung der Oberflächentemperatur der Endlagerbehälter erforderlich. Weiterhin ist eine Schädigung des Buffers oder weiterer Barrieren durch Radiolyse möglich. Der Endlagerbehälter muss daher, um die Funktion weiterer Barrieren zu erhalten, eine Abschirmung ionisierender Strahlung gewährleisten.
3. Durch eine entsprechende Auslegung und Materialwahl bei den technischen Komponenten werden die Gasentwicklung und die Gasdruckaufbauraten in den Grubenbauen des Endlagerbergwerks soweit reduziert, dass die Funktion der Barrieren nicht beeinträchtigt wird. Daraus kann für den Endlagerbehälter die Funktion der Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion abgeleitet werden.
4. Eine Kritikalität wird durch die Einlagerungsplanung und durch entsprechende Beladung und Auslegung der Behälter in jeder Phase des Endlagerbetriebs und danach ausgeschlossen. Dies entspricht der Funktion des Kritikalitätsausschlusses.

5. Risiko und Auswirkungen eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Endlager (Human Intrusion) werden durch entsprechende Planung des Endlagers nach Möglichkeit reduziert, wenn die dafür zu treffenden Maßnahmen keine negativen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit haben. Eventuell ergeben sich hier weitere Behälteranforderungen. Diese können zurzeit noch nicht genauer spezifiziert werden.

4.3.2.2 Nachweiskonzept für das modifizierte KBS-3-Konzept

Beim modifizierten KBS-3-Konzept ist im Kristallingestein kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen. Daher kann für diesen kein Integritätsnachweis formuliert werden. Der Einschluss der Abfälle erfolgt deshalb nicht über eine geologische Barriere, sondern rein über geotechnische und technische Barrieren. Der Integritätsnachweis ist über diese zu führen. Es ist daher ein Nachweis zu führen, der dem Endlagerbehälter eine Standzeit von 1 Million Jahren nachweist. Hieraus lässt sich ableiten, dass der Endlagerbehälter die Funktion Einschluss des radioaktiven Inventars für den gesamten Nachweiszeitraum uneingeschränkt erfüllen muss /DBETEC 2017a/.

4.3.2.3 Zeitliche Abhängigkeit der Behälterfunktionen für das modifizierte KBS-3-Konzept

Die aus den Zielsetzungen für die Nachverschlussphase des modifizierten KBS-3-Konzepts abgeleiteten Behälterfunktionen sollen nun entsprechend der in Kapitel 2.3.2 vorgenommen Einteilung in Zeiträume eingeordnet werden. Dadurch erfolgt eine Konkretisierung der in Kapitel 2.4 beschriebenen zeitlichen Abhängigkeit der generischen Behälterfunktionen für das modifizierte KBS-3-Konzept. Nach der Erläuterung der zeitlichen Abhängigkeit der einzelnen Behälteranforderungen werden kurz die verwendeten Abschnitte der zur Spezifizierung verwendeten Vorstudie aufgelistet. Anforderungen, die sich aus dem Betrieb des Endlagers ergeben, wurden aus dem Sicherheitskonzept für Steinsalz /GRS 2011a/ übernommen, da im Vorhaben KONEKD kein Sicherheitskonzept für die Betriebsphase des Endlagers erstellt wurde.

Einschluss des radioaktiven Inventars

Der Endlagerbehälter hat für die Nutzungsphasen der Einlagerung, Rückholbarkeit und Bergbarkeit den Einschluss des radioaktiven Inventars zu gewährleisten. Dies hat betriebliche Gründe und stellt sicher, dass die in diesen Zeiträumen geplanten Arbeiten durchgeführt werden können. Im modifizierten KBS-3-Konzept erfolgt die Nachweisführung für die Langzeitsicherheit nicht über die geologische Barriere Wirtsgestein, sondern über die technischen und geotechnischen Barrieren, zu denen die Endlagergebäude zählen. Daher ist die Anforderung eines sicheren Einschlusses des radioaktiven Inventars durch den Behälter über den gesamten Nachweiszeitraum uneingeschränkt zu erfüllen.

Die Anforderungen für die Nutzungsphasen der Einlagerung und Rückholbarkeit finden sich in Kapitel 4.1.1 in den Ziffern 1, 3 und 4. Die Festlegung der Einschlussanforderung für den gesamten Nachweiszeitraum entspricht Ziffer 1 aus Kapitel 4.3.2.1 dieses Berichts und dem Nachweiskonzept aus Kapitel 4.3.2.2 dieses Berichts.

Abschirmung ionisierender Strahlung

Die hinreichende Abschirmung ionisierender Strahlung ist für die Nutzungsphasen Einlagerung, Rückholbarkeit und Bergbarkeit durch den Endlagerbehälter zu gewährleisten. Dadurch werden der Betrieb des Endlagers und der mögliche Aufenthalt von Personal in Behälternähe sichergestellt. Eine weitere Anforderung an die Abschirmungsfunktion des Behälters ergibt sich aus dem im KBS-3-Konzept enthaltenen Buffer. Dieser ist gegen Schädigung durch Radiolyse zu schützen. Dafür hat der Endlagerbehälter die Abschirmung ionisierender Strahlung in einem dafür ausreichenden Maße zu gewährleisten. Diese Anforderung beginnt mit der Einlagerung des Behälters und bleibt über den gesamten Nachweiszeitraum bestehen.

Die Anforderungen für die dem Endlagerbetrieb zugehörigen Zeiträume können Kapitel 4.1.1 dieses Berichts unter den Ziffern 2, 3 und 4 entnommen werden. Die Anforderung zur Vermeidung der Schädigung des Buffers ist in Kapitel 4.3.2.1 dieses Berichts unter Ziffer 2 zu finden.

Kritikalitätsausschluss

Als grundlegende Sicherheitsanforderung sind selbsterhaltende nukleare Kettenreaktionen auszuschließen. Es ist daher für den gesamten Nachweiszeitraum der Kritikalitätsausschluss durch den Endlagerbehälter zu gewährleisten. Dieser hat dabei nach /BMU 2020/ für die jeweils reaktivste Anordnung des Kernbrennstoffes unter Berücksichtigung des Eindringens wässriger Lösungen in das Endlagergebäude zu erfolgen.

Der Kritikalitätsausschluss entspricht Kapitel 4.3.2.1 Ziffer 4.

Temperaturbeschränkung

Die Beschränkung der Oberflächentemperatur des Endlagerbehälters ist zunächst für die Handhabung der Behälter und den Endlagerbetrieb zu gewährleisten. Dies gilt für die Nutzungsphase der Einlagerung, sowie die mögliche Wiederaufnahme des Endlagerbetriebs für eine Rückholung und für eine mögliche spätere Bergung. Eine weitere Anforderung an die Temperaturbeschränkung ergibt sich aus der Forderung nach dem Schutz des Buffers. Hierfür ist die Oberflächentemperatur des Endlagerbehälters nach seiner Einlagerung bis zum Ende des Nachweiszeitraums auf ein entsprechendes Maß zu begrenzen.

Die Anforderungen an die Temperaturbeschränkung können aus Kapitel 4.1.1 Ziffer 6 für den Endlagerbetrieb abgeleitet werden. Die dort auch genannte Temperaturbeschränkung zum Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches hat für das modifizierte KBS-3-Konzept keine Bedeutung. Aus Kapitel 4.3.2.1 wird die Temperaturbeschränkung zum Schutze weiterer Barrieren und des Buffers abgeleitet.

Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion

Anforderungen an die Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion resultieren für Endlagerkonzepte im Kristallingestein aus dem Vorhandensein von Wässern und Lösungen sowie mikrobieller Aktivität. Eine dadurch hervorgerufene oder beschleunigte Korrosion der Endlagerbehälter führt zu einer Gefährdung der Behälterintegrität. Die Verringerung der Gasproduktion spielt hier nur eine untergeordnete Rolle, da beim Kristallingestein von geklüftetem Gestein ohne Einschlussfunktion ausgegangen werden kann und ein hohes Speichervolumen für entstehende Gase vorhanden ist, so dass ein Druckaufbau nicht auftreten kann. Insofern besteht hier keine Behälteranforderung bezüglich der Begrenzung der Gasproduktion zur Vermeidung eines Gasdruckes, der die geologische Barriere sowie die geotechnischen Verschlussbauwerke schädigen kann. Einzig die mögliche Schädigung eines den Behälter umgebenden Puffers wäre in Betracht zu ziehen, sofern dessen Barrierewirkung Bestandteil des Sicherheitskonzeptes ist. Es besteht daher die Anforderung an die hinreichende Begrenzung von Korrosion und ggf. Gasproduktion an den Endlagerbehälter. Diese Anforderung beginnt nach der Einlagerung mit dem Zeitraum der Rückholbarkeit, ab dem der Behälter in Kontakt mit der hydrochemischen und mikrobiellen Umgebung des Endlagers steht, und bleibt bis zum Ende des Nachweiszeitraums bestehen.

Abgeleitet wird dies direkt aus Kapitel 4.3.2.1 Ziffer 3 dieses Berichts.

Handhabbarkeit

Für die Nutzungsphasen Einlagerung und Rückholbarkeit ist eine Handhabbarkeit der Behälter uneingeschränkt zu gewährleisten. Auch für den Zeitraum der Bergbarkeit muss diese unter zu erwartenden Entwicklungen des Endlagers nach /BMU 2020/ zu gewährleisten sein. Für die spätere Nachbetriebsphase ist keine Anforderung an die Handhabbarkeit mehr zu stellen, da nach dem Grundsatz der passiven Sicherheit des Endlagersystems für den verbleibenden Nachweiszeitraum keine Handhabungen mehr geplant sind.

Im Sicherheitskonzept gemäß /GRS 2014/ sind Anforderungen an die Handhabbarkeit in Kapitel 4.1.1 dieses Berichts in den Ziffern 1, 3 und 4 zu finden.

Eine tabellarische Übersicht der Behälteranforderungen für das modifizierte KBS-3-Konzept und ihre zeitliche Ausprägung findet sich in Tabelle 4-3.

Tabelle 4-3: Übersicht der grundlegenden Behälteranforderungen für die Endlagerung im Wirtsgestein Kristallin beim modifizierten KBS-3-Konzept

Grundlegende Anforderung	Nutzungsphase			
	Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	später Nachbetrieb
Einschluss des radioaktiven Inventars	Uneingeschränkt zu gewährleisten			
Abschirmung ionisierender Strahlung	Für den Endlagerbetrieb hinreichend zu gewährleisten		Für nach /BMU 2010/ wahrscheinliche oder nach /BMU 2020/ zu erwartende Entwicklungen hinreichend zu gewährleisten	
		Zur Vermeidung von radiologischen bzw. radiolytisch begünstigten Schädigungen des Buffers und weiterer Barrieren hinreichend zu gewährleisten		
Kritikalitätsausschluss	Für die reaktivste Anordnung des Kernbrennstoffs uneingeschränkt zu gewährleisten			
Temperaturbeschränkung	Für den Endlagerbetrieb hinreichend zu gewährleisten		Für nach /BMU 2010/ wahrscheinliche oder nach /BMU 2020/ zu erwartende Entwicklungen hinreichend zu gewährleisten	
		Zur Vermeidung der thermischen Schädigung weiterer Barrieren hinreichend zu gewährleisten		
Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion		Bei Kontakt mit dem hydrochemischen Milieu zur Vermeidung unzulässiger Korrosion und ggf. Gasdrücke hinreichend zu gewährleisten		
Handhabbarkeit	Hinreichend zu gewährleisten		Für nach /BMU 2010/ wahrscheinliche oder nach /BMU 2020/ zu erwartende Entwicklungen hinreichend zu gewährleisten	

4.3.3 Konzept des Multiplen ewG in Kristallin

Beim multiplen ewG ist der ewG Teil des Wirtsgesteins. Allerdings kann kein zusammenhängender ewG für die gesamte Abfallmenge ausgewiesen werden. Daher erfolgt die Ausweisung mehrerer, kleinerer Bereiche im kristallinen Gestein als einzelne ewG. Der Einschluss der Radionuklide soll durch diese Kristallinblöcke in Kombination mit technischen- und geotechnischen Barrieren erfolgen.

4.3.3.1 Zielsetzungen für die Nachverschlussphase

Im Vorhaben KONEKD /DBETEC 2017a/ wurden für das Endlagerkonzept des multiplen ewG folgende Zielsetzungen zur Erfüllung der Sicherheitsanforderungen in der Nachverschlussphase formuliert:

1. Die in vertikalen Bohrlöchern eingelagerten Abfallgebinde müssen als Teil des redundanten und diversitären Barrierensystems für den Nachweiszeitraum lösungs- und gasdicht sein. Ihre Hülle muss dementsprechend korrosionsresistent sein. Daraus lässt sich direkt eine Anforderung an den Einschluss des radioaktiven Inventars ableiten. Um die Dichtheit der Behälter zu erhalten, ist zudem die Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion zu gewährleisten.
2. Die Barrieren innerhalb des ewGs müssen für den Fall eines unbekannten Fehlers an den äußeren Verschlussbauwerken den Einschluss der Radionuklide gewährleisten. Sie müssen ebenfalls eine Funktionsdauer von 1 Mio. Jahren haben. Hieraus lässt sich ebenfalls der Einschluss des radioaktiven Inventars durch den Endlagerbehälter ableiten. Auch findet sich hier wieder der gesamte Nachweiszeitraum als Funktionsdauer.
3. Durch eine entsprechende Auslegung und Materialwahl bei den technischen Komponenten sollen die Gasentwicklung und die Gasdruckaufbaurate in den Grubenbauen des Endlagerbergwerks soweit reduziert werden, dass die Funktion der Barrieren nicht beeinträchtigt wird. Dies entspricht der Anforderung an Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion.
4. Eine Kritikalität wird durch die Einlagerungsplanung und durch entsprechende Beladung und Auslegung der Behälter in jeder Phase des Endlagerbetriebs und danach ausgeschlossen. Die Anforderung des Kritikalitätsausschlusses wird hier abgeleitet.
5. Der Endlagerbehälter wird im Bohrloch durch geeignete technische Maßnahmen (z. B. Liner) vor auslegungsüberschreitenden Einwirkungen geschützt.
6. Risiko und Auswirkungen eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Endlager (Human Intrusion) sollen durch entsprechende Planung des Endlagers nach Möglichkeit reduziert werden. Dafür zutreffende Maßnahmen dürfen keine negativen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit haben. Sich aus Human-Intrusion-Szenarien möglicherweise ergebende Behälteranforderungen lassen sich zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abschätzen.

4.3.3.2 Nachweiskonzept für den multiplen ewG

Beim Konzept des multiplen ewG werden die Einlagerungsbereiche auf separate ewG-Komponenten verteilt. Diese liegen jeweils in trockenem oder ungeklüftetem Kristallingestein. Ein Integritätsnachweis ist demnach für Kristallingestein zu führen. Ähnlich zu Tonstein oder Steinsalz kann dieser über die Kriterien Dilatanz, Fluiddruck und Temperatur geführt werden /DBE-TEC 2016a/.

Da ein Zugang zu den Einlagerungsbereichen geschaffen werden muss und für die entsprechenden Verschlussbauwerke nicht die gleiche Integrität wie für das Wirtsgestein anzunehmen ist, muss ebenfalls die Integrität der technischen Barrieren nachgewiesen werden. Da der Behälter als Teil des redundanten und diversitären Barrierensystems ausgewiesen ist, muss ein Integritätsnachweis über diesen geführt werden /DBETEC 2017a/. Für den Nachweis ist der entsprechende Nachweiszeitraum noch festzulegen. Dadurch ergeben sich die geforderte Behälterstandzeit und der Zeitraum in dem der Einschluss des radioaktiven Inventars gewährleistet sein muss.

4.3.3.3 Zeitliche Einordnung der Behälteranforderungen für den multiplen ewG

Die zeitliche Einordnung der Behälterfunktionen für den multiplen ewG entspricht auf Grund der als ähnlich anzunehmenden Betriebsbedingungen und der ebenfalls für den gesamten Nachweiszeitraum zu fordernden Einschlussfunktion der Endlagerbehälter weitgehend der unter Kapitel 4.3.2.3 dieses Berichts für das modifizierte KBS-3-Konzept erläuterten. Für das Konzept des multiplen ewG sollte überprüft werden, ob durch eine erfolgreiche Ausweisung eines ewG auf die strengen Anforderungen für den Endlagerbehälter bezüglich des Einschlusses verzichtet werden kann. Dadurch wäre eine kürzere, nachzuweisende Behälterlebensdauer möglich. Der Einschluss des radioaktiven Inventars ist auf jeden Fall während der Nutzungsphasen Einlagerung und Rückholbarkeit sicherzustellen. Für die Bergbarkeitsphase ist der Einschluss der Abfälle unter zu erwartenden Entwicklungen des Endlagers zu gewährleisten. Weitere Anforderungen in der späteren Nachbetriebsphase sollten überprüft werden. Falls eine Ausweisung eines ewG oder mehrerer ewG erfolgreich sein sollte, ist ein Verzicht auf die Einschlussanforderung in der späteren Nachbetriebsphase vorstellbar.

Die beim modifizierten KBS-3-Konzept formulierten Anforderungen zum Schutz des Buffers können für den multiplen ewG nach den bislang angestellten Überlegungen entfallen, da die Verwendung eines Buffers in diesem Fall nicht vorgesehen wurde. Allerdings sollten die dort genannten Anforderungen bezüglich der Abschirmung ionisierender Strahlung und der Temperaturbeschränkung nunmehr zum Schutz der Integrität des Wirtsgesteins und der weiteren geotechnischen Barrieren verstanden werden.

Eine vollständige Übersicht über die zeitliche Einteilung der Behälteranforderungen beim Konzept des multiplen ewG ist in Tabelle 4-4 dargestellt.

Tabelle 4-4: Übersicht der grundlegenden Behälteranforderungen für die Endlagerung im Wirtsgestein Kristallin für das Konzept des multiplen ewG

Grundlegende Anforderung	Nutzungsphase			
	Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	später Nachbetrieb
Einschluss des radioaktiven Inventars	Uneingeschränkt zu gewährleisten		Für nach /BMU 2010/ wahrscheinliche oder nach /BMU 2020/ zu erwartende Entwicklungen hinreichend zu gewährleisten	Anforderungen abhängig vom ewG
Abschirmung ionisierender Strahlung	Für den Endlagerbetrieb hinreichend zu gewährleisten		Für nach /BMU 2010/ wahrscheinliche oder nach /BMU 2020/ zu erwartende Entwicklungen hinreichend zu gewährleisten	
		Zur Vermeidung von radiologischen bzw. radiolytisch begünstigten Schädigungen der weiteren Barrieren hinreichend zu gewährleisten		
Kritikalitätsausschluss	Für die reaktivste Anordnung der Kernbrennstoffe uneingeschränkt zu gewährleisten			
Temperaturbeschränkung	Für den Endlagerbetrieb hinreichend zu gewährleisten		Für nach /BMU 2010/ wahrscheinliche oder nach /BMU 2020/ zu erwartende Entwicklungen hinreichend zu gewährleisten	
		Zur Vermeidung der thermischen Schädigung der weiteren Barrieren hinreichend zu gewährleisten		
Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion		Bei Kontakt mit dem hydrochemischen Milieu zur Vermeidung unzulässiger Korrosion und Gasdrücke hinreichend zu gewährleisten		
Handhabbarkeit	Hinreichend zu gewährleisten		Für nach /BMU 2010/ wahrscheinliche oder nach /BMU 2020/ zu erwartende Entwicklungen hinreichend zu gewährleisten	

4.3.4 Konzept des überlagernden ewG

Beim Konzept des überlagernden ewG (siehe Vorhaben KONEKD /DBETEC 2017a/) befinden sich nur die Einlagerungsbereiche im kristallinen Gestein. Dieses ist durch Steinsalz oder Tonstein überlagert. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich wird dann durch diese Schicht gebildet. An das Wirtsgestein Kristallin werden hierbei keine Anforderungen hinsichtlich seiner Integrität und Barrierenwirksamkeit gestellt.

4.3.4.1 Zielsetzungen für die Nachverschlussphase

Folgende Zielsetzungen wurden im Vorhaben KONEKD /DBETEC 2017a/ für das Sicherheitskonzept in der Nachverschlussphase formuliert:

1. Der langzeitsichere Einschluss der Radionuklide muss durch einen Teil des Deckgebirges mit sehr geringer hydraulischer Leitfähigkeit gewährleistet werden. Diese Deckgebirgsschichten müssen tiefer als die zu erwartende größte Tiefe der integritätsverletzenden Auswirkungen exogener Prozesse liegen. Ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich im Deckgebirge muss vorhanden sein.
2. Die Abfallgebinde und evtl. der Buffer müssen die Radionuklide für den Zeitraum bis zur vollständigen Wirksamkeit der Schachtverschlüsse einschließen. Dies entspricht der Behälteranforderung des Einschlusses des radioaktiven Inventars. Diese ist damit auch über die Anforderungen des Einlagerungsbetriebs und der Anforderungen von Rückholbarkeit und Bergbarkeit hinaus zu gewährleisten. Die genaue Zeitliche Begrenzung der Einschlussfunktion der Endlagerbehälter kann zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht erfolgen, sie muss aber mindestens bis zum Ende der Nutzungsphase Bergbarkeit erfolgen.
3. Gasentwicklung und Gasdruckaufbauraten in den Grubenbauen sollen durch eine entsprechende Auslegung und Materialwahl bei den technischen Komponenten soweit reduziert werden, dass die Funktion der Schachtverschlüsse nicht beeinträchtigt wird. Dies entspricht der Anforderung an Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion.
4. Eine Kritikalität ist durch die Einlagerungsplanung und durch entsprechende Beladung und Auslegung der Einlagerungsbehälter in jeder Phase des Endlagerbetriebs und danach auszuschließen. Dies entspricht der Anforderung des Kritikalitätsausschlusses.
5. Risiko und Auswirkungen eines möglichen unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Endlager (Human Intrusion) werden durch entsprechende Auslegung des Endlagers nach Möglichkeit reduziert. Die dafür zutreffenden Maßnahmen dürfen keine negativen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit haben. Mögliche weitere Behälteranforderungen dadurch lassen sich zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abschätzen.

4.3.4.2 Nachweiskonzept für den überlagernden ewG

Bei diesem Konzept werden die Behälter in Einlagerungsbereichen innerhalb einer Formation aus kristallinem Gestein platziert. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich wird von einer sedimentären Überdeckung aus Steinsalz oder Tonstein gebildet. Diese ist als barrierewirksam nachzuweisen und soll die Radionuklide im darunterliegenden Einlagerungsbereich einschließen. Hierzu muss nachgewiesen werden, dass diese Schicht über den Nachweiszeitraum erhalten bleibt. Dieser Integritätsnachweis ist hier daher nicht für kristallines Gestein zu führen, sondern vergleichbar zu den Vorhaben VSG /GRS 2012a/ oder ANSICHT /GRS 2014/ für Steinsalz oder Tonstein.

Für das Konzept des überlagernden ewG ist kein Nachweis über die Einschlussfunktion des Behälters für den gesamten Nachweiszeitraum zu führen. Der Einschluss des radioaktiven Inventars durch den Behälter ist für die betrieblichen Anforderungen aus Einlagerung, Rückholung oder Bergung zu gewährleisten. Zudem muss sichergestellt sein, dass das radioaktive Inventar durch Behälter oder Buffermaterialien bis zur vollständigen Wirksamkeit der Schachtverschlüsse eingeschlossen wird. Der Zeitraum dieser Anforderung ist mit der Auslegung der Schachtverschlüsse noch genauer zu spezifizieren /DBETEC 2017a/ und kann bis in die spätere Nachbetriebsphase reichen.

4.3.4.3 Zeitliche Abhängigkeit der Behälterfunktionen für den überlagernden ewG

Hier soll die unter 2.4 erstellte zeitliche Abhängigkeit der generischen Behälterfunktionen für das Konzept des überlagernden ewG spezifiziert werden.

Einschluss des radioaktiven Inventars

Der Endlagerbehälter hat für die Nutzungsphasen der Einlagerung, Rückholbarkeit und Bergbarkeit den Einschluss der Abfälle zu gewährleisten. Dies hat betriebliche Gründe und stellt sicher, dass die in diesen Zeiträumen geplanten Arbeiten durchgeführt werden können. Beim überlagernden ewG erfolgt die Nachweisführung für die Langzeitsicherheit über den ausgewiesenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich in den überlagernden Sedimenten. Daher kann auf eine Einschlussfunktion des Behälters in der späteren Nachbetriebsphase verzichtet werden. Allerdings wird in den Zielsetzungen für die Nachverschlussphase gefordert, dass die Behälter bis zum vollen Wirksamwerden der Schachtverschlüsse den Einschluss der Radionuklide sicherstellen. Eine genaue zeitliche Angabe der Einschlussforderung hat noch bei der Auslegung der geotechnischen Verschlussbauwerke zu erfolgen.

Die Anforderungen für die Zeiträume Einlagerung, Rückholbarkeit und Bergbarkeit finden sich in Kapitel 4.1.1 dieses Berichts in den Ziffern 1, 3 und 4. Die Ausführungen zum Einschluss in der späteren Nachbetriebsphase finden sich in Kapitel 4.3.4.1 Ziffer 2 und im Nachweiskonzept in Kapitel 4.3.4.2.

Abschirmung ionisierender Strahlung

Die hinreichende Abschirmung ionisierender Strahlung ist für die Nutzungsphasen Einlagerung, Rückholbarkeit und Bergbarkeit durch den Endlagerbehälter zu gewährleisten. Dadurch werden der Betrieb des Endlagers und der mögliche Aufenthalt von Personal in Behälternähe sichergestellt. Durch eine weitere Anforderung bezüglich der Abschirmung ist zudem die Schädigung des Behälters durch Radiolyse auszuschließen. Dies hat bis zur vollständigen Wirksamkeit der Schachtverschlüsse zu erfolgen. Eine Schädigung weiterer Barrieren durch die Wirkung ionisierender Strahlung ist beim Konzept des überlagernden ewG nicht erforderlich. Grund dafür ist die Einlagerung außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und der Abstand der Einlagerungsbereiche zu den Verschlussbauwerken und weiteren Barrieren.

Die Anforderungen für die dem Endlagerbetrieb zugehörigen Zeiträume können Kapitel 4.1.1 unter den Ziffern 2, 3 und 4 entnommen werden.

Kritikalitätsausschluss

Als grundlegende Sicherheitsanforderung sind selbsterhaltende nukleare Kettenreaktionen auszuschließen. Es ist daher für den gesamten Nachweiszeitraum der Kritikalitätsausschluss durch den Endlagerbehälter zu gewährleisten. Dieser hat dabei nach /BMU 2020/ für die jeweils reaktivste Anordnung des Kernbrennstoffes unter Berücksichtigung des Eindringens wässriger Lösungen in das Endlagergebäude zu erfolgen.

Der Kritikalitätsausschluss entspricht Kapitel 4.3.4.1 Ziffer 4.

Temperaturbeschränkung

Die Beschränkung der Oberflächentemperatur des Endlagerbehälters ist zunächst für die Handhabung der Behälter und den Endlagerbetrieb zu gewährleisten. Dies gilt für die Nutzungsphasen der Einlagerung, sowie die mögliche Wiederaufnahme des Endlagerbetriebs für Rückholung und später mögliche Bergung. Beim Konzept des überlagernden ewG befinden sich die Einlagerungsbereiche nicht innerhalb des ewG. Durch ausreichenden Abstand der Einlagerungsbereiche von den überlagernden, einschlusswirksamen Sedimentschichten können schädigende Temperatureffekte auf diese ausgeschlossen werden. Auf eine Beschränkung der Oberflächentemperatur der Behälter zum Schutze des ewG und weiterer Barrieren kann daher verzichtet werden. Eine Anforderung an die Temperaturbeschränkung ergibt sich daher nur aus betrieblichen Gründen.

Die Anforderungen an die Temperaturbeschränkung können in Kapitel 4.1.1 Ziffer 6 für die Endlagerung im Steinsalz gefunden werden. Für das Konzept des überlagernden ewG sind allerdings nur die Ausführungen für den Endlagerbetrieb maßgeblich.

Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion

In Kristallingestein ist mit Vorhandensein von Wässern und Lösungen zu rechnen. Beim Konzept des überlagernden ewG liegt das Hauptaugenmerk auf der Vermeidung einer unzulässigen Korrosion um die Einschlussfunktion bis zur vollständigen Wirksamkeit der Schachtverschlüsse und die Handhabbarkeit der Endlagerbehälter bis zum Ablauf der Bergbarkeitsphase zu erhalten. Die Verringerung der Gasproduktion spielt hier nur eine untergeordnete Rolle. Da dem Kristallingestein hier keine Einschlussfunktion zugewiesen wird, kann von geklüftetem

Gestein ausgegangen werden. Daher ist ein hohes Speichervolumen für Gase vorhanden, sodass ein Druckaufbau nicht auftritt. Es kann daher auf eine Behälteranforderung bezüglich der Gasdruckentwicklung verzichtet werden. Die aus Kapitel 4.3.4.1 Ziffer 3 abgeleitete Anforderung ist damit ohne weitere Maßnahmen erfüllt.

Handhabbarkeit

Für die Nutzungsphasen Einlagerung und Rückholbarkeit ist eine Handhabbarkeit der Behälter uneingeschränkt zu gewährleisten. Auch für den Zeitraum der Bergbarkeit muss diese unter zu erwartenden Entwicklungen des Endlagers nach /BMU 2020/ gewährleistet sein. Nach Ablauf der Bergbarkeitsphase bestehen keine Anforderungen an die Handhabbarkeit der Endlagergebinde mehr, da entsprechend dem Grundsatz der passiven Sicherheit des Endlagersystems für den verbleibenden Nachweiszeitraum keine Handhabungen mehr in Betracht kommen.

Im Sicherheitskonzept gemäß /DBETEC 2017a/ sind Anforderungen an die Funktion Handhabbarkeit in Kapitel 4.1.1 dieses Berichts in den Ziffern 1, 3 und 4 zu finden.

Eine vollständige Übersicht über die zeitliche Abhängigkeit der Behälteranforderungen für das Konzept des überlagernden ewG zeigt Tabelle 4-5.

Tabelle 4-5: Übersicht der grundlegenden Behälteranforderungen für die Endlagerung im Wirtsgestein Kristallin für das Konzept des überlagernden ewG

Grundlegende Anforderung	Nutzungsphase			
	Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	später Nachbetrieb
Einschluss des radioaktiven Inventars	Uneingeschränkt zu gewährleisten		Für nach /BMU 2010/ wahrscheinliche oder nach /BMU 2020/ zu erwartende Entwicklungen hinreichend zu gewährleisten	Bis zur vollständigen Funktionstüchtigkeit der Schachtverschlüsse zu gewährleisten
Abschirmung ionisierender Strahlung	Für den Betrieb hinreichend zu gewährleisten		Für nach /BMU 2010/ wahrscheinliche oder nach /BMU 2020/ zu erwartende Entwicklungen hinreichend zu gewährleisten	
		Zur Vermeidung von radiologischen bzw. radiolytisch begünstigten Schädigungen des Behälters hinreichend zu gewährleisten		
Kritikalitätsausschluss	Für die reaktivste Anordnung des Kernbrennstoffs uneingeschränkt zu gewährleisten			
Temperaturbeschränkung	Für den Betrieb hinreichend zu gewährleisten		Für nach /BMU 2010/ wahrscheinliche oder nach /BMU 2020/ zu erwartende Entwicklungen hinreichend zu gewährleisten	
Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion		Bei Kontakt mit dem geochemischen Milieu zur Vermeidung unzulässiger Korrosion hinreichend zu gewährleisten		
Handhabbarkeit	Hinreichend zu gewährleisten		Für nach /BMU 2010/ wahrscheinliche oder nach /BMU 2020/ zu erwartende Entwicklungen hinreichend zu gewährleisten	

4.3.5 Endlager- und Behälterkonzepte für das Wirtsgestein Kristallin

Für die Endlagerung im Wirtsgestein Kristallin wurden im Vorhaben KONEKD /DBETEC 2017a/ die folgenden Endlager- und Behälterkonzepte betrachtet:

- Die vertikale Bohrlochlagerung von kupferummantelten Brennstabkokillen für das modifizierte KBS-3-Konzept
- Die vertikale Bohrlochlagerung von kupferbeschichteten, rückholbaren Kokillen für den multiplen ewG
- Die Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern für den überlagernden ewG

Modifiziertes KBS-3-Konzept

Als Endlagerbehälter für das modifizierte KBS-3-Konzept wurde die ursprünglich für die Endlagerung im Steinsalz entwickelte Brennstabkokille ausgewählt. Diese soll mit einer geschmiedeten Kupferhülle versehen werden. Die Kupferhülle soll angelehnt an das skandinavische KBS-3-Konzept eine Wandstärke von 5 cm haben. Ursprünglich ist ein Traggilz am Deckel der BSK zur Handhabung vorgesehen. Da die Kupferummantelung für den Traggilz schwer zu realisieren ist, ist dieser zu ersetzen. Eingelagert werden sollen die kupferummantelten Kokillen in einem unverrohrten Bohrloch. In dieses wird zunächst ein Buffer aus Bentonitringen eingebracht. Dieser soll den Endlagerbehälter vor mechanischen Einwirkungen schützen, den Lösungszutritt verzögern und das Bohrloch mechanisch stabilisieren. Zudem soll der Buffer für eine Stabilisierung des hydrochemischen Milieus sorgen. Für den Transport der Kokillen ist ein Transferbehälter erforderlich. Weitere Informationen zum Endlagerkonzept, dem Endlagerbehälter und dem zugrundeliegenden KBS-3-Konzept sind in den Arbeitspaketberichten /BAM 2020/ und /BGETEC 2020/ zu finden.

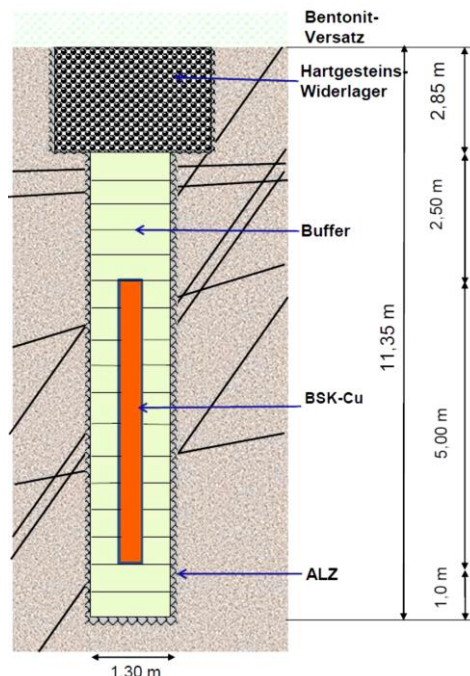


Abbildung 4-6: Einlagerungsschema für das modifizierte KBS-3-Konzept /DBETEC 2017a/

Multipler ewG Konzept

Beim multiplen ewG-Konzept sollen rückholbare Brennstabkokillen eingesetzt werden. Diese sollen hierzu mit einer ca. 5 mm starken Kupferbeschichtung versehen werden. Auch hier müsste der Tragpilz auf Grund der Kupferbeschichtung ersetzt werden. Eingelagert werden sollen die Kokillen in einem verrohrten Bohrloch. Dieses soll anschließend mit rieselfähigem Quarzsand versetzt werden. Der Liner soll dann verschlossen und das Bohrloch mit einem Bentonit-Dichtelement verschlossen werden. Für den Transport der Kokillen wird auch hier ein Transferbehälter notwendig sein. Weitere Informationen zum Endlagerkonzept sind in den Arbeitspaketberichten /BAM 2020/ und /BGETEC 2020/ zu finden.

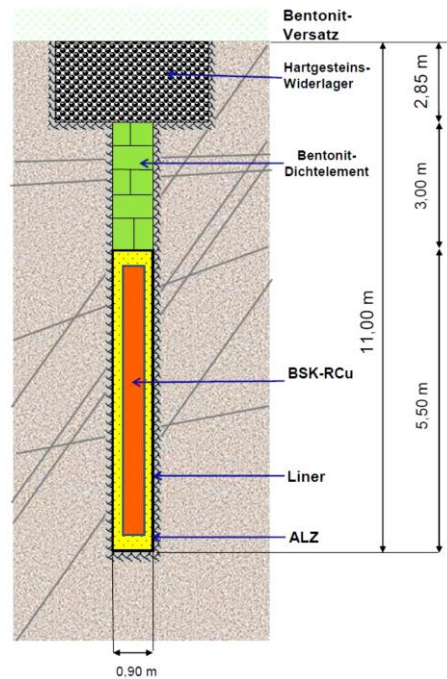


Abbildung 4-7: Einlagerungsschema für das multiple ewG-Konzept /DBETEC 2017a/

Überlagernder ewG-Konzept

Beim überlagernden ewG-Konzept sollen die Behälter in Form der Streckenlagerung eingelagert werden. Dazu sollen POLLUX®-Behälter vom Typ POLLUX®-3 (kann Brennstäbe von 3 DWR-BE aufnehmen) verwendet werden. Diese sollen in den Strecken auf vorbereiteten Bentonit-Auflagern abgelegt und dann mit Bentonit Granulat versetzt werden. POLLUX®-Behälter sind generell abschirmend konzipiert. Die im Vorhaben KONEKD vorgesehenen POLLUX®-3-Behälter haben eine Masse von geschätzt 38 Mg und einen Durchmesser von 1200 mm. Weitere Informationen zum Endlagerbehälter POLLUX® sowie zum Endlagerkonzept sind in den Arbeitspaketberichten zum AP1 /BAM 2020/ und zum AP2 /BGETEC 2020/ zu finden.

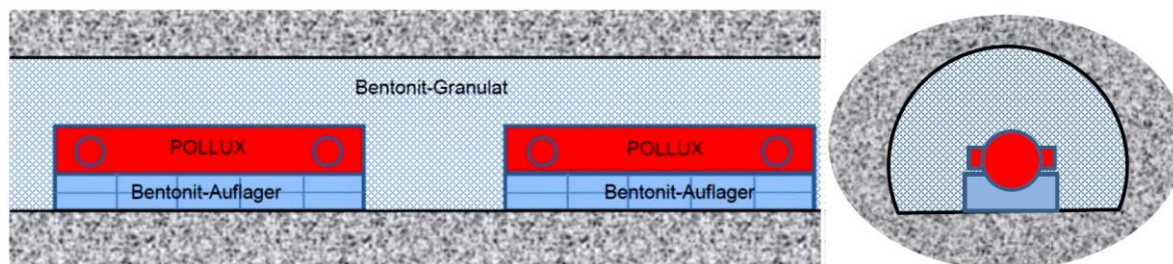


Abbildung 4-8: Einlagerungsschema für das überlagernde ewG-Konzept /DBETEC 2017a/

5 Quantifizierung der Einwirkungen auf Endlagerbehälter

In Kapitel 3 wurden mögliche Einwirkungen auf Endlagerbehälter beschrieben und in Kapitel 3.2 hinsichtlich der zeitlichen Ausprägungen generisch eingeordnet. Eine Klassifizierung bezogen auf die unterschiedlichen Wirtsgesteine und Endlagerkonzepte ist noch nicht erfolgt. Dies soll in diesem Kapitel bearbeitet werden. Dabei ist eine allgemeingültige quantifizierte Aufstellung der Einwirkungen auf Endlagerbehälter schwierig. Daher soll in entsprechenden Fällen beispielhaft auf Annahmen aus abgeschlossenen Forschungsvorhaben oder aus bereits ausgeführten Behälterauslegungen zurückgegriffen werden. Die Quantifizierung der Einwirkungen erfolgt hier anhand der in den Kapiteln 4.1.5, 4.2.5 und 4.3.5 beschriebenen Endlager- und Behälterkonzepte. Viele der genannten Einwirkungen sind zudem abhängig vom Endlagerstandort und dem verwendeten Behälterkonzept. Für eine zielgerichtete zukünftige Endlagerbehälterentwicklung sind daher auch die Kenntnisse vom Standort und später Erkenntnisse aus der Standorterkundung maßgeblich.

5.1 Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern im Steinsalz

Für die Streckenlagerung im Steinsalz sollen im Endlagerkonzept nach VSG POLLUX®-Behälter verwendet werden. Diese wurden für die Einlagerung in einem Salzstock ausgelegt, und ein Prototyp wurde gefertigt. Für die POLLUX®-Behälter wurde die notwendige Transport- und Handhabungstechnik entwickelt und in Handhabungsversuchen als Stand der Technik nachgewiesen. Die Korrosion der Materialien des POLLUX® ist in Labor- und in-situ Versuchen untersucht worden. Für die Ableitung der Einwirkungen auf den POLLUX®-Behälter konnte daher auf eine Vielzahl von Quellen zurückgegriffen werden. Die Einwirkungen werden zunächst Erläutert und sind dann in Tabelle 5-3 bis Tabelle 5-14 aufgeführt.

5.1.1 Mechanische Einwirkungen

5.1.1.1 Statische Einwirkungen

Scherkräfte

Neben dem Gebirgsdruck können Scherkräfte auf den Behälter einwirken. Diese sind auf Grund der Anisotropie und der Abhängigkeit von der konkreten Endlagerauslegung zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht quantifizierbar.

Isotrope Drücke

Als Einwirkung soll hier der Gebirgsdruck im Salzstock (beispielhaft für den Standort Gorleben) verwendet werden. Der lithostatisch isotrope Gebirgsdruck P in der Einlagerungsteufe lässt sich nach folgender Formel abschätzen:

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (1)$$

Dabei ist ρ die mittlere Dichte des überlagernden Gebirges, g die Erdbeschleunigung und h die Einlagerungsteufe. Für den Standort Gorleben wurde in /GRS 2012b/ eine Dichte von 2.200 kg/m^3 angesetzt. Für die Einlagerungssohle in 870 m Teufe ergibt sich daraus ein abgeschätzter lithostatischer Gebirgsdruck von 18,8 MPa. Für zukünftige Standorte im Steinsalz ist der maßgebliche Gebirgsdruck im Rahmen der Standorterkundung zu ermitteln.

Der maximal auftretende innere Überdruck im POLLUX®-Behälter ist in /DWK 1986/ konservativ mit 6 bar (= 600 kPa) angegeben. Dieser gilt bei der Annahme eines vollständigen Versagens der Brennstabhüllrohre und Ausströmen der gasförmigen Spaltprodukte in den Innenraum. Der zu erwartende Innendruck bei vollständigem Hüllrohrversagen ist für die Charakteristik der möglichen Beladungen zu verifizieren.

Ein weiterer isotroper Druck wird durch den Wärmeeintrag der Behälter in das Wirtsgestein entstehen. Von einer Erhöhung des Gebirgsdrucks durch die Überlagerung des Wärmeeintrags mehrerer eingelagerter Behälter ist auszugehen. Eine Quantifizierung der entstehenden Wärmespannungen hat bisher nicht stattgefunden. Weiterhin ist von Wärmespannungen direkt im Material des Behälters auszugehen. Auch diese wurden bislang nicht quantifiziert.

Anisotrope Drücke

Das Vorkommen anisotroper Gebirgsdrücke durch Temperatureinwirkungen ist möglich. Zum jetzigen Zeitpunkt ist dieser noch nicht abschätzbar.

Handhabungslasten

Handhabungslasten entstehen hauptsächlich durch die Anschlagslasten bei der Handhabung. Da die im Behälter auftretenden Spannungen im Vorhaben nicht bestimmt werden konnten, wird zur Beschreibung auf die angreifenden Lasten zurückgegriffen. Die Handhabungslasten sind dabei abhängig von der Behältermasse und den verwendeten Handhabungsvorrichtungen.

Laut /GRS 2011b/ wird für den POLLUX®-Behälter eine maximale Masse von 65 Mg angesetzt. Die Handhabung des Behälters mit dem Brückenkran in den Tagesanlagen und der Einlagevorrichtung in den Strecken erfolgt an den vier Tragzapfen. Aus der Behältermasse ergibt sich durch Multiplikation mit der Erdbeschleunigung eine Gewichtskraft F_G von maximal 640 kN. Dies entspricht bei gleichmäßiger Lastverteilung auf die Tragzapfen einer maximalen Belastung von 160 kN pro Tragzapfen. Die Nutzung der Tragzapfen ist nur für die Einlagerung vorgesehen.

Für die Auslegung der Tragzapfen sei auf den zu berücksichtigenden Hublastbeiwert ψ nach /KTA 2012/ verwiesen. Die Tragzapfen der Behälter gelten als Lastanschlagpunkte mit erhöhten Anforderungen. Für diese beträgt der Hublastbeiwert 1,8. Die auftretenden Lasten sind mit diesem Wert zu multiplizieren. Für die Auslegung der Tragzapfen ist daher von einer Belastung von 288 kN pro Tragzapfen auszugehen.

In /GRS 2012b/ wird das Rückholungskonzept für den POLLUX®-Behälter nach VSG beschrieben. Dabei wird der freigelegte Behälter in die Rückholungsstrecke gezogen. Angeschlagen wird der Behälter an den Tragzapfen. Alternativ kann ein Seil um den Behälter geschlungen

werden. Der Reibungskoeffizient μ zwischen Behälter und Streckensohle wird mit 0,27 angenommen. Damit ergibt sich eine wirkende Reibungskraft von 172,3 kN. Im Forschungsvorhaben ERNESTA wurden die Rückholungskonzepte für Behälter aus der Streckenlagerung im Steinsalz überarbeitet. Die Rückholung des Behälters soll nun durch eine modifizierte Einlagerungsvorrichtung mit Raupenfahrwerk erfolgen. Diese wurde im FuE-Vorhaben ERNESTA ausgelegt. Die Aufnahme des Behälters geschieht mittels einer Greifzange. Die Tragzapfen des Behälters werden dabei nicht mehr verwendet, der Lastangriff erfolgt direkt am Behältermantel. Dabei werden im ungünstigsten Fall des Anhebens nur mittels der Spitzen der Zange Linienlasten in den Behälter eingeleitet. Diese betragen nach /SIEMAG 2016/ vertikal 406,25 kN/m und horizontal 247,65 kN/m. Dieser ungünstige Lastfall wird als abdeckend für andere mögliche Lastfälle angenommen.

Für eine mögliche Bergung wird von Verwendung der gleichen Technik wie zur Rückholung ausgegangen. Daher sind die zu berücksichtigenden Handhabungslasten identisch anzunehmen.

5.1.1.2 Dynamische Einwirkungen

Dynamische Lasten treten nur während der Handhabungsvorgänge auf.

Beschleunigung

Die zum Transport der POLLUX®-Behälter in das Bergwerk vorgesehene Schachtförderanlage hat eine Anfahrbeschleunigung und Bremsverzögerung von $0,5 \text{ m/s}^2$ /DBE 1994/.

Die durch die weiteren Handhabungsvorrichtungen entstehenden Beschleunigungen konnten nicht quantifiziert werden. Hierfür wird davon ausgegangen, dass die im Normalbetrieb zu erwartenden Beschleunigungen durch die Annahmen für Betriebsstörungen abgedeckt werden.

Für den Fall von Betriebsstörungen ist von einer max. vertikalen Beschleunigung von 1 g beim Schachttransport auszugehen /DBE 1994/. Dies entspricht der Bremsverzögerung der SELDA-Anlage im Fall des Übertreibens.

Als weitere mögliche Betriebsstörung wird in /DBETEC 2008c/ der Aufprall zweier Plateauwagen Puffer an Puffer genannt. Dabei wird eine maximale Beschleunigung von 1,4 g auf den Behälter wirksam.

Für den Lastfall Erdbeben in der übertägigen Handhabung wird in /DBETEC 2008c/ die folgenden Beschleunigungen genannt: Horizontale Beschleunigung mit $\pm 0,2 \text{ g}$, vertikale Beschleunigung von $\pm 0,1 \text{ g}$. Bei der untertägigen Handhabung wurden bislang keine Lasten aufgrund von Erdbeben unterstellt.

Vibrationen

Auf den POLLUX®-Behälter einwirkende Vibrationen sind abhängig von der Art des Transportes. Bisher wurden die Vibrationen nicht quantifiziert. Daher wird für diesen Bericht auf die Fahrgeschwindigkeiten der Transportmittel verwiesen. Diese können Vibrationen hervorrufen.

Bei der Schachtförderung erfolgt der Transport der Behälter mittels der Schachtförderanlage mit einer maximalen Geschwindigkeit von 5 m/s /DBE 1994/. Der Transport der Behälter in den Richtstrecken erfolgt mittels Plateauwagen und Batterielokomotive. Die Geschwindigkeit ist auf 10 km/h in gerader Strecke und 5 km/h in Kurven begrenzt /DBE 1995/. Aufnehmen und Absenken des Behälters durch die Einlagerungsvorrichtung erfolgt mit maximal 0,25 m/min. Auf Grund vergleichbarer Technik, werden die Einwirkungen für die Zeiträume Einlagerung, Rückholbarkeit und Bergbarkeit als gegeben betrachtet. Die konzipierte modifizierte Einlagerungsvorrichtung zur Rückholung der Behälter bewegt sich mit einer maximalen Fahrgeschwindigkeit von 0,5 m/s innerhalb der Rückholungstrecken /SIEMAG 2016/.

Schläge / Stöße

Schläge und Stöße entstehen vor allem beim Ablegen des Behälters. Dies geschieht wie schon beschrieben mit einer Geschwindigkeit von 0,25 m/min durch die Einlagerungsvorrichtung.

Weitere Schläge oder Stöße ergeben sich als Folge von angenommenen Behälterabstürzen. Als zugehörige Einwirkungen wird analog zur Auslegung als Typ B(U) Versandstück nach ADR von folgenden Lastfällen ausgegangen:

- Fall des Behälters aus 9 m Höhe auf eine Aufprallplatte
- Fall des Behälters aus 1 m Höhe auf einen Dorn. Durchmesser des Dorns 15 cm, Dornlänge 20 cm
- Aufprall einer 500 kg schweren Platte aus 9 m Höhe auf den Behälter

Diese Lastfälle dienen zum Nachweis der Widerstandsfähigkeit bei Unfällen im Rahmen des Behältertransportes. Dabei sind die Behälter mit Stoßdämpfern ausgestattet.

Nach der Anlieferung der Behälter am Endlagerstandort werden die Stoßdämpfer entfernt. Bei der übertägigen Handhabung kann nach /DBETEC 2008c/ eine Fallhöhe von maximal 3 m angenommen werden. Der Aufprall der Behälter in den übertägigen Anlagen erfolgt auf Beton. Untertägig wird eine maximale Fallhöhe von 0,95 m angenommen. Hier fällt der Behälter auf die Salzsohle. Dabei wurde in /DBETEC 2008c/ angenommen, dass die Salzsohle einem Beton der damals gültigen Festigkeitsklasse B20 entspricht.

5.1.2 Thermische Einwirkungen

Für die thermische Leistung des zur Endlagerung bereitstehenden Behälters wird von DWR-Referenzbrennelementen mit einer Zusammensetzung von 89 % UO_2 zu 11 % MOX ausgegangen. Bei einer Zwischenlagerzeit von 57 Jahren hat das Referenzbrennelement eine thermische Leistung von ca. 0,6 kW /DBETEC 2016b/. Für den mit den Brennstäben von zehn

Brennelementen beladenen POLLUX®-Behälter ergibt sich eine thermische Behälterleistung von ca. 6 kW. Diese Wärmeleistung ist abdeckend für andere ausgediente Brennelemente aus SWR und WWER, für die Brennelemente aus Forschungs- und Prototypreaktoren und die wärmeentwickelnden Abfälle aus der Wiederaufarbeitung.

Außerplanmäßige thermische Einwirkungen entstehen vor allem aus möglichen Brandfällen. In /DBE 1995/ ist der Brandfall bei Kollision unter Tage als mögliche Einwirkung auf den Behälter betrachtet worden. Dabei tritt eine Kollision des gleisgebundenen Transportzuges aus Plateauwagen mit Behälter und Batterielokomotive und einem gleislosen Versatzfahrzeug auf. Anschließend geraten die beteiligten Fahrzeuge in Brand. Die auftretende Brandlast besteht überwiegend aus der Bereifung und den Betriebsstoffen des Versatzfahrzeuges. Aus dieser Brandlast wurde rechnerisch eine einwirkende Brandtemperatur von 720 °C für 20 Minuten bestimmt. Zusätzlich sind Versuchsergebnisse zu untertägigen Fahrzeugbränden angegeben, bei diesen ist es zu Temperaturen bis zu 950 °C und Einwirkungsauern von ca. 40 min bis 50 min gekommen. Untertägige Brandfälle sind vor allem von den vorhandenen Brandlasten abhängig. Werden diese reduziert, ergeben sich für den Endlagerbehälter geringere mögliche Einwirkungen.

Die Gebirgstemperatur am Standort Gorleben beträgt 37,97 °C im Bereich der Erkundungssohle bei 840 m Teufe /GRS 2012b/. Der vertikale Temperaturgradient wird mit 2,35 K/100 m angegeben. Für andere Standorte ist die Gebirgstemperatur bei der Standorterkundung zu ermitteln.

5.1.3 Radiologische Einwirkungen

5.1.3.1 Materialversprödung durch Strahlung

Durch die radioaktive Strahlung können die metallischen Behältermaterialien verspröden. Sicherheitsrelevante Schäden sind bei Stählen ab einer Neutronenfluenz von 10^{18} n/cm² zu erwarten /POSIVA 2012/. Ein Auftreten dieser Neutronenfluenz bei geplanten Inventaren ist noch zu ermitteln.

5.1.3.2 Zersetzung von Organika

Die Zersetzung des Neutronenmoderators aus Polyethylen durch die Bestrahlung ist möglich. In /KFK 1994/ wird für Polyethylen ein Bereich von 3×10^5 Gy bis 3×10^6 Gy angegeben. Oberhalb dieser Dosis sollen sich die Materialeigenschaften merklich verschlechtern. Grund dafür sei Kettenbruch der Polymermoleküle. Ein Vergleich der vorhandenen Dosis am Behälter mit diesen Werten ist noch nicht erfolgt.

5.1.4 Chemische Einwirkungen

5.1.4.1 Korrosionsprozesse

Zum Korrosionsverhalten der Behältermaterialien des POLLUX®-Behälters unter Umgebungsbedingungen im Steinsalz wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Eine Auflistung ermittelter Abtragsraten und der Umgebungsbedingungen wird hier, aufgeteilt für die Einzelbehälter des POLLUX®-Konzeptes, gegeben. Allgemein kann für die verwendeten Werkstoffe angegeben werden, dass Korrosion nur als gleichmäßige Flächenkorrosion zu erwarten ist. Lokale Effekte wie Lochfraß oder Spaltkorrosion traten bei den für den POLLUX® verwendeten Werkstoffen Feinkornbaustahl und Gusseisen unter den Umgebungsbedingungen der hier angegebenen Versuche nicht auf /KIT 2017/. Es können daher näherungsweise lineare jährlich auftretende Korrosionsraten angegeben werden. Ein Großteil der hier zitierten Korrosionsraten wurde in Versuchen des Kernforschungszentrums Karlsruhe ermittelt. In /KIT 2017/ wird ein Überblick über diverse Forschungsarbeiten gegeben. Darin sind auch Informationen über Untersuchungen an weiteren überwiegend metallischen Werkstoffen enthalten. Neben Stählen und Gusseisenwerkstoffen wurden auch Nickelbasislegierungen, Kupfer und Kupferlegierungen sowie Titan untersucht. Neben metallischen Werkstoffen wurde auch das Korrosionsverhalten verschiedener Keramiken untersucht.

Innenbehälter

Der innere Behälter des POLLUX®-Behälters ist aus Feinkornbaustahl 15MnNi6-3 (Werkstoffnr. 1.6210) hergestellt. Bei Untersuchungen wurden folgende Abtragsraten ermittelt:

In /KFK 1993/ sind Ergebnisse von Laborexperimenten gegeben. Dabei wurden Werkstoffproben bei einer Temperatur von 150 °C über 18 Monate in Salzlösungen aufbewahrt. In NaCl-Lösung trat eine Abtragsrate von 71 µm/a auf. In MgCl₂-Lösung wurden Abtragsraten zwischen 94 µm/a und 117 µm/a ermittelt. Alle Abtragsraten sind für Flächenkorrosion angegeben, Lochfraß trat nicht auf.

In /KFK 1992/ sind weitere Abtragsraten angegeben. Bei 150 °C trat hier in Q-Lauge eine Abtragsrate von 127,5 µm/a auf. In MgCl₂-Lösung wird eine Abtragsrate von 112 µm/a angegeben. In NaCl-Lösung wurde eine Abtragsrate von 72 µm/a ermittelt.

Innerhalb des Forschungsvorhabens BAMBUS II /BAMBUSII 2004/ wurden in-situ Versuche in der Asse durchgeführt. Dabei wurden Materialproben oben auf POLLUX-Behälternachbildungen (elektrisch erheizbare Behälter) für 10 Jahre im Forschungsbergwerk Asse belassen und anschließend geborgen und untersucht. Bei 90 °C Umgebungstemperatur ergab sich eine Abtragsrate von $0,05 \pm 0,01 \mu\text{m/a}$. Bei 180 °C Umgebungstemperatur wird die Abtragsrate mit $0,05 \pm 0,03 \mu\text{m/a}$ angegeben. Lochfraß trat bei beiden Temperaturen nicht auf. Auffallend sind die sehr geringen Abtragsraten im Salzgruß gegenüber den Laborversuchen.

Eine weitere Zusammenstellung von Abtragsraten bei Laborexperimenten unter verschiedenen Angriffsmitteln wurde in /FZJÜL 1999/ angegeben.

Tabelle 5-1: Abtragsraten Innenbehälter POLLUX in verschiedenen Angriffsmitteln /FZJÜL 1999/

Angriffsmittel	Temperatur in °C	Werkstoff
		15MnNi6-3
NaCl-Lauge	90	1 - 2 $\mu\text{m/a}$
	150	71 - 94 $\mu\text{m/a}$
$\text{MgCl}_2/\text{CaCl}_2$ -Lauge	90	156 - 199 $\mu\text{m/a}$
	150	178 - 205 $\mu\text{m/a}$
Q-Lauge	90	75 - 78 $\mu\text{m/a}$
	150	320 - 422 $\mu\text{m/a}$

Für verschiedene Materialien und im Steinsalz vorkommende Angriffsmittel wurden in /FZJÜL 1998/ Wasserstoffbildungsraten und zugehörige Korrosionsraten ermittelt. Für Salzgrusversatz ergaben sich für den Innenbehälter des POLLUX gemittelte Wasserstoffbildungsraten von $1440 \mu\text{l/m}^2\text{h}$ bis $1739 \mu\text{l/m}^2\text{h}$. Diese entsprechen Abtragsraten von $4,1 \mu\text{m/a}$ bis $4,9 \mu\text{m/a}$. Weitere ermittelte Korrosionsraten unter den Bedingungen der Streckenlagerung im Steinsalz sind in Tabelle 5-11 aufgeführt.

Außenbehälter

Der äußere Abschirmbehälter des POLLUX® ist aus Gusseisen mit Kugelgraphit EN-GJS-400 (alte Bezeichnung GGG 40.3, Werkstoffnr. 0.7043) hergestellt.

In /KFK 1990/ sind Abtragsraten von in-situ Versuchen in der Asse gegeben. Bei einer Temperatur von 32 °C und in trockenem Salzgruß tritt eine Abtragsrate von $0,14 \mu\text{m/a}$ auf. Bei einem weiteren in-situ Versuch während des Brine Migration Tests wurde eine Abtragsrate von $1,01 \mu\text{m/a}$ ermittelt. Die Umgebungsbedingungen dazu waren Salzgruß mit begrenztem Laugenzutritt und Gammastrahlung mit einer Dosis von 300 Gy/h. Vergleichsproben ohne Bestrahlung konnten nicht untersucht werden.

Während des in situ-Versuches in der Asse /BAMBUSII 2004/ wurden ebenfalls Materialproben des Außenbehälters untersucht. Hier ergab sich unter den vorher schon erläuterten Bedingungen bei 90 °C eine Abtragsrate von $0,08 \pm 0,01 \mu\text{m/a}$. Bei 180 °C ist eine Abtragsrate von $0,08 \pm 0,06 \mu\text{m/a}$ angegeben. Vergleichend dazu wurden Laborversuche in NaCl Lösung

durchgeführt. Hier kommt es zu höheren Abtragsraten von $47 \pm 5 \mu\text{m/a}$ bei 90°C und $60 \pm 20 \mu\text{m/a}$ bei 150°C . Alle Abtragsraten sind als Flächenkorrosion gegeben, Lochfraß ist nicht aufgetreten.

In /FZJÜL 1999/ ist ebenfalls eine Zusammenstellung von Abtragsraten für Gusseisen mit Kugelgraphit angegeben.

Tabelle 5-2: Abtragsraten Außenbehälter POLLUX® in verschiedenen Angriffsmitteln /FZJÜL 1999/

Angriffsmittel	Temperatur in $^\circ\text{C}$	Werkstoff
		EN-GJS-400
NaCl-Lauge	90	4 - 7 $\mu\text{m/a}$
	150	65 - 100 $\mu\text{m/a}$
$\text{MgCl}_2/\text{CaCl}_2$ -Lauge	90	95 - 212 $\mu\text{m/a}$
	150	200 - 290 $\mu\text{m/a}$
Q-Lauge	90	46 - 92 $\mu\text{m/a}$
	150	97 - 250 $\mu\text{m/a}$

Für den Außenbehälter wurden nach /FZJÜL 1998/ in Salzgruß Wasserstoffbildungs- und Abtragsrate mit 853 bis 1440 $\mu\text{l/m}^2\text{h}$ bestimmt. Zugehörige Korrosionsraten sind 2,4 – 3,8 $\mu\text{m/a}$. Die ermittelten Korrosionsraten in weiteren Angriffsmitteln sind in Tabelle 5-11 mit aufgeführt.

5.1.4.2 Materialversprödung durch Wasserstoff

Das mögliche Auftreten von Materialversprödung durch eindiffundierenden Wasserstoff soll hier abgeschätzt werden. Durch Korrosionsprozesse ist mit in der Umgebung der Endlagerbehälter vorkommendem Wasserstoff zu rechnen. Dieser kann in das Gefüge metallischer Werkstoffe eindringen und dort verbleiben. Dadurch würde das Metallgitter geweitet, dieses führt zu inneren Spannungen und einer Versprödung des Metalls.

In /FZKA 1999/ wird über Untersuchungen auf Spannungsrisskorrosion berichtet. Dazu wurden Proben aus dem Werkstoff TStE355 verwendet und in Salzlauge bei 170°C untersucht. Spannungsrisskorrosion hat sich beim Versuch nicht ergeben. Festgestellt wurde allerdings eine Abnahme der Duktilität. Diese wird auf Wasserstoffversprödung zurückgeführt. Eine quantitative Angabe über die Abnahme der Duktilität ist nicht angegeben.

In Kapitel 5.4.4.2 werden Einflussfaktoren für die wasserstoffinduzierte Rissbildung genannt. Diese wurden /NAGRA 2009/ entnommen und für die Umgebungsbedingungen Schweizer Endlager ermittelt. Eine mögliche Übertragbarkeit auf das Wirtsgestein Steinsalz ist noch zu prüfen.

Eine mögliche Wasserstoffversprödung während der Behälterfertigung ist zu vermeiden.

Tabelle 5-3: Tabellarische Übersicht: Statisch-Mechanische Einwirkungen bei der Streckenlagerung im Steinsalz

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Statisch-Mechanische Einwirkungen	Isotroper Druck	-	Lithostatischer Druck 18,8 MPa			/GRS 2012b/	Gebirgsdruck Gorleben, 870m Teufe
		-	unbekannt			-	Thermisch induzierte Gebirgsspannungen auf Grund des Wärmeeintrags
		-	unbekannt			-	Thermische Spannungen im Behälter
		-	600 kPa			/DWK 1986/	Innerer Gasdruck bei 100 % Hüllrohrschaden
	Anisotroper Druck	-	unbekannt			-	nicht isostatischer Gebirgsdruck
	Scherung	-	Vorhanden, abhängig von der konkreten Endlager-auslegung			-	Nicht direkt quantifizierbar

Tabelle 5-4: Tabellarische Übersicht: Statisch-Mechanische Einwirkungen bei der Streckenlagerung im Steinsalz (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Statisch-Mechanische Lasten	Handhabungs- lasten	$F_G=637,7$ kN, ca. 160 kN pro Trag- zapfen	-	-	-	/GRS 2011b/	Brückenkran, Einlage- rungs-vorrichtung: max. Gebindemasse 65.000 kg, 4-Tragzapfen, Verwendung von 4-Punkt Anschlagmitteln
		Ca. 288 kN pro Tragzapfen	-	-	-	/GRS 2011b/ /KTA 2012/	Multiplikation der Kräfte mit Hublastbeiwert zur Auslegung der Tragzap- fen
		-	$F_R= 172,3$ kN		-	/GRS 2012b/	Ziehen in die Rückho- lungsstrecke / Bergungs- strecke, axial oder radial, $F_N=638$ kN, $\mu=0,27$
		-	Linienlast vertikal: 406,25 kN/m Horizontal: 247,65 kN/m		-	/SIEMAG 2016/	Handhabungslasten mo- difizierte Einlagerungsvor- richtung, Auslegungsan- nahme Anliegen nur an der Spitze der Zange. Ab- hängig vom Eigengewicht des Behälters

Tabelle 5-5: Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen bei der Streckenlagerung im Steinsalz

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Dynamisch-Mechanische Einwirkungen	Beschleunigungen	Bremsverzögerung: 0,5 m/s ² , Beschleunigung: 0,5 m/s ²			-	/DBE 1994/	Kennwerte Schacht-förderanlage
		Max. 1 g			-	/DBE 1994/	Verzögerung durch Selda-Anlage bei schwerem Übertreiben
		Max. 1,4 g			-	/DBETEC 2008c/	Anstoß Plateauwagen Puffer an Puffer
		Horizontale Beschleunigung: ± 0,2g; vertikale Beschleunigung ± 0,1g			-	/DBETEC 2008c/	Erdbeben bei übertägiger Handhabung
	Vibrationen auf Grund von:	Fahrt mit max. 5 m/s			-	/DBE 1994/	Kennwerte Schacht-förderanlage
		Max. 10 km/h gerade Strecke, max. 5 km/h in Kurven			-	/DBE 1995/	Transport auf Plateauwagen
		Max. 0,25 m/s			-	/DBE 1995/	Absenken und Aufnehmen mit der Einlagerungsvorrichtung
		-	Max. 0,5 m/s		-	/SIEMAG 2016/	Fahrgeschwindigkeit modifizierte Einlagerungsvorrichtung

Tabelle 5-6: Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen bei der Streckenlagerung im Steinsalz (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Dynamisch-Mechanische Einwirkungen	Schläge /Stöße	ablegen mit 0,25 m/min	-	-	-	/DBE 1995/	Ablegen des Behälters auf der Sohle
		Fall aus 9 m Höhe			-	/UNECE 2016/	Auslegungswerte Typ B(U) Versandstück
		Fall auf einen Dorn aus 1 m Höhe			-	/UNECE 2016/	
		Aufprall einer 500 kg schweren Platte aus 9 m Höhe			-	/UNECE 2016/	
		Fall aus 3 m Höhe auf Betonboden			-	/DBETEC 2008c/	Max. Fallhöhe in der übertägigen Handhabung
		Fall aus 0,95 m Höhe auf die Streckensohle			-	/DBETEC 2008c/	Max. Fallhöhe aus der Einlagerungsvorrichtung

Tabelle 5-7: Tabellarische Übersicht: Thermische Einwirkungen bei der Streckenlagerung im Steinsalz

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Thermische Einwirkungen	thermische Behälterleistung	max. 6 kW	< 6 kW			/DBETEC 2016b/	POLLUX®-10 mit DWR mix 89/11; 57 a Zwischenlagerung
	Brandfall	720 °C für 20 Minuten			-	/DBE 1995/	Brand nach Kollision mit Versatzfahrzeug
	Gebirgstemperatur	37,97 °C	Max. 100 °C nach StandAG			/GRS 2012b/	Gorleben, 840 m Teufe

Tabelle 5-8: Tabellarische Übersicht Materialversprödung durch Strahlung bei der Streckenlagerung im Steinsalz

Einwirkungen		Zeitraum				Quellen	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Material-versprödung durch Strahlung	Neutronenfluenz	Sicherheitsrelevante Schäden ab einer Neutronenfluenz > 10 ¹⁸ n/cm ²				/POSIVA 2012/	Angabe für Stähle

Tabelle 5-9: Tabellarische Übersicht: Zersetzung von Organika bei der Streckenlagerung im Steinsalz

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Zersetzung von Organika	Polyethylen	Zersetzung ab einer Dosis von 3×10^5 Gy bis 3×10^6 Gy				/KFK 1994/	

Tabelle 5-10: Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Wasserstoff bei der Streckenlagerung im Steinsalz

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Materialversprödung durch Wasserstoff	Stahl TStE355	-	Auftreten in Versuchen, keine quantitativen Angaben			/FZKA 1999/	Korrosionsversuche, Salzlauge, 170 °C
	Kohlenstoffstahl	-	Unter Schweizer Endlagerbedingungen geht die Nagra von keiner Sicherheitsrelevanz des Phänomens aus. Eine mögliche Abnahme der Festigkeit lässt sich noch nicht quantifizieren.			/NAGRA 2009/	Eine Überprüfung deutscher Konzepte anhand von Kriterien scheint notwendig. Genauere Ausführungen in Kapitel 5.4.4.2

Tabelle 5-11: Tabellarische Übersicht: Korrosion bei der Streckenlagerung im Steinsalz

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Korrosionsprozesse durch chemisch / biologische Einwirkungen	Innenbehälter POLLUX®, 15MnNi6-3, WerkstoffNr. 1.6210; Ermittlung durch Gewichtsmessung	-	-	Abtragsrate 71 µm/a		/KFK 1993/	NaCl-Lösung, 150 °C, 18 Monate
		-	-	Abtragsrate 94 – 117 µm/a		/KFK 1993/	MgCl ₂ -Lösung, 150 °C, 18 Monate
		-	-	Abtragsrate 0,05 ± 0,01 µm/a; kein Lochfraß		/BAMBUSII 2004/	In-situ Versuch Asse, 90 °C, 3740 Tage
		-	-	Abtragsrate 0,05 ± 0,03 µm/a; kein Lochfraß		/BAMBUSII 2004/	In-situ Versuch Asse, 180 °C, 3740 Tage
		-	-	Abtragsrate 127,5 µm/a		/KFK 1992/	Q-Brine, 150 °C
		-	-	Abtragsrate 112,0 µm/a		/KFK 1992/	MgCl ₂ reiche Lösung, 150 °C
		-	-	Abtragsrate 72,0 µm/a		/KFK 1992/	NaCl reiche Lösung, 150 °C
		-	-	Abtragsrate 1 – 2 µm/a		/FZJÜL 1999/	NaCl-Lauge, 90 °C
		-	-	Abtragsrate 71 – 94 µm/a		/FZJÜL 1999/	NaCl-Lauge, 150 °C
		-	-	Abtragsrate 156 – 199 µm/a		/FZJÜL 1999/	MgCl ₂ /CaCl ₂ -Lauge, 90 °C
		-	-	Abtragsrate 178 – 205 µm/a		/FZJÜL 1999/	MgCl ₂ /CaCl ₂ -Lauge, 150 °C
		-	-	Abtragsrate 75 – 78 µm/a		/FZJÜL 1999/	Q-Lauge, 90 °C
		-	-	Abtragsrate 320 – 422 µm/a		/FZJÜL 1999/	Q-Lauge, 150 °C

Tabelle 5-12: Tabellarische Übersicht: Korrosion bei der Streckenlagerung im Steinsalz (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Korrosionsprozesse durch chemisch / biologische Einwirkungen	Innenbehälter POLLUX®, 15MnNi6-3, WerkstoffNr. 1.6210; Ermittlung durch Messung der Wasserstoffbildungsrate	-	-	Wasserstoffbildungsrate: 1440-1739 $\mu\text{l}/\text{m}^2$ h, Korrosionsrate von 4,1 – 4,9 $\mu\text{m}/\text{a}$		/FZJÜL 1998/	Salzgrus, 90 °C, 570 Stunden
		-	-	Wasserstoffbildungsrate: 746 $\mu\text{l}/\text{m}^2$ h, Korrosionsrate 2,1 $\mu\text{m}/\text{a}$		/FZJÜL 1998/	gesättigte NaCl-Lösung, 90 °C, 330 Stunden
		-	-	Wasserstoffbildungsrate: 26838 – 27938 $\mu\text{l}/\text{m}^2$ h, Korrosionsrate 75,1 – 78,2 $\mu\text{m}/\text{a}$		/FZJÜL 1998/	Q-Lauge, 90 °C, 800 Stunden
		-	-	Wasserstoffbildungsrate: 55726 $\mu\text{l}/\text{m}^2$ h, Korrosionsrate 155,8 $\mu\text{m}/\text{a}$		/FZJÜL 1998/	MgCl ₂ und CaCl ₂ reiche Lauge, 90 °C; 800 Stunden
		-	-	Wasserstoffbildungsrate: 114577 $\mu\text{l}/\text{m}^2$ h, Korrosionsrate 319,9 $\mu\text{m}/\text{a}$		/FZJÜL 1998/	Q-Lauge, 150 °C; 1025 Stunden

Tabelle 5-13: Tabellarische Übersicht: Korrosion bei der Streckenlagerung im Steinsalz (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
-Korrosionsprozesse durch chemisch / biologische Einwirkungen	Außenbehälter POLLUX®, alt: GGG-40.3, neu: EN-GJS-400, Gusseisen mit Kugelgraphit, Werkstoff Nr. 0.7043; Ermittlung durch Gewichtsmessung	-	-	Abtragsrate 0,14 µm/a		/KFK 1990/	In-situ Versuch Asse, 32 °C, trocken
		-	-	Abtragsrate 1,01 µm/a		/KFK 1990/	In-situ Versuch Asse, geringe Lösungen, Gamma-Strahlung, 700 Tage
		-	-	Abtragsrate 0,08±0,01 µm/a; kein Lochfraß		/BAMBUSII 2004/	In-situ Versuch in der Asse, 90 °C, 3740 Tage
		-	-	Abtragsrate 0,08±0,06 µm/a; kein Lochfraß		/BAMBUSII 2004/	In-situ Versuch in der Asse, 180 °C, 3740 Tage Dauer
		-	-	Abtragsrate 47,5 µm/a; kein Lochfraß		/BAMBUSII 2004/	NaCl-Lösung, 90 °C, 480 Tage
		-	-	Abtragsrate 112,0 µm/a		/BAMBUSII 2004/	NaCl-Lösung, 150 °C, 365 Tage
		-	-	Abtragsrate 4 – 7 µm/a		/FZJÜL 1999/	NaCl-Lauge, 90 °C
		-	-	Abtragsrate 65 – 100 µm/a		/FZJÜL 1999/	NaCl-Lauge, 150 °C
		-	-	Abtragsrate 95 – 212 µm/a		/FZJÜL 1999/	MgCl ₂ /CaCl ₂ -Lauge, 90 °C
		-	-	Abtragsrate 200 – 290 µm/a		/FZJÜL 1999/	MgCl ₂ /CaCl ₂ -Lauge, 150 °C
		-	-	Abtragsrate 46 – 92 µm/a		/FZJÜL 1999/	Q-Lauge, 90 °C
		-	-	Abtragsrate 97 – 250 µm/a		/FZJÜL 1999/	Q-Lauge, 150 °C

Tabelle 5-14: Tabellarische Übersicht: Korrosion bei der Streckenlagerung im Steinsalz (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
-Korrosionsprozesse durch chemisch / biologische Einwirkungen	Außenbehälter POLLUX®, alt: GGG-40.3, neu: EN-GJS-400, Gusseisen mit Kugelgraphit, Werkstoff Nr. 0.7043; Ermittlung durch Messung der Wasserstoffbildungsrate	-	-	Wasserstoffbildungsrate: 853 – 1440 µl/m² h, Korrosionsrate von 2,4 – 3,8 µm/a		/FZJÜL 1998/	Salzgrus, 90 °C, 570 Stunden
		-	-	Wasserstoffbildungsrate: 1384 – 1507 µl/m² h, Korrosionsrate 3,8 – 4,1 µm/a		/FZJÜL 1998/	gesättigte NaCl-Lösung, 90 °C, 100 Stunden
		-	-	Wasserstoffbildungsrate: 31799 – 32904 µl/m² h, Korrosionsrate 89 – 92,1 µm/a		/FZJÜL 1998/	Q-Lauge, 90 °C, 800 Stunden
		-	-	Wasserstoffbildungsrate: 34442 µl/m² h, Korrosionsrate 95,9 µm/a		/FZJÜL 1998/	MgCl ₂ und CaCl ₂ reicher Lauge; 90 °C; 800 Stunden
		-	-	Wasserstoffbildungsrate: 34893 µl/m² h, Korrosionsrate 97,3 µm/a		/FZJÜL 1998/	Q-Lauge; 150 °C; 1025 Stunden

5.2 Vertikale Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen im Steinsalz

Als Alternative zur Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern im Steinsalz ist die Einlagerung von Brennstabkokillen (BSK) in vertikalen Bohrlöchern entwickelt worden. Die BSK wurde grob ausgelegt, ein Prototyp ist nicht gefertigt worden. Zusätzlich wurde ein dazugehöriger Transferbehälter sowie die entsprechende Transport- und Einlagerungstechnik entwickelt und erprobt. Für Handhabungsversuche wurde eine Dummy-BSK gefertigt und verwendet. Resultierende Einwirkungen konnten daher auch hier aus mehreren Quellen entnommen werden. Einige Einwirkungen konnten aus der Streckenlagerung im Steinsalz übernommen werden. Die ermittelten Einwirkungen werden zunächst erläutert und dann in Tabelle 5-15 bis Tabelle 5-24 dargestellt.

5.2.1 Mechanische Einwirkungen

5.2.1.1 Statische Einwirkungen

Scherkräfte

Neben dem Gebirgsdruck können Scherkräfte auf den Behälter einwirken. Diese sind auf Grund der Anisotropie und der Abhängigkeit von der konkreten Endlagerauslegung zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht quantifizierbar. Hier wirken die Scherkräfte zunächst auf die Bohrlochverrohrung ein.

Isotrope Drücke

Die Brennstabkokillen werden in verrohrten und mit Quarzsand versetzten Bohrlöchern eingelagert. Die Verrohrung ist nach dem Endlagerkonzept so ausgelegt, dass der Gebirgsdruck von dieser aufgenommen wird. Am beispielhaften Standort Gorleben ist für die Einlagerungsteufe von 870 m ein Gebirgsdruck von 18,8 MPa in Kapitel 5.1.1.1 berechnet worden. Dieser wird auch für dieses Endlagerkonzept angenommen. Die Einlagerungsbohrlöcher sind 300 m tief. Am Grund des Bohrlochs in 1170 m Teufe wird ein Gebirgsdruck von 25,3 MPa erwartet.

Im FuE Vorhaben DENKMAL /DBETEC 2010a/ wurde numerisch der Gebirgsdruck unter Berücksichtigung der thermischen Ausdehnung des Steinsalzes bestimmt. Berechnet wurde hier ein maximal wirkender Druck von 40 MPa. Dieser wird hier allerdings durch die Verrohrung aufgenommen.

Im 300 m tiefen, mit Quarzsand verfülltem Bohrloch sollen nach Endlagerkonzept 50 Kokillen gestapelt werden. Unter Vernachlässigung des Siloeffektes würden sich Stapellasten ergeben. Auf die unterste Kokille ist demnach die Last von 49 weiteren Kokillen wirksam. In /GRS 2012b/ wurde diese Last mit 2580 kN bestimmt. In der untersten Kokille wurde damit eine wirksame maximale Axialspannung von 93 N/mm² ermittelt. Für den Lastfall Druck und die geplanten Behältermaterialien ist dies als realisierbar anzusehen. Die Berechnung ist als konservative Abschätzung anzusehen, ein Teil der Lasten wird durch den Siloeffekt abgetragen werden.

Anisotrope Drücke

Für anisotrope Drücke gilt das gleiche wie bei der Streckenlagerung in Steinsalz in Kapitel 5.1.1.1 beschrieben.

Handhabungslasten

Handhabungslasten ergeben sich aus der Handhabung der Brennstabkokillen. Die Gebinde-masse der beladenen Kokille beträgt 5300 kg. Beim Anschlagen an der Einlagerungsvorrichtung ist eine Gewichtskraft von 52 kN wirksam. Für eine eventuelle Rückholung oder Bergung müssen die Kokillen aus dem mit Quarzsand versetzten Bohrloch gezogen werden. Laut /GRS 2012b/ ist dabei eine Reibkraft von 20,3 kN auf die Kokille wirksam. Diese muss zusätzlich zur Gewichtskraft aufgebracht werden. Bei im Versatz feststeckender Kokille würde die Einlagerungsvorrichtung mit ihrer maximalen Zugkraft von 81 kN an der Kokille ziehen. Durch Erweiterung der Vorrichtung um eine Rüttelvorrichtung zum Lösen der Kokillen sollte diese Last aber nicht auf die Kokillen wirksam werden.

5.2.1.2 Dynamische EinwirkungenBeschleunigungen

Für den Schachttransport der Brennstabkokillen innerhalb des Transferbehälters wird die gleiche Schachtförderanlage wie für die POLLUX®-Behälter eingesetzt. Diese hat eine Anfahrbeschleunigung und Bremsverzögerung von $0,5 \text{ m/s}^2$. Für den Transferbehälter ist von einer maximal wirkenden Beschleunigung von 2 g bei Handhabungsvorgängen ausgegangen worden. /DBETEC 2006/

Vibrationen

Schachttransport und Transport in den Richtstrecken erfolgen mit den gleichen Geschwindigkeiten wie bei der Streckenlagerung in Kapitel 5.1.1.2. Dadurch entstehende Vibrationen konnten nicht quantifiziert werden.

Für die Rückholung sollen die Kokillen aus dem Versatz gezogen werden. Um dieses zu erleichtern, sollen die Kokillen durch eine Rüttelvorrichtung gelöst werden. Dabei auftretende Vibrationen wurden noch nicht quantifiziert.

Schläge / Stöße

Für den Transport wird die Brennstabkokille in den Transferbehälter verladen. Eventuelle Abstürze bei der Konditionierung und beim Transport werden durch diesen abgetragen. Innerhalb des Transferbehälters kann die Kokille verrutschen und an diesen anschlagen.

Die Brennstabkokille wird mit einer maximalen Geschwindigkeit von 10 m/s im Bohrloch abgelaassen oder heraufgezogen. Eventuelles Anstoßen der Brennstabkokille an der Bohrlochwand erfolgt daher auch mit dieser Geschwindigkeit. Vor dem Aufsetzen wird auf die Schleichgeschwindigkeit von 1 m/s umgeschaltet /DBETEC 2006/. Ein Aufsetzen der Kokille im Sandversatz erfolgt ebenfalls mit dieser Geschwindigkeit. Die Bremskraft der Einlagerungsvorrichtung beträgt 288 kN.

Ein Absturz der Brennstabkokille in das 300 m tiefe Bohrloch ist auszuschließen. Für diesen Fall ist die Brennstabkokille nicht ausgelegt.

5.2.2 Thermische Einwirkungen

Beladen wird die Brennstabkokille mit Brennstäben von 3 Brennelementen. Ein DWR-Mix Brennelement (89/11) hat nach /DBETEC 2016b/ eine Wärmeleistung von ca. 0,6 kW bei 57 Jahren Zwischenlagerzeit. Damit hat die Brennstabkokille eine maximale thermische Behälterleistung von 1,8 kW.

Einwirkungen aus möglichen Brandfällen werden durch den Transferbehälter abgetragen. Dieser schützt die Brennstabkokille vor den thermischen Einwirkungen des Brandfalles, sodass die Integrität der Brennstabkokille weiter aufrechterhalten wird.

Die Gebirgstemperatur am Standort Gorleben beträgt 37,97 °C im Bereich der Erkundungssohle bei 840 m Teufe /GRS 2012b/. Der vertikale Temperaturgradient wird mit 2,35 K/100 m angegeben. Bei einem 300 m tiefen Bohrloch wäre also eine Temperatur von 45 °C am Grund der Bohrung zu erwarten. Für andere Standorte ist die Gebirgstemperatur bei der Standorterkundung zu ermitteln.

Für den Brandfall ist vom selben Brandfall wie für den POLLUX®-Behälter in 5.1.2 auszugehen. Dabei ist die Brennstabkokille allerdings in den zugehörigen Transferbehälter geladen.

5.2.3 Radiologische Einwirkungen

5.2.3.1 Materialversprödung durch Strahlung

Für Stähle werden sicherheitsrelevante Schäden ab einer Neutronenfluenz von 10^{18} n/cm² erwartet /POSIVA 2012/. Ein Auftreten dieser Neutronenfluenz bei geplanten Inventaren ist noch zu ermitteln.

5.2.3.2 Zersetzung von Organika

Im Deckel der Brennstabkokille ist eine Moderatorplatte aus Polyethylen platziert. Deren Zersetzung durch die Bestrahlung ist ab einer Dosis von 3×10^5 Gy bis 3×10^6 Gy erwartbar /KFK 1994/. Für die geplanten Inventare der Brennstabkokille ist die auftretende Dosis noch zu bewerten.

5.2.4 Chemische Einwirkungen

5.2.4.1 Korrosionsprozesse

Für die Brennstabkokille ist der Werkstoff 15 MnNi6-3 vorgesehen. Dieser wird auch für den Innenbehälter des POLLUX® verwendet. Aussagen zu möglichen korrosiven Einwirkungen können daher dem Kapitel 5.1.4.1 unter Innenbehälter POLLUX® entnommen werden.

5.2.4.2 Materialversprödung durch Wasserstoff

Aufgrund gleicher Behälterwerkstoffe und Umgebungsbedingungen werden hier die gleichen Annahmen wie im Kapitel 5.1.4.2 für den POLLUX®-Behälter getroffen.

Tabelle 5-15: Tabellarische Übersicht: Statisch-Mechanische Einwirkungen bei der vertikalen Bohrlochlagerung im Steinsalz

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Statisch-Mechanische Einwirkungen	Isotrope Drücke	-	Lithostatischer Druck 18,8 MPa			/GRS 2012b/	Gebirgsdruck Standort Gorleben, 870m Teufe
		-	Lithostatischer Druck 25,3 MPa			/GRS 2012b/	Gebirgsdruck Standort Gorleben, 1170m Teufe
		-	40 MPa			Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.	Numerische Berechnung unter Berücksichtigung der thermischen Ausdehnung des Steinsalzes, wirkend auf die Bohrlochverrohrung
		-	$F_{ax}=2550 \text{ kN}$			/GRS 2012b/	Stapellast von 49 Kokillen auf unterste Kokille
	Scherung	-	Vorhanden, abhängig von der konkreten Endlagerauslegung			-	Nicht direkt quantifizierbar, Anisotropie
	Anisotroper Druck	-	unbekannt			-	nicht isostatischer Gebirgsdruck

Tabelle 5-16: Tabellarische Übersicht; Statisch-Mechanische Einwirkungen bei der Bohrlochlagerung im Steinsalz (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Statische Mechanische Einwirkungen	Handhabungslasten	$F_G = 52 \text{ kN}$			-	/GRS 2011b/	Max. Gebindemasse 5300 kg, Kokille angeschlagen am Tragpilz
		-	$F_R = 20,3 \text{ kN}$		-	/GRS 2012b/	Reibkraft auf die Kokillen durch den Versatz, zu überwinden bei Rückholung
		-	$F_z = 81 \text{ kN}$		-	/DBETEC 2006/	Max. Zugkraft der Rückholvorrichtung bei klemmender Kokille

Tabelle 5-17: Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen bei der Bohrlochlagerung im Steinsalz

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Dynamische-Mechanische Einwirkungen	Beschleunigungen	Bremsverzögerung: 0,5 m/s ² , Beschleunigung: 0,5 m/s ²			-	/DBE 1994/	Kennwerte Schachtförderanlage
		Max. Beschleunigung ≤ 2g			-	Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.	Annahme maximale dyn. Einwirkung bei Handhabung
	Vibrationen auf Grund von:	Max. Hubgeschwindigkeit mit Last 10 m/s; Aufsetzen mit 1 m/s			-	/DBETEC 2006/	Absenken / Heraufziehen der Kokille im Bohrloch
		Transport auf Plateauwagen mit 10 km/h in gerader Strecke, 5 km/h in Kurven			-	/DBE 1995/	
		Schachtförderung mit 5 m/s			-	/DBE 1994/	
		-	Noch nicht spezifiziert		-	/GRS 2012b/	Vibration / Rütteln bei im Versatz klemmender Ko- kille

Tabelle 5-18: Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen bei vertikaler Bohrlochlagerung im Steinsalz (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Dynamische-Mechanische Einwirkungen	Schläge / Stöße	Anschlagen mit max. Hubgeschwindigkeit von 10 m/s an die Bohrlochwand			-	/DBETEC 2006/	
		Aufsetzen mit 1 m/s in den Sandversatz			-	/DBETEC 2006/	
		Bremskraft 288 kN			-	/DBETEC 2006/	Bremskraft Kokillenhubwerk

Tabelle 5-19: Tabellarische Übersicht: Thermische Einwirkungen bei vertikaler Bohrlochlagerung im Steinsalz

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Thermische Einwirkungen	thermische Behälterleistung	max. 1,8 kW	< 1,8 kW			/DBETEC 2016b/	3 DWR-BE mix 89/11, 57 a Zwischenlagerung
	Gebirgstemperatur	37,97 °C	Max. 100 °C nach StandAG			/GRS 2012b/	Gorleben, 840 m Teufe

Tabelle 5-20: Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Strahlung bei vertikaler Bohrlochlagerung im Steinsalz

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Materialversprödung durch Strahlung	Neutronenfluenz	Sicherheitsrelevante Schäden ab einer Neutronenfluenz $> 10^{18} \text{ n/cm}^2$				/POSIVA 2012/	Angabe für Stähle

Tabelle 5-21: Tabellarische Übersicht: Zersetzung von Organika bei vertikaler Bohrlochlagerung im Steinsalz

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Zersetzung von Organika	Polyethylen	Zersetzung ab einer Dosis von $3 \times 10^5 \text{ Gy}$ bis $3 \times 10^6 \text{ Gy}$				/KFK 1994/	

Tabelle 5-22: Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Wasserstoff bei vertikaler Bohrlochlagerung im Steinsalz

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Materialversprödung durch Wasserstoff	Stahl TStE355	-	Auftreten in Versuchen, keine quantitativen Angaben			/FZKA 1999/	Korrosionsversuche, Salzlauge, 170 °C
	Kohlenstoffstahl	-	Unter Schweizer Endlagerbedingungen geht die Nagra von keiner Sicherheitsrelevanz des Phänomens aus. Eine mögliche Abnahme der Festigkeit lässt sich nicht quantifizieren.			/NAGRA 2009/	Eine Überprüfung deutscher Konzepte anhand von Kriterien scheint notwendig. Genauere Ausführungen in Kapitel 5.4.4.2

Tabelle 5-23: Tabellarische Übersicht: Korrosion bei vertikaler Bohrlochlagerung im Steinsalz

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Korrosionsprozesse durch chemisch / biologische Einwirkungen	Brennstabkockille 15MnNi6-3, WerkstoffNr. 1.6210; Ermittlung durch Gewichtsmessung	-	-		Abtragsrate 71 µm/a	/KFK 1993/	NaCl-Lösung, 150 °C, 18 Monate
		-	--		Abtragsrate 94 – 117 µm/a	/KFK 1993/	MgCl ₂ -Lösung, 150 °C, 18 Monate
		-	-		Abtragsrate 0,05 ± 0,01 µm/a; kein Lochfraß	/BAMBUSII 2004/	In-situ Versuch Asse, 90 °C, 3740 Tage
		-	-		Abtragsrate 0,05 ± 0,03 µm/a; kein Lochfraß	/BAMBUSII 2004/	In-situ Versuch Asse, 180 °C, 3740 Tage
		-	-		Abtragsrate 127,5 µm/a	/KFK 1992/	Q-Brine, 150 °C
		-	-		Abtragsrate 112,0 µm/a	/KFK 1992/	MgCl ₂ reiche Lösung, 150 °C
		-	-		Abtragsrate 72,0 µm/a	/KFK 1992/	NaCl reiche Lösung, 150 °C
		-	-		Abtragsrate 1 – 2 µm/a	/FZJÜL 1999/	NaCl-Lauge, 90 °C
		-	-		Abtragsrate 71 – 94 µm/a	/FZJÜL 1999/	NaCl-Lauge, 150 °C
		-	-		Abtragsrate 156 – 199 µm/a	/FZJÜL 1999/	MgCl ₂ /CaCl ₂ -Lauge, 90 °C
		-	-		Abtragsrate 178 – 205 µm/a	/FZJÜL 1999/	MgCl ₂ /CaCl ₂ -Lauge, 150 °C
		-	-		Abtragsrate 75 – 78 µm/a	/FZJÜL 1999/	Q-Lauge, 90 °C
		-	-		Abtragsrate 320 – 422 µm/a	/FZJÜL 1999/	Q-Lauge, 150 °C

Tabelle 5-24: Tabellarische Übersicht: Korrosion bei vertikaler Bohrlochlagerung im Steinsalz (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Korrosionsprozesse durch chemisch / biologische Einwirkungen	Brennstabkockille, 15MnNi6-3, WerkstoffNr. 1.6210; Ermittlung durch Messung der Wasserstoffbildungsrate	-	-	Wasserstoffbildungsrate: 1440 – 1739 $\mu\text{l/m}^2 \text{ h}$, Korrosionsrate von 4,1 – 4,9 $\mu\text{m/a}$		/FZJÜL 1998/	Salzgrus, 90 °C, 570 Stunden
		-	-	Wasserstoffbildungsrate: 746 $\mu\text{l/m}^2 \text{ h}$, Korrosionsrate 2,1 $\mu\text{m/a}$		/FZJÜL 1998/	gesättigte NaCl-Lösung, 90 °C, 330 Stunden
		-	-	Wasserstoffbildungsrate: 26838 – 27938 $\mu\text{l/m}^2 \text{ h}$, Korrosionsrate 75,1 – 78,2 $\mu\text{m/a}$		/FZJÜL 1998/	Q-Lauge, 90 °C, 800 Stunden
		-	-	Wasserstoffbildungsrate: 55726 $\mu\text{l/m}^2 \text{ h}$, Korrosionsrate 155,8 $\mu\text{m/a}$		/FZJÜL 1998/	MgCl ₂ und CaCl ₂ reiche Lauge; 90 °C; 800 Stunden
		-	-	Wasserstoffbildungsrate: 114577 $\mu\text{l/m}^2 \text{ h}$, Korrosionsrate 319,9 $\mu\text{m/a}$		/FZJÜL 1998/	Q-Lauge; 150 °C; 1025 Stunden

5.3 Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern

Die direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern wurde im Rahmen einer Machbarkeitsstudie für die kerntechnische Industrie betrachtet. Dabei sollen bereits existierende Transport- und Lagerbehälter als Endlagerbehälter verwendet werden. Auf Grund der höheren Wärmeleistung bei voller Beladung werden diese in horizontale Kurzbohrlöcher eingeschoben. Dazu ist Transport- und Einlagerungstechnik entworfen worden. Handhabungsversuche zur direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern haben noch nicht stattgefunden. Auch der Nachweis der Eignung der Transport- und Lagerbehälter als Endlagerbehälter steht noch aus. Die derzeit gültige Grenztemperatur von 100 °C an der Behälteroberfläche ist mit diesem Konzept nur nach sehr langen Zwischenlagerzeiten erreichbar. Die Einwirkungen werden zunächst erläutert und dann in Tabelle 5-25 bis Tabelle 5-36 dargestellt.

5.3.1 Mechanische Einwirkungen

5.3.1.1 Statische Einwirkungen

Scherkräfte

Neben dem Gebirgsdruck können Scherkräfte auf den Behälter einwirken. Diese sind auf Grund der Anisotropie und der Abhängigkeit von der konkreten Endlagerauslegung zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht quantifizierbar.

Isotrope Drücke

Für die direkte Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern werden ebenfalls eine Einlagerungsteufe von 870 m und ein lithostatischer Gebirgsdruck von 18,8 MPa angenommen. Dieser Gebirgsdruck wurde am Standort Gorleben erwartet. In /DBETEC 2008b/ wurde die Annahme getroffen, dass der maximal wirksame Gebirgsdruck 30 MPa betragen würde.

Durch den hohen Wärmeeintrag der Behälter sind thermisch induzierte Spannungen im Steinsalz zu erwarten. Eine Quantifizierung dieser Spannungen ist noch nicht erfolgt.

Durch Korrosion des Innenraums oder auftretende Hüllrohrschäden sind innere Drücke möglich. Die Höhe dieser Drücke konnte noch nicht quantifiziert werden.

Für die Zulassung als Typ B(U) Versandstück ist zudem der Druck einer Wassersäule von 200 m Höhe für eine Stunde auszuhalten.

Anisotrope Drücke

In /DEBETEC 2008b/ wird beispielhaft von einem anisotropen Druck von 20 MPa auf die Behälterstirnseiten und 25 MPa auf den Behältermantel ausgegangen. Dieser ergibt sich aus den Gebirgslasten.

Das genauere Auftreten von anisotropen Drücken bei diesem Endlagerkonzept ist noch zu untersuchen.

Handhabungslasten

Handhabungslasten entstehen durch die Handhabung der Behälter. Hierfür sind hier die wirkenden Handhabungslasten angegeben. Für die verschiedenen Transport- und Lagerbehälter wird eine abdeckende maximale Masse von 160 Mg angenommen /GRS 2011b/. Damit ergibt sich eine Gewichtskraft von ca. 1570 kN. Diese wird beim Anheben mittels des Brückenkrans und der Umladevorrichtung wirksam. Je nach Verwendung von zwei oder allen vier Tragzapfen sind bei gleichmäßiger Lastverteilung auf die Tragzapfen Kräfte von 785 kN bzw. 392,5 kN vorhanden. Für die Auslegung der Tragzapfen ist ein Hublastbeiwert von $\psi = 1,8$ nach KTA 3905 /KTA 2012/ zu berücksichtigen. Für die Einlagerung ist eine Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung (STEV) vorgesehen. Diese erzeugt eine maximale Schubkraft von 240 kN während des Einschubvorganges /DBETEC 2012/. Einschub und eventuelles Ziehen aus dem Bohrloch erfolgt über eine Gleitbahn mit geringem Reibungskoeffizienten. Daher sind nur geringe auf den Behälter einwirkende Lasten zu erwarten.

Für die Rückholung oder Bergung der Transport und Lagerbehälter existieren nur Vorüberlegungen. Daher können zu diesem Zeitpunkt noch keine Lasten für diese Zeiträume quantifiziert werden.

5.3.1.2 Dynamische Einwirkungen

Beschleunigungen

Der Schachttransport der Transport- und Lagerbehälter erfolgt durch eine Schachtförderanlage mit einer Nutzlast von 175 Mg. Anfahrbeschleunigung und Bremsverzögerung dieser Anlage betragen $0,5 \text{ m/s}^2$. Für die Bremsverzögerung der SELDA Anlage bei schwerem Überstreifen wird ebenfalls von einer Verzögerung von 1 g ausgegangen /DBE 1994/. Für den schienengebundenen Transport wird eine maximale Beschleunigung von 1,4 g bei Aufprall zweier Wagen Puffer an Puffer angenommen /DBETEC 2008c/. Weitere sich aus dem Transport ergebende Beschleunigungen sollten damit abgedeckt sein.

Vibrationen

Vibrationen ergeben sich überwiegend aus den Transportvorgängen. Da diese bislang nicht quantifiziert wurden, werden zunächst die Fahrgeschwindigkeiten angegeben. Auf Grund der großen Gebindemassen ist die Geschwindigkeit beim Schachttransport auf 1 m/s begrenzt /DBETEC 2014a/. Auch die Fahrgeschwindigkeit der Streckentransport und Einlagerungsvorrichtung wurde auf 5 km/h in gerader Strecke sowie 2,5 km/h in Kurven begrenzt /DBETEC 2014b/.

Die zum Umladen der Behälter verwendete Umladevorrichtung ist ähnlich aufgebaut wie die Einlagerungsvorrichtung der POLLUX®-Behälter. Daher wird ebenfalls von einer maximalen Geschwindigkeit von 0,25 m/min für Absenken und Anheben ausgegangen.

Die Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung erledigt den Einschub in die Kurzbohrlöcher mit einer Geschwindigkeit von 0,6 m/min /DBETEC 2014b/.

Schläge / Stöße

Schläge und Stöße können sich für den Transport- und Lagerbehälter vor allem aus Betriebsstörungen oder Störfällen ergeben. Mögliche Abstürze des Behälters sind beim Umladen des Behälters, beim Streckentransport und beim Einschubvorgang denkbar. Beim Umladevorgang wird der Transport- und Lagerbehälter vom Schachttransportwagen gehoben. Dabei ergibt sich eine maximale Absturzhöhe von 1340 mm. Der Sturz würde auf den Schachttransportwagen erfolgen. Beim Transport mit der STEV und dem Einschieben liegt die Absturzhöhe bei ca. 1850 mm zur Streckensohle /DBETEC 2014b/. Bei jeglichen Abstürzen muss der Behälter den Einschluss der radioaktiven Stoffe gewährleisten.

Für die Zulassung der Behälter als Typ B(U) Versandstücke sind ein Falltest aus 9 m auf eine Aufprallplatte, ein Aufprall aus 1 m Höhe auf einen Dorn und ein Aufprall einer 500 kg schwere Platte aus 9 m Höhe auf den Behälter durchzuführen. Allerdings erfolgen diese Tests unter Verwendung der Stoßdämpfer und mit geringerer Behältermasse. Für den Transport der Behälter im Endlager ist eine Nutzung der Stoßdämpfer nicht vorgesehen und die Behältermasse ist durch die Verfüllung der Behälter auf 160 Mg erhöht. Daher ist die weitere Gültigkeit der Tests zu prüfen.

5.3.2 Thermische Einwirkungen

Für zur Endlagerung bereitstehende Behälter wird nach /DBETEC 2016b/ von Zwischenlagerzeiten von 56 Jahren für DWR MIX 17/2 und 58 Jahren für CSD-V Kokillen ausgegangen. Damit haben die Behälter CASTOR® V/19 und HAW 28M jeweils ca.15 kW thermische Leistung. Die Thermische Leistung der Behälter sinkt mit längerer Einlagerung ab.

Aktuell schreibt das Standortauswahlgesetz eine maximale Oberflächentemperatur von 100 °C für die eingelagerten Endlagerbehälter vor. Auf Grund der hohen Wärmeleistung der Transport- und Lagerbehälter ist diese Temperatur bei voller Beladung nicht einhaltbar /DBETEC 2016b/.

Die Gebirgstemperatur am Standort Gorleben beträgt 37,97 °C im Bereich der Erkundungssohle bei 840 m Teufe /GRS 2012b/. Der vertikale Temperaturgradient wird mit 2,35 K/100 m angegeben. Für andere Standorte ist die Gebirgstemperatur bei der Standorterkundung zu ermitteln.

Für den Brandfall ist vom selben Brandfall wie für den POLLUX®-Behälter in Kapitel 5.1.2 auszugehen.

5.3.3 Radiologische Einwirkungen:

5.3.3.1 Materialversprödung durch Strahlung

Stähle zeigen sicherheitsrelevante Schäden durch Strahlung ab einer Neutronenfluenz von 10^{18} n/cm² /POSIVA 2012/. Ein Auftreten dieser Neutronenfluenz bei geplanten Inventaren ist noch zu ermitteln.

5.3.3.2 Zersetzung von Organika

In den Transport- und Lagerbehältern sind Moderatorstäbe aus Polyethylen verbaut. Zersetzung auf Grund von Bestrahlung ist für Polyethylen ab einer Dosis von 3×10^5 Gy bis 3×10^6 Gy zu erwarten /KFK 1994/. Für die geplanten Inventare ist die Dosis noch zu bewerten.

5.3.4 Chemische Einwirkungen

5.3.4.1 Korrosion

Transport- und Lagerbehälter bestehen aus einem dickwandigen zylindrischen Sphärogusskörper. Dieser ist vergleichbar mit dem Außenbehälter des POLLUX®-Behälters. Daher können für die Einlagerung im Steinsalz die Erläuterungen zur Korrosion aus Kapitel 5.1.4.1 übernommen werden. Für die Deckel der Behälter werden ähnliche Werkstoffe wie für den Innenbehälter des POLLUX® verwendet. Daher werden auch hier zunächst die Korrosionsraten aus Kapitel 5.1.4.1 übernommen.

5.3.4.2 Materialversprödung durch Wasserstoff

Aufgrund ähnlicher Behälterwerkstoffe und Umgebungsbedingungen werden hier die gleichen Annahmen wie im Kapitel 5.1.4.2 für den POLLUX®-Behälter getroffen.

Tabelle 5-25: Tabellarische Übersicht: Statisch-Mechanische Einwirkungen bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Statisch-Mechanische Einwirkungen	Isotrope Drücke	-	Lithostatischer Druck 18,8 MPa			/GRS 2012b/	$\rho = 2200 \text{ kg/m}^3$, $h = 870 \text{ m}$, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
		-	30 MPa isotrop			/DBETEC 2008b/	Annahme
		-	unbekannt			-	Thermisch induzierte Spannungen auf Grund des Wärmeeintrags
	Scherung	-	Vorhanden, abhängig von der konkreten Endlagerauslegung			-	Nicht direkt quantifizierbar, Anisotropie
	Anisotroper Druck	-	unbekannt			-	Anisotroper Gebirgsdruck

Tabelle 5-26: Tabellarische Übersicht: Statisch-Mechanische Einwirkungen bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Statisch-Mechanische Einwirkungen	Handhabungs- lasten	$F_G=1569,6 \text{ kN}$, ca. 392,4 kN pro Tragzapfen	-	-	-	/GRS 2011b/	Brückenkran: max. Gebin- demasse 160.000 kg, 4- Tragzapfen, Verwendung von 4-Punkt Anschlagmit- teln
		$F_G=1569,6 \text{ kN}$, ca. 784,8 kN pro Tragzapfen	-	-	-	/GRS 2011b/	Brückenkran, Einlage- rungs-vorrichtung: max. Gebindemasse 160.000 kg, 4-Tragzapfen, Ver- wendung von 2-Punkt An- schlagmitteln
		$\psi=1,8$	-	-	-	/KTA 2012/	Multiplikation der Kräfte mit Hublastbeiwert zur Auslegung der Tragzap- fen
		$F_G=1569,6 \text{ kN}$			-	/GRS 2011b/	Anheben / Absenken mit der Umladevorrichtung
		$F_R=240 \text{ kN}$	-	-	-	/DBETEC 2012/	Schubkräfte der Strecken- transport und Einlage- rungs-vorrichtung
		Rückholungs- und Bergungskonzepte noch nicht spezifi- ziert, entweder zurückziehen aus dem Kurzbohrloch, al- ternativ freilegen wie POLLUX®-Behälter			-	/GRS 2011b/	Lasten von Rückholung und Bergung

Tabelle 5-27: Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Dynamisch-Mechanische Einwirkungen	Beschleunigungen	Fahrt: max. 1 m/s, Bremsverzögerung: 0,5 m/s ² , Beschleunigung: 0,5 m/s ²			-	/DBETEC 2014a/	Kennwerte Schachtförderanlage
		Max. Beschleunigung 1 g			-	/DBE 1995/	Verzögerung der SELDA Anlage bei schwerem Übertreiben
		Max. Beschleunigung ≤ 1,4 g			-	/DBETEC 2010a/	Stoß zweier Wagen Puffer an Puffer
	Vibrationen auf Grund von	Max. 5 km/h gerade Strecke, max. 2,5 km/h in Kurven			-	/DBETEC 2014b/	Geschwindigkeit bei Streckentransport
		Max. 0,25 m/min	-	-	-	/DBE 1995/	Hubgeschwindigkeit Umladevorrichtung; Ähnlichkeit zur Einlagerungsvorrichtung POLLUX®
		v = 0,6 m/min	-	-	-	/DBETEC 2014b/	Verschubgeschwindigkeit Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung

Tabelle 5-28: Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Dynamisch-Mechanische Einwirkungen	Schläge / Stöße	Fall aus 9 m Höhe			-	/UNECE 2016/	Auslegung als Typ B(U) Versandstück
		Fall auf einen Dorn aus 1 m Höhe			-	/UNECE 2016/	
		Aufprall einer 500 kg schweren Platte aus 9 m Höhe			-	/UNECE 2016/	
		Fallhöhe 1340 mm aus der Umladevorrichtung			-	/DBETEC 2014b/	Sturz auf den Schacht-transportwagen
		Fallhöhe 1850 mm bei Transport und Einschubvorgang			-	/DBETEC 2014b/	Sturz von der STEV

Tabelle 5-29: Tabellarische Übersicht: Thermische Einwirkungen bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Thermische Einwirkungen	thermische Behälterleistung	Max. 15 kW	< 15 kW			/DBETEC 2016b/	Castor® V/19: Beladung DWR mix 17/2, ca. 15 kW nach 56a Zwischenlagerung; HAW 28 M: Beladung 28 CSD-V Kokillen, ca. 15 kW nach 58 a Zwischenlagerung
	Gebirgstemperatur	37,97 °C	Max. 100 °C nach StandAG			/StandAG 2017/	Gorleben, 840 m Teufe
	Brandfall	720 °C für 20 Minuten			-	/DBE 1995/	Brand nach Kollision mit Versatzfahrzeug

Tabelle 5-30: Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Strahlung bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Materialversprödung durch Strahlung	Neutronenfluenz	Sicherheitsrelevante Schäden ab einer Neutronenfluenz $> 10^{18} \text{ n/cm}^2$				/POSIVA 2012/	Angabe für Stähle

Tabelle 5-31: Tabellarische Übersicht: Zersetzung von Organika bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Zersetzung von Organika	Polyethylen	Zersetzung ab einer Dosis von 3×10^5 Gy bis 3×10^6 Gy				/KFK 1994/	

Tabelle 5-32: Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Wasserstoff bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Materialversprödung durch Wasserstoff	Stahl TStE355	-	-	Auftreten in Versuchen, keine quantitativen Angaben		/FZKA 1999/	Korrosionsversuche, Salzlauge, 170 °C
	Kohlenstoffstahl	-	-	Unter Schweizer Endlagerbedingungen geht die Nagra von keiner Sicherheitsrelevanz des Phänomens aus. Eine mögliche Abnahme der Festigkeit lässt sich nicht quantifizieren.		/NAGRA 2009/	Eine Überprüfung deutscher Konzepte anhand von Kriterien scheint notwendig. Genauere Ausführungen in Kapitel 5.4.4.2

Tabelle 5-33: Tabellarische Übersicht: Korrosion bei der direkten Endlagerung von Transport und Lagerbehältern

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Korrosionsprozesse durch chemisch / biologische Einwirkungen	Behälter Grundkörper, alt: GGG-40.3, neu: EN-GJS-400, Gusseisen mit Kugelgraphit, Werkstoff Nr. 0.7043; Ermittlung durch Gewichtsmessung	-	-		Abtragsrate 0,14 µm/a	/KFK 1990/	In-situ Versuch Asse, 32 °C, trocken
		-	-		Abtragsrate 1,01 µm/a	/KFK 1990/	In-situ Versuch Asse, geringe Lösungen, Gamma-Strahlung, 700 Tage
		-	-		Abtragsrate 0,08 ± 0,01 µm/a; kein Lochfraß	/BAMBUSII 2004/	In-situ Versuch in der Asse, 90 °C, 3740 Tage
		-	-		Abtragsrate 0,08 ± 0,06 µm/a; kein Lochfraß	/BAMBUSII 2004/	In-situ Versuch in der Asse, 180 °C, 3740 Tage Dauer
		-	-		Abtragsrate 47,5 µm/a; kein Lochfraß	/BAMBUSII 2004/	NaCl-Lösung, 90 °C, 480 Tage
		-	-		Abtragsrate 112,0 µm/a	/BAMBUSII 2004/	NaCl-Lösung, 150 °C, 365 Tage
		-	-		Abtragsrate 1 – 2 µm/a	/FZJÜL 1999/	NaCl-Lauge, 90 °C
		-	-		Abtragsrate 71 – 94 µm/a	/FZJÜL 1999/	NaCl-Lauge, 150 °C
		-	-		Abtragsrate 156 – 199 µm/a	/FZJÜL 1999/	MgCl ₂ /CaCl ₂ -Lauge, 90 °C
		-	-		Abtragsrate 178 – 205 µm/a	/FZJÜL 1999/	MgCl ₂ /CaCl ₂ -Lauge, 150 °C
		-	-		Abtragsrate 75 – 78 µm/a	/FZJÜL 1999/	Q-Lauge, 90 °C
		-	-		Abtragsrate 320 – 422 µm/a	/FZJÜL 1999/	Q-Lauge, 150 °C

Tabelle 5-34: Tabellarische Übersicht: Korrosion bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Korrosionsprozesse durch chemisch / biologische Einwirkungen	Behältergrundkörper, alt: GGG-40.3, neu: EN-GJS-400, Gusseisen mit Kugelgraphit, Werkstoff Nr. 0.7043; Ermittlung durch Messung der Wasserstoffbildungsrate	-	-	Wasserstoffbildungsrate: 853 – 1440 $\mu\text{l}/\text{m}^2$ h, Korrosionsrate von 2,4 – 3,8 $\mu\text{m}/\text{a}$		/FZJÜL 1998/	Salzgrus, 90 °C, 570 Stunden
		-	-	Wasserstoffbildungsrate: 1384-1507 $\mu\text{l}/\text{m}^2$ h, Korrosionsrate 3,8 – 4,1 $\mu\text{m}/\text{a}$		/FZJÜL 1998/	gesättigte NaCl-Lösung, 90 °C, 100 Stunden
		-	-	Wasserstoffbildungsrate: 31799 bis 32904 $\mu\text{l}/\text{m}^2$ h, Korrosionsrate 89 – 92,1 $\mu\text{m}/\text{a}$		/FZJÜL 1998/	Q-Lauge, 90 °C, 800 Stunden
		-	-	Wasserstoffbildungsrate: 34442 $\mu\text{l}/\text{m}^2$ h, Korrosionsrate 95,9 $\mu\text{m}/\text{a}$		/FZJÜL 1998/	MgCl ₂ und CaCl ₂ reicher Lauge; 90 °C; 800 Stunden
		-	-	Wasserstoffbildungsrate: 34893 $\mu\text{l}/\text{m}^2$ h, Korrosionsrate 97,3 $\mu\text{m}/\text{a}$		/FZJÜL 1998/	Q-Lauge; 150 °C; 1025 Stunden

Tabelle 5-35: Tabellarische Übersicht: Korrosion bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Korrosionsprozesse durch chemisch / biologische Einwirkungen	Deckel, 15MnNi6-3, WerkstoffNr. 1.6210; Ermittlung durch Gewichtsmessung	-	-	Abtragsrate 71 µm/a		/KFK 1993/	NaCl-Lösung, 150 °C, 18 Monate
		-	-	Abtragsrate 94 – 117 µm/a		/KFK 1993/	MgCl ₂ -Lösung, 150 °C, 18 Monate
		-	-	Abtragsrate 0,05 ± 0,01 µm/a; kein Lochfraß		/BAMBUSII 2004/	In-situ Versuch Asse, 90 °C, 3740 Tage
		-	-	Abtragsrate 0,05 ± 0,03 µm/a; kein Lochfraß		/BAMBUSII 2004/	In-situ Versuch Asse, 180 °C, 3740 Tage
		-	-	Abtragsrate 127,5 µm/a		/KFK 1992/	Q-Brine, 150 °C
		-	-	Abtragsrate 112,0 µm/a		/KFK 1992/	MgCl ₂ reiche Lösung, 150 °C
		-	-	Abtragsrate 72,0 µm/a		/KFK 1992/	NaCl reiche Lösung, 150 °C
		-	-	Abtragsrate 4 – 7 µm/a		/FZJÜL 1999/	NaCl-Lauge, 90 °C
		-	-	Abtragsrate 65 – 100 µm/a		/FZJÜL 1999/	NaCl-Lauge, 150 °C
		-	-	Abtragsrate 95 – 212 µm/a		/FZJÜL 1999/	MgCl ₂ /CaCl ₂ -Lauge, 90 °C
		-	-	Abtragsrate 200 – 290 µm/a		/FZJÜL 1999/	MgCl ₂ /CaCl ₂ -Lauge, 150 °C
		-	-	Abtragsrate 46 – 92 µm/a		/FZJÜL 1999/	Q-Lauge, 90 °C
		-	-	Abtragsrate 97 – 250 µm/a		/FZJÜL 1999/	Q-Lauge, 150 °C

Tabelle 5-36: Tabellarische Übersicht: Korrosion bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Korrosionsprozesse durch chemisch / biologische Einwirkungen	Deckel, 15MnNi6-3, WerkstoffNr. 1.6210; Ermittlung durch Messung der Wasserstoffbildungsrate	-	-	Wasserstoffbildungsrate: 1440 – 1739 $\mu\text{l/m}^2$ h, Korrosionsrate von 4,1 – 4,9 $\mu\text{m/a}$		/FZJÜL 1998/	Salzgrus, 90 °C, 570 Stunden
		-	-	Wasserstoffbildungsrate: 746 $\mu\text{l/m}^2$ h, Korrosionsrate 2,1 $\mu\text{m/a}$		/FZJÜL 1998/	gesättigte NaCl-Lösung, 90 °C, 330 Stunden
		-	-	Wasserstoffbildungsrate: 26838 – 27938 $\mu\text{l/m}^2$ h, Korrosionsrate 75,1 - 78,2 $\mu\text{m/a}$		/FZJÜL 1998/	Q-Lauge, 90 °C, 800 Stunden
		-	-	Wasserstoffbildungsrate: 55726 $\mu\text{l/m}^2$ h, Korrosionsrate 155,8 $\mu\text{m/a}$		/FZJÜL 1998/	MgCl ₂ und CaCl ₂ reiche Lauge; 90 °C; 800 Stunden
		-	-	Wasserstoffbildungsrate: 114577 $\mu\text{l/m}^2$ h, Korrosionsrate 319,9 $\mu\text{m/a}$		/FZJÜL 1998/	Q-Lauge; 150 °C; 1025 Stunden

5.4 Streckenlagerung im Tonstein

Beim Endlagerkonzept der Streckenlagerung im Tonstein sollen POLLUX[®]-3 Behälter verwendet werden. Diese wurden auf Basis des POLLUX[®]-Konzeptes für Steinsalz skizziert. Durch die Reduzierung der Beladung (Brennstäbe von 3 Brennelementen) konnten die Behälterabmessungen reduziert werden. Die Behälter sind bislang nur nach geometrischen Gesichtspunkten skizziert worden. Eine Behälterauslegung hat noch nicht stattgefunden. Für die Aufstellung der Einwirkungen musste daher häufig auf beispielhafte Annahmen zurückgegriffen werden. Die Einwirkungen werden zunächst erläutert und sind dann in Tabelle 5-37 bis Tabelle 5-46 dargestellt.

5.4.1 Mechanische Einwirkungen

5.4.1.1 Statische Einwirkungen

Scherkräfte

Scherkräfte sind im Tonstein vor allem in Bereichen von aktiven Störungszonen zu erwarten. Da die Errichtung des Endlagerbergwerks in einer geologisch stabilen Region erfolgen soll, werden Wirtsgesteinsformationen, die aktive Störungszonen enthalten, ausgeschlossen /DBE-TEC 2017b/. Es sind daher keine Scherkräfte auf die Endlagerbehälter zu erwarten. Allerdings können sich durch das Auffahren des Endlagerbergwerks Scherungen ergeben. Diese lassen sich zurzeit noch nicht quantifizieren.

Isotrope Drücke

Für Tonstein sind im FuE-Vorhaben GEIST /DBETEC 2004/ Gebirgsdrücke angegeben worden. Diese betragen 6,2 MPa in 300 m Teufe, 10,3 MPa in 500 m Teufe und 30,9 MPa in 1500 m Teufe. Im Projekt ANSICHT /BGR 2016a/ ist für die Modellregion Süd in Deutschland ein Mittelwert der Gesteinsdichte von 2520 kg/m³ angegeben. Zusammen mit der Einlagerungsteufe kann damit der vorhandene lithostatische Gebirgsdruck berechnet werden. Im Projekt ANSICHT ist eine Endlagerteufe zwischen 600 m und 800 m angenommen worden. Damit ergibt sich ein lithostatischer Gebirgsdruck von 14,8 MPa und 19,8 MPa.

Durch den Quelldruck von Bentonit und Versatzmaterialien ist mit einem weiteren Druck von maximal 2 MPa zu rechnen. Hierbei ist noch zu klären ob dieser isotrop vorliegt. Durch ungleichmäßigen Flüssigkeitszutritt ist auch eine anisotrope Belastung der Behälter denkbar.

Anisotrope Drücke

Anisotrope Drücke können sich aus den Gebirgslasten, Wärmeeintrag und dem Quelldruck ergeben. Für diese konnte noch keine Quantifizierung erfolgen.

Handhabungslasten

Durch das ähnliche Behälterkonzept sind die Handhabungslasten vergleichbar mit denen bei der Streckenlagerung im Steinsalz. Allerdings fallen diese auf Grund der geringeren Behältermasse kleiner aus. Die Gebindemasse des POLLUX[®]-3 beträgt geschätzt 38 Mg /DBETEC 2017a/. Dadurch ergibt sich eine Gewichtskraft von ca. 373 kN. Davon entfallen jeweils 93 kN

auf einen Tragzapfen. Diese sind entsprechend KTA 3905 mit einem Hublastbeiwert $\psi = 1,8$ auszulegen. Für Rückholung und Bergung wird von einem zum Steinsalz vergleichbaren Konzept ausgegangen. Für das Ziehen des Behälters in die Rückholungsstrecke wird eine Zugkraft von 100 kN erwartet. Die modifizierte Einlagerungsvorrichtung leitet maximal Linienlasten von 406,25 kN/m vertikal und 247,65 kN/m horizontal ein.

5.4.1.2 Dynamische Einwirkungen

Für die Einlagerung der Behälter im Tonstein soll die gleiche Einlagerungstechnik wie bei der Streckenlagerung im Steinsalz verwendet werden. Entsprechende dynamische Lasten können daher aus Kapitel 5.1.1.2 übernommen werden. Ob der POLLUX®-3 analog zum POLLUX®-9 /10 ebenfalls als TYP B(U) Versandstück ausgelegt werden soll, steht noch nicht fest. Ob die davon abhängenden Einwirkungen aus den Zulassungstests auch hier auslegungsrelevant sind, ist noch zu überprüfen.

5.4.2 Thermische Einwirkungen

Der bei der Streckenlagerung im Tonstein verwendete POLLUX®-Behälter soll mit den Brennstäben von 3 Brennelementen beladen werden. Für diese wird laut /DBETEC 2016b/ eine Zwischenlagerzeit von 57 Jahren und eine thermische Leistung von ca. 0,6 kW für ein DWR mix 89/11 Brennelement angesetzt. Damit hat ein beladener POLLUX®-3 Behälter eine thermische Leistung von 1,8 kW.

Für die Gebirgstemperatur im Standortmodell SÜD des Vorhabens ANSICHT ist in /BGR 2016b/ ein teufenabhängiger Temperaturgradient von 45 K/Km genannt. Die Jahresmitteltemperatur an der Oberfläche beträgt in etwa 9 °C. Für die im Vorhaben ANSICHT erwartete Endlagerteufe von 600 m ergibt sich damit eine Gebirgstemperatur von 36 °C.

5.4.3 Radiologische Einwirkungen

5.4.3.1 Materialversprödung durch Strahlung

Von sicherheitsrelevanten Schäden an Stahl ist ab einer Neutronenfluenz von 10^{18} n/cm² auszugehen /POSIVA 2012/. Eine Bewertung auf Grundlage des Behälterinventars ist noch nicht erfolgt.

5.4.3.2 Zersetzung von Organika

Zur Neutronenmoderation werden Moderatorstäbe aus Polyethylen eingesetzt. Für Polyethylen ist ab einer Dosis von 3×10^5 Gy bis 3×10^6 Gy /KFK 1994/ mit Verschlechterung der Materialeigenschaften zu rechnen. Eine Bewertung auf Grundlage des Behälterinventars ist noch nicht erfolgt.

5.4.4 Chemische und biologische Einwirkungen

5.4.4.1 Korrosionsprozesse

Innerhalb von Tonstein hängen die Korrosionsraten stark von der Umgebung und den vorhandenen Wässern und Lösungen ab. Für eine mögliche Behälterauslegung sind daher bei Erkundungsarbeiten zuerst diese zu analysieren. Zusätzlich sind mikrobielle Einwirkungen zu beachten, da diese die auftretende Korrosion signifikant verändern können.

In /FZKA 1999/ wurde der unlegierte Stahl TSTE355 (S355NL) in Tonwässern hinsichtlich der Korrosion untersucht. Verwendet wurden dazu synthetische Wässer des belgischen Boomclays bei Temperaturen von 16 °C und 90 °C. Korrosion trat hier als Flächenkorrosion auf. Lokale Effekte wie Lochfraß wurden nicht vorgefunden. Direkte Abtragsraten sind in diesem Bericht nicht angegeben.

Im Vorhaben ANSICHT wurde die Streckenlagerung als Endlagerkonzept für in Süddeutschland gelegene Formationen des Opalinustons betrachtet. Opalinuston wird in der Schweiz als Wirtsgestein für die Endlagerung radioaktiver Abfälle untersucht. In einer Zusammenstellung der Nagra in /NAGRA 2003/ können Abtragsraten für die Korrosion von unlegierten Stählen unter den Bedingungen eines Endlagers im Opalinuston gefunden werden. Darin wird eine Abtragsrate von 0,02 µm/a bis 0,34 µm/a für direkten Kontakt mit feuchtem Ton genannt. Diese wurde bei einer Temperatur von 170 °C und einer Exposition von 6 Monaten ermittelt. Unter denselben Bedingungen wird für Tonwasser eine Abtragsrate von 0,5 µm/a bis 2,1 µm/a angegeben. Im genannten Ergebnis einer weiteren Untersuchung, wurde ebenfalls für Tonwasser eine Abtragsrate von 25 µm/a ermittelt. Hierbei betrug die Temperatur 90 °C und die Exposition 9 Monate. Auf Grund der stark unterschiedlichen Korrosionsraten ist eine unterschiedliche Zusammensetzung der Tonwässer wahrscheinlich.

Basierend auf den genannten Abtragsraten wurde von der Nagra /NAGRA 2003/ die Annahme getroffen, dass für anaerobe Korrosion mit einem Abtrag von 1 mm in 1000 Jahren zu rechnen ist. Dies entspricht einer Abtragsrate von 0,1 µm/a. Zusätzlich wird mit einem weiteren Abtrag von < 1 mm gerechnet, dieser entsteht in der Übergangsphase in der noch Sauerstoff im Endlager vorhanden ist. In der gleichen Zeit wird auch von einem maximalen Lochfraß von 10 mm ausgegangen. Zusätzlich können weitere 0,02 mm auf Grund von Korrosion durch Sulfide abgetragen werden. Insgesamt wird somit mit einem Abtrag von < 1,5 cm in 1000 Jahren gerechnet.

Im Tonstein sind die Anwesenheit von Mikroorganismen und das Ablaufen mikrobieller Prozesse zu erwarten. Dies kann die Korrosion metallischer Werkstoffe beeinflussen und die Abtragsraten erhöhen. Als Folge mikrobiell beeinflusster Korrosion unabhängig vom Wirtsgestein werden in /GRS 2011c/ Abtragsraten bis zu 700 µm/a genannt. Als weitere Beispiele werden in /GRS 2011c/ Korrosionsraten von unlegierten Stählen genannt. Bei einer Untersuchung in einer 20 % Lösung von Callovo-Oxfordian Ton in synthetischem Porenwasser verdoppelte sich

die Korrosionsrate auf ungefähr 30 µm/a gegenüber einem sterilen Umfeld. Zudem waren binnen eines Monats Grübchen in der Oberfläche erkennbar. In Proben des Callovo-Oxfordian Tonstein bei in-situ Gebirgsdruck von 12 MPa ergab sich eine Abtragsrate von 27 µm/a bei Vorhandensein von Sulfat reduzierenden Bakterien. Dies steht einer Abtragsrate von 11 µm/a in sterilem Umfeld gegenüber.

Weiterhin wird in /GRS 2011c/ darauf hingewiesen, dass mikrobielle Korrosion die Form der auftretenden Korrosion verändern kann. Die für die Endlagerbehälter geplanten Stähle zeigen überwiegend einen flächenmäßigen Abtrag. Dieser kann als jährliche Abtragsrate gemittelt werden und erlaubt die lineare Interpolation auf die geplante Behälterlebensdauer. Unter Einfluss der mikrobiellen Korrosion verändert sich die Korrosion von Flächenabtrag zu lokalen Effekten wie Lochfraß. Dabei muss mit Abtragsraten von 30 µm/a gerechnet werden. An Stellen, wo durch die Bakterien ein sogenannter Biofilm gebildet wird, können bei direktem Kontakt von Stahl und Ton Abtragsraten von 500 µm/a bis zu 700 µm/a auftreten.

5.4.4.2 Materialversprödung durch Wasserstoff

Zur Wasserstoffversprödung wird eine Untersuchung der Nagra herangezogen /NAGRA 2009/. Darin wurde das mögliche Auftreten von Wasserstoffversprödung für Kohlenstoffstähle unter den Bedingungen eines Schweizer Endlagers im Opalinuston abgeschätzt. Als Umgebungsbedingungen gelten dabei der Opalinuston und Grundwässer mit Chloridgehalten zwischen 0,1 mol/l und 0,3 mol/l. Zudem wird davon ausgegangen, dass der durch Korrosionsprozesse entstehende Wasserstoff in molekularer Form im Endlager eingeschlossen wird und potenziell in das Metallgefüge diffundieren kann.

Als Ergebnis wird angegeben, dass mit dem heutigen Verständnis des Mechanismus der Wasserstoffversprödung und entsprechender Modelle, eine quantitative Abschätzung möglicher Festigkeitsverluste nicht möglich ist. Eine aus der Wasserstoffversprödung resultierende Rissbildung wird unter Schweizer Endlagerbedingungen als sehr unwahrscheinlich abgeschätzt. Weiterhin werden Empfehlungen angegeben durch die die Wahrscheinlichkeit einer wasserstoffinduzierten Rissbildung verringert werden soll. Diese werden hier folgend zusammengefasst.

Zur Abschätzung der wasserstoffinduzierten Rissbildung werden sechs mögliche Einflussfaktoren genannt. Diese sind:

- Wasserstoffkonzentration
- Temperatur
- Stahlzusammensetzung
- Gefüge
- Mechanische Eigenschaften
- Schweißnähte

Wasserstoffkonzentration

Eine Wasserstoffkonzentration, ab der es zu Versprödung kommt, lässt sich nicht quantifizieren. Ebenfalls sind die Konzentrationen in direkter Umgebung des Behälters unbekannt. Daher lässt sich anhand der Wasserstoffkonzentration keine Abschätzung vornehmen.

Temperatur

Für den Einflussfaktor Temperatur wird in /NAGRA 2009/ auf Erfahrungen aus der Erdölindustrie verwiesen. Die dort vorhandene Umgebung ist geprägt von Schwefelwasserstoff. Hier wird angegeben, dass Wasserstoffversprödung unter Laborbedingungen signifikant bei Temperaturen zwischen 20 ° und 60 °C auftritt. Bei höheren Temperaturen üblicherweise nicht. Allerdings sind aus der Praxis in Raffinerien auch Schadensfälle bei Temperaturen über 100 °C bekannt. Demnach ist auch ein Ausschließen über die Temperatur nicht möglich. Die in der Ölindustrie vorhandene Schwefelwasserstoffumgebung ist auch für die Endlagerung relevant, da diese durch ablaufende mikrobielle Prozesse erzeugt werden kann.

Stahlzusammensetzung

Laut /NAGRA 2009/ sind geringe Schwefelgehalte von < 0,002 % günstig. Im Referenzmaterial 15MnNi6-3 des POLLUX®-Behälters sind nach /KTA 1988/ Schwefelgehalte von ≤ 0,007 % vorhanden.

Gefüge

Anfällig für wasserstoffinduzierte Rissbildung sind vor allem Perlitbänder sowie Bainit und Martensit. Betrachtet wird vor allem die lokale Härte des Gefüges, hohe Härten sind dabei anfälliger.

Die Anfälligkeit gegenüber wasserstoffinduzierter Rissbildung soll durch den Phosphor- und Mangangehalt abgeschätzt werden. Dazu kann die Abbildung 5-1 verwendet werden. HIC steht dabei für "Hydrogen Induced Cracking" (wasserstoffinduzierte Rissbildung).

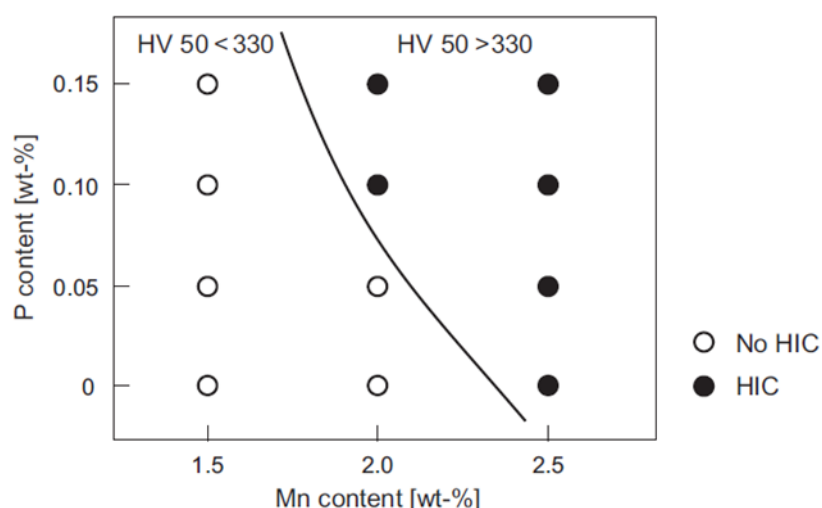


Abbildung 5-1: Anfälligkeit für wasserstoffinduzierte Rissbildung, angegeben über die lokale Härte in Relation zu Phosphor- und Mangangehalt /NAGRA 2009/

Für das Referenzmaterial des POLLUX[®], 15MnNi6-3 sind in /KTA 1988/ ein Mangangehalt von 1,2 % bis 1,65 % und ein Phosphorgehalt von $\leq 0,017$ % angegeben. Damit liegt das Material in der unteren linken Ecke der Abbildung und wäre für Wasserstoffversprödung unanfällig. Dies deckt sich auch mit einer weiteren Aussage in /NAGRA 2009/ wonach wasserstoffinduzierte Rissbildung bei modernen Stählen für Endlagerbehälter als unwahrscheinlich betrachtet wird.

Mechanische Eigenschaften

Wasserstoffinduzierte Rissbildung ist bekannt für Stähle mit Streckgrenzen zwischen 294 MPa und 784 MPa. Dabei gelten hochfeste und harte Stähle als anfälliger für das Phänomen. Stähle niedriger Festigkeit werden als weniger anfällig betrachtet. Mit einer Streckgrenze von 350 MPa bis 370 MPa liegt das Referenzmaterial des POLLUX[®] bei den Stählen niedriger Festigkeit.

Schweißnahteinfluss

Es gibt keine Hinweise auf wasserstoffinduzierte Rissbildung innerhalb von Schweißnähten. Dieses ist nur für die Wärmeeinflusszone und den Grundwerkstoff bekannt. Bei Endlagerbehältern können hohe Eigenspannungen an den Schweißnähten auftreten, da Wärmebehandlungen an den beladenen Behältern nicht mehr möglich sind. Zusammen mit einer möglichen Spannungskonzentration durch Kerbwirkung kann dies eine mögliche Rissbildung in Schweißnahtnähe begünstigen.

Auf Grundlage dieser Einflussfaktoren wird in /NAGRA 2009/ ein Auftreten wasserstoffinduzierter Rissbildung unter Schweizer Endlagerbedingungen als sehr unwahrscheinlich bewertet. Für Endlagerbehälter für hochradioaktive Abfälle in Deutschland ist eine Vergleichbarkeit mit den deutschen Umgebungsbedingungen und den geplanten Behälterwerkstoffen noch genauer zu bewerten.

Tabelle 5-37: Tabellarische Übersicht: Statisch-Mechanische Einwirkungen bei der Streckenlagerung im Tonstein

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Statisch-Mechanische Einwirkungen	Isotrope Drücke		p = 6,2 MPa			/DBETEC 2004/	Teufe 300m
			p = 10,3 MPa			/DBETEC 2004/	Teufe 500m
			p = 30,9 MPa			/DBETEC 2004/	Teufe 1500m
			p = 14,8 MPa			/BGR 2016a/	Berechnung für Teufe 600 m
			p = 19,8 MPa			/BGR 2016a/	Berechnung für Teufe 800 m
			unbekannt			-	Thermisch induzierte Spannungen aufgrund des Wärmeeintrags
			2 MPa			/DBETEC 2017a/	Quelldruck Bentonit / Versatzmaterial
	Scherung		Vorhanden, abhängig von der konkreten Endlagerauslegung			-	Nicht direkt quantifizierbar, Anisotropie
	Anisotroper Druck		unbekannt				Nicht isotroper Gebirgsdruck

Tabelle 5-38: Tabellarisch Übersicht: Statisch-Mechanische Einwirkungen bei der Streckenlagerung im Tonstein (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Statisch-Mechanische Einwirkungen	Handhabungs- lasten	$F_G=372,78 \text{ kN}$, ca. 93 kN pro Trag- zapfen	-	-	-	/GRS 2011b/ Fehler! Ver- weisquelle konnte nicht gefunden wer- den.	Brückenkran, Einlage- rungs-vorrichtung: max. Gebindemasse 160.000 kg, 4-Tragzapfen, Ver- wendung von 4-Punkt An- schlagmitteln
		$\Psi=1,8$	-	-	-	/KTA 2012/	Multiplikation Kräfte mit Hublastbeiwert zur Ausle- gung der Tragzapfen
		-	$F_R = 100 \text{ kN}$		-	/GRS 2011b/	Ziehen in die Rückho- lungs-/ Bergungsstrecke, axial oder radial, $F_N=372$ kN, $\mu = 0,27$
		-	Linienlast vertikal: 406,25 kN/m Horizontal: 247,65 kN/m		-	/SIEMAG 2016/	Handhabungslasten modifizierte Einlagerungs- vorrichtung, Auslegungs- annahme Anliegen nur an der Spitze der Zange. Ab- hängig vom Eigengewicht des Behälters.
		-	Unbekannt			-	Anisotroper Quelldruck durch ungleichmäßige Aufsättigung des Versat- zes

Tabelle 5-39: Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen bei der Streckenlagerung im Tonstein

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Dynamisch-Mechanische Einwirkungen	Beschleunigungen	Bremsverzögerung: 0,5 m/s ² , Beschleunigung: 0,5 m/s ²			-	/DBE 1994/	Kennwerte Schacht-förderanlage
		Max. 1 g			-	/DBE 1994/	Verzögerung durch Selda-Anlage bei schwerem Übertreiben
		Max. 1,4 g			-	/DBETEC 2008c/	Anstoß Plateauwagen Puffer an Puffer
		Horizontale Beschleunigung: ± 0,2 g; vertikale Beschleunigung ± 0,1 g			-	/DBETEC 2008c/	Erdbeben bei übertägiger Handhabung
		Max. 2 g lateral und vertikal nach unten, Max. 1 g vertikal nach oben			-	/DWK 1986/	Auslegungsannahmen

Tabelle 5-40: Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen bei der Streckenlagerung in Tonstein (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Dynamische-Mechanische Einwirkungen	Vibrationen auf Grund von:	Fahrt mit max. 5 m/s			-	/DBE 1994/	Kennwerte Schacht-förderanlage
		Max. 10 km/h gerade Strecke, max. 5 km/h in Kurven			-	/DBE 1995/	Transport auf Plateauwagen
		Max. 0,25 m/s			-	/DBE 1995/	Absenken und Aufnehmen mit der Einlage-rungsvorrichtung
		-	Max. 0,5 m/s		-	/SIEMAG 2016/	Fahrtgeschwindigkeit modifizierte Einlagerungsvorrichtung
	Schläge / Stöße	ablegen mit 0,25 m/min	-		-	/DBE 1995/	Ablegen des Behälters auf der Sohle
		Fall aus 3 m Höhe auf Betonboden			-	/DBETEC 2008c/	Absturz in der übertägigen Handhabung
		Fall aus 0,95 m Höhe auf die Streckensohle			-	/DBETEC 2008c/	Absturz aus der Einlage-rungsvorrichtung

Tabelle 5-41: Tabellarische Übersicht: Thermische Einwirkungen bei der Streckenlagerung in Tonstein

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Thermische Einwirkungen	thermische Behälterleistung	1,8 kW	< 1,8 kW			/DBETEC 2016b/	3 BE DWR Mix 89/11; 57 a Zwischenlagerung
	Gebirgstempera- tur	36 °C	Max. 100 °C nach StandAG			/StandAG 2017/	Berechnet für Teufe 600 m
	max. Temperatur im Inneren	DWR/SWR/HAW: 390 °C, 410 °C, 500 °C				/DBETEC 2008b/	Max. zul. Temperatur Brennstabhüllrohre oder HAW-Glas

Tabelle 5-42: Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Strahlung bei der Streckenlagerung in Tonstein

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Materialversprödung durch Strahlung	Neutronenfluenz	Sicherheitsrelevante Schäden ab einer Neutronenfluenz > 10 ¹⁸ n/cm ²				/POSIVA 2012/	Angabe für Stähle

Tabelle 5-43: Tabellarische Übersicht: Zersetzung von Organika bei der Streckenlagerung in Tonstein

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Zersetzung von Organika	Polyethylen	Zersetzung ab einer Dosis von 3×10^5 Gy bis 3×10^6 Gy				/KFK 1994/	

Tabelle 5-44: Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Wasserstoff bei der Streckenlagerung in Tonstein

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Materialversprödung durch Wasserstoff	Kohlenstoffstahl	-	Unter Schweizer Endlagerbedingungen geht die Nagra von keiner Sicherheitsrelevanz des Phänomens aus. Eine mögliche Abnahme der Festigkeit lässt sich nicht quantifizieren.			/NAGRA 2009/	Eine Überprüfung deutscher Konzepte anhand von Kriterien scheint notwendig. Genauere Ausführungen in Kapitel 5.4.4.2
	Mikrobieller Einfluss	-	Sulfat reduzierende Mikroben schaffen eine Schwefelwasserstoff-Umgebung, diese erhöht die Anfälligkeit für Wasserstoffversprödung von Metallen			/GRS 2011c/	

Tabelle 5-45: Tabellarische Übersicht: Korrosion bei der Streckenlagerung im Tonstein

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Korrosionsprozesse durch chemisch / biologische Einwirkungen	TStE355	-	Flächenkorrosion in Ton- und Bentonitwässern, Abtragsraten wurden nicht ermittelt, kein Auftreten von Lochfraß			/SMAILOS 2004/	Synthetische Wässer aus Boomclay
	Unlegierte Stähle / Kohlenstoffstähle	-	Abtragsrate 0,02 – 0,34 µm/a			/NAGRA 2003/	Feuchter Ton, 170 °C, 6 Monate
		-	Abtragsrate 0,5 – 1,1 µm/a			/NAGRA 2003/	Tonwasser, 170 °C, 6 Monate
		-	Abtragsrate 25 µm/a			/NAGRA 2003/	Tonwasser, 90 °C, 9 Monate
		-	Aerobe Korrosion < 1mm, Lochfraß ca. 10 mm			/NAGRA 2003/	Übergangsphase mit Sauerstoffeinschluss
		-		0,02 mm Abtrag		/NAGRA 2003/	Korrosion durch Sulfatreduktion
		-		Anaerobe Korrosion: 1mm		/NAGRA 2003/	Korrosion durch Wasser
		-	Gesamt Abtrag < 1,5 cm			/NAGRA 2003/	Gesamter Abtrag über 1000 Jahre, Annahme der Nagra

Tabelle 5-46: Tabellarische Übersicht: Korrosion bei der Streckenlagerung im Tonstein (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Korrosionsprozesse durch chemisch / biologische Einwirkungen	Mikrobielle Korrosion Stahl	-	Abtragsraten bis zu 700 µm/a durch mikrobielle Korrosion			/GRS 2011c/	
		-	Verdopplung der Abtragsrate auf ca. 30 µm/a durch sulfatreduzierende Mikroben			/GRS 2011c/	Kohlenstoffstahl in 20 % Lösung von Callovo-Oxfordian Tonstein in synthetischem Porenwasser, erkennbare Grübchen innerhalb eines Monats
		-	Veränderung der Abtragsrate von 11 µm/a in sterilem Zustand auf ca. 27 µm/a			/GRS 2011c/	In-Situ Druck von 12 MPa, Callovo-Oxfordian Tonstein
		-	Lokale Effekte mit Abtragsraten von 30 µm/a bis zu 500-700 µm/a bei direktem Kontakt von Stahl mit Ton; Veränderung von Flächenabtrag zu Lochfraß			/GRS 2011c/	

5.5 Bohrlochlagerung im Tonstein

Für das Endlagerkonzept der Bohrlochlagerung im Tonstein sollen rückholbare Brennstabkokillen verwendet werden. Diese sind für die Bohrlochlagerung im Steinsalz geplant worden. Für die Einlagerung im Tonstein werden diese geringer beladen. Viele der abgeleiteten Einwirkungen wurden daher aus dem Endlagerkonzept der Bohrlochlagerung im Steinsalz übernommen. Die weiteren sind endlagerkonzeptspezifische Annahmen. Die ermittelten Einwirkungen werden zunächst erläutert und sind dann in Tabelle 5-47 bis Tabelle 5-56 dargestellt

5.5.1 Mechanische Einwirkungen

5.5.1.1 Statische Einwirkungen

Scherkräfte

Scherkräfte sind im Tonstein vor allem in Bereichen von aktiven Störungszonen zu erwarten. Da die Errichtung des Endlagerbergwerks in einer geologisch stabilen Region erfolgen soll, werden Wirtsgesteinsformationen, die aktive Störungszonen enthalten, ausgeschlossen /DBE-TEC 2017b/. Es sind daher keine Scherkräfte auf die Endlagerbehälter zu erwarten. Allerdings können sich durch das Auffahren des Endlagerbergwerks Scherungen ergeben. Diese lassen sich zurzeit noch nicht quantifizieren. Scherkräfte werden zudem durch den Bentonitbuffer aufgenommen und wirken nicht in voller Höhe auf den Endlagerbehälter ein.

Isotrope Drücke

Für das Endlagerkonzept der Bohrlochlagerung im Tonstein sind prinzipiell die gleichen Gebirgsdrücke wie bei der Streckenlagerung im Tonstein zu erwarten. Diese können Kapitel 5.4.1.1 entnommen werden.

Als weiterer Isotroper Druck ist Quelldruck zu erwarten. Für tonige Versatzmaterialien ist hier ein Druck von bis zu 2 MPa zu erwarten. Für das Buffermaterial wird nach schwedischer SKB /SKB 2010b/ von bis 15 MPa Quelldruck ausgegangen. Dieser wirkt hier auf den Innenliner der Bohrung. Damit der Quelldruck isotrop vorliegt, ist von gleichmäßigem Zutritt von Flüssigkeit und Aufsättigung auszugehen. Erfolgen diese ungleichmäßig ist der Quelldruck anisotrop anzunehmen.

In einem Einlagerungsbohrloch sollen drei Brennstabkokillen mit einer Masse von jeweils 52 Mg eingelagert werden. Damit wirkt unter der Vernachlässigung von Siloeffekten eine Last von zwei Brennstabkokillen auf die unterste Kokille. Diese Last beträgt somit 104 kN.

Anisotrope Drücke

Anisotrope Drücke auf Grund der Gebirgslasten oder ungleichmäßig auftretender Quelldrücke sind noch zu quantifizieren. Vor allem für das Buffermaterial ist bei ungleichmäßigem Zutritt von Wässern mit einem anisotropen Quelldruck zu rechnen.

Handhabungslasten

Die Handhabungslasten entsprechen denen bei der Bohrlochlagerung im Steinsalz und wurden in Kapitel 5.2.1.1 beschrieben. Da der Versatz hier ebenfalls mit Quarzsand erfolgt, wird auch die bei der Rückholung auftretende Reibkraft als weiterhin vorhanden angesehen.

5.5.1.2 Dynamische Einwirkungen

Dynamische Einwirkungen entsprechen der Bohrlochlagerung im Steinsalz. Grund dafür ist die identische Transport- und Einlagerungstechnik. Die dynamischen Einwirkungen sind in Kapitel 5.2.1.2 beschrieben.

5.5.2 Thermische Einwirkungen

Im Tonstein erfolgt die Beladung der Brennstabkokille nur mit den Brennstäben von 2 DWR-BE, bzw. 6 SWR-BE, 5 WWER-DWR-BE oder mit 2 HAW-Kokillen (CSD-V). Nach /DBETEC 2016b/ wird auch hier eine Zwischenlagerzeit von 57 Jahren und damit eine thermische Leistung von 0,6 kW für DWR Mix 89/11 Brennelemente angenommen. Damit gilt für eine Brennstabkokille eine thermische Leistung von 1,2 kW. Diese wird als abdeckend für Beladungen mit den anderen Brennstäben oder Kokillen betrachtet. Über die Einlagerungsdauer nimmt die thermische Behälterleistung ab.

In /BGR 2013/ wird für das Endlagerstandortmodell Nord aus dem Vorhaben ANSICHT ein teufenabhängiger Temperaturgradient von 40 K/Km angenommen. Die durchschnittliche Temperatur an der Geländeoberfläche beträgt 8 °C. Für eine angenommene Endlagerteufe von 600 m lässt sich damit eine Gebirgstemperatur von 33 °C berechnen.

5.5.3 Radiologische Einwirkungen

5.5.3.1 Materialversprödung durch Strahlung

Für die Materialversprödung durch Strahlung sind die Aussagen aus Kapitel 5.4.3 für die Streckenlagerung im Tonstein weiterhin gültig.

5.5.3.2 Zersetzung von Organika

Im Deckel der Brennstabkokille ist eine Moderatorplatte aus Polyethylen platziert. Für Polyethylen ist ab einer Dosis von 3×10^5 Gy bis 3×10^6 Gy /KFK 1994/ mit Verschlechterung der Materialeigenschaften zu rechnen. Eine Bewertung auf Grundlage des Behälterinventars ist noch nicht erfolgt.

5.5.4 Chemische und biologische Einwirkungen

5.5.4.1 Korrosionsprozesse

Die Einlagerung der Brennstabkokillen erfolgt innerhalb eines lösungsdichten Innenliners. Darin werden die Brennstabkokillen mit trockenem Quarzsand versetzt. Um den Innenliner befindet sich ein Bentonitbuffer. Die Bohrung selbst ist mit einem perforierten Außenliner verrohrt. Für den lösungsdichten Innenliner wird laut /DBETEC 2015b/ eine Lebensdauer von 500 Jahren angesetzt. Damit ist erst nach 500 Jahren mit Lösungszutritt zur Brennstabkokille und entsprechender Korrosion zu rechnen.

Prinzipiell können auf Grund ähnlicher bzw. gleicher Werkstoffe die in Kapitel 5.4.4.1 bereits erläuterten Korrosionsraten im Tonstein auch hier angesetzt werden. Zusätzlich ist noch die Umgebung von Bentonit zu betrachten. In /NAGRA 2003/ werden auch Abtragsraten für unlegierte Stähle im Bentonit genannt. Für eine Expositionsdauer von 816 h in Grundwasser gesättigtem Bentonit bei 80 °C wird eine Abtragsrate von 24 µm/a bis 68 µm/a genannt. Bei 140 °C und ansonsten gleichen Bedingungen beträgt die Abtragsrate 20 µm/a bis 40 µm/a. Bei längerer Expositionsdauer von 6648h fallen die Abtragsraten auf Grund der langsamer ablaufenden Korrosionsprozesse und der Berechnungsart ab. Hier sind noch Abtragsraten von 4 µm/a bis 10 µm/a bei 80 °C und 5 µm/a bis 13 µm/a bei 140 °C genannt. Für verdichteten Bentonit bei 80 °C wird eine Abtragsrate von 2 µm/a bis 6 µm/a angegeben. Weiterhin sind Abtragsraten für Bentonitwasser angegeben. Diese beträgt 0,15 µm/a bei 30 °C und 0,05 µm/a bei 50 °C.

Mikrobielle Einwirkungen können zur Erhöhung der Korrosion führen. Mikrobielle Einwirkungen auf Endlagerbehälter im Tonstein wurden bereits in Kapitel 5.4.4.1 erläutert. Dies ist auch für die Bohrlochlagerung gültig.

5.5.4.2 Materialversprödung durch Wasserstoff

Hier werden die Erläuterungen aus Kapitel 5.3.4.2 als weiterhin zutreffend betrachtet.

Tabelle 5-47: Tabellarische Übersicht: Statisch-Mechanische Lasten bei der Bohrlochlagerung in Tonstein

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Statisch-Mechanische Einwirkungen	Isotrope Drücke	-	p = 6,2 MPa			/DBETEC 2004/	Teufe 300m
		-	p = 10,3 MPa			/DBETEC 2004/	Teufe 500m
		-	p = 30,9 MPa			/DBETEC 2004/	Teufe 1500m
		-	p = 14,8 MPa			/BGR 2016a/	Berechnung für Teufe 600 m
		-	p = 19,8 MPa			/BGR 2016a/	Berechnung für Teufe 800 m
		-	unbekannt			-	Thermisch induzierte Spannungen aufgrund des Wärmeeintrags
		-	2 MPa			/DBETEC 2017a/	Quelldruck Bentonit / Versatzmaterial
		-	Bis zu 15 MPa			/SKB 2010b/	Quelldruck Buffer
		-	Fax = 104 kN			-	Stapellast bei drei Kokillen
	Scherung	-	Vorhanden, abhängig von der konkreten Endlager-auslegung			-	Nicht direkt quantifizierbar, Anisotropie

Tabelle 5-48: Tabellarische Übersicht: Statisch-Mechanische Lasten bei der Bohrlochlagerung in Tonstein (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Statisch-Mechanische Einwirkungen	Handhabungslasten	$F_G = 52 \text{ kN}$			-	/GRS 2011b/	Max. Gebindemasse 5300 kg, Kokille angeschlagen am Tragpilz
		-	$F_R = 20,3 \text{ kN}$		-	/GRS 2012b/	Reibkraft auf die Kokillen durch den Versatz, zu überwinden bei Rückholung
		-	$F_z = 81 \text{ kN}$		-	/DBETEC 2006/	Max. Zugkraft der Rückholvorrichtung bei klemmender Kokille
	Anisotroper Druck	-	unbekannt			-	Anisotroper Druck durch ungleichmäßige Aufsättigung des Buffers

Tabelle 5-49: Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Lasten bei der Bohrlochlagerung in Tonstein

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Dynamische-Mechanische Einwirkungen	Beschleunigungen	Bremsverzögerung: 0,5 m/s ² , Beschleunigung: 0,5 m/s ²			-	/DBE 1994/	Kennwerte Schachtförderanlage
		Max. Beschleunigung ≤ 2 g			-	/DBETEC 2010a/	Annahme maximale dyn. Einwirkung bei Handhabung
	Vibrationen auf Grund von:	Max. Hubgeschwindigkeit mit Last 10 m/s; Aufsetzen mit 1 m/s			-	/DBETEC 2006/	Absenken / Heraufziehen der Kokille im Bohrloch
		Transport auf Plateauwagen mit 10 km/h in gerader Strecke, 5 km/h in Kurven			-	/DBE 1995/	
		Schachtförderung mit 5 m/s			-	/DBE 1994/	
		-	Noch nicht spezifiziert		-	/GRS 2012b/	Vibration / Rütteln bei im Versatz klemmender Ko- kille

Tabelle 5-50: Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen bei Bohrlochlagerung in Tonstein (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Dynamisch-Mechanische Einwirkungen	Schläge / Stöße	Anschlagen mit max. Hubgeschwindigkeit von 10 m/s an die Bohrlochwand				/DBETEC 2006/	
		Aufsetzen mit 1 m/s in den Sandversatz			-	/DBETEC 2006/	
		Bremskraft 288 kN			-	/DBETEC 2006/	Bremskraft Kokillenhubwerk

Tabelle 5-51: Tabellarische Übersicht: Thermische Einwirkungen bei Bohrlochlagerung in Tonstein

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Thermische Einwirkungen	thermische Behälterleistung	max. 1,2 kW	< 1,2 kW			/DBETEC 2016b/	2 DWR-BE mix 89/11, 57 a Zwischenlagerung
	max. Oberflä- chentemperatur	TFB: 85 °C			-	/DBETEC 2010a/	Während Handhabungen
		-	100 °C			/StandAG 2017/	Eingelagerter Behälter
		max. Temperatur im Inneren	DWR/SWR/HAW: 390 °C,410 °C, 500 °C				/DBETEC 2008b/

Tabelle 5-52: Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Strahlung bei Bohrlochlagerung in Tonstein

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Materialversprödung durch Strahlung	Neutronenfluenz	Sicherheitsrelevante Schäden ab einer Neutronenfluenz $> 10^{18} \text{ n/cm}^2$				/POSIVA 2012/	Angabe für Stähle

Tabelle 5-53: Tabellarische Übersicht: Zersetzung von Organika bei Bohrlochlagerung in Tonstein

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Zersetzung von Organika	Polyethylen	Zersetzung ab einer Dosis von $3 \times 10^5 \text{ Gy}$ bis $3 \times 10^6 \text{ Gy}$				/KFK 1994/	

Tabelle 5-54: Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Wasserstoff bei Bohrlochlagerung in Tonstein

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Materialversprödung durch Wasserstoff	Kohlenstoffstahl	-	Unter Schweizer Endlagerbedingungen geht die Nagra von keiner Sicherheitsrelevanz des Phänomens aus. Eine mögliche Abnahme der Festigkeit lässt sich nicht quantifizieren.			/NAGRA 2009/	Eine Überprüfung deutscher Konzepte anhand von Kriterien scheint notwendig. Genauere Ausführungen in Kapitel 5.4.4.2
	Mikrobieller Einfluss	-	Sulfat reduzierende Mikroben schaffen eine Schwefelwasserstoff-Umgebung, diese erhöht die Anfälligkeit für Wasserstoffversprödung von Metallen			/GRS 2011c/	

Tabelle 5-55: Tabellarische Übersicht: Korrosion bei Bohrlochlagerung in Tonstein

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Korrosionsprozesse durch chemische / biologische Einwirkungen	TStE355	-	Flächenkorrosion in Ton- und Bentonitwässern, Abtragsraten wurden nicht ermittelt, kein Auftreten von Lochfraß			/SMAILOS 2004/	-
	Unlegierte Stähle / Kohlenstoffstähle	-	Abtragsrate 0,02 – 0,34 µm/a			/NAGRA 2003/	Feuchter Ton, 170 °C, 6 Monate
		-	Abtragsrate 0,5 – 1,1 µm/a			/NAGRA 2003/	Tonwasser, 170 °C, 6 Monate
		-	Abtragsrate 25 µm/a			/NAGRA 2003/	Tonwasser, 90 °C, 9 Monate
		-	Abtragsrate 24 – 68 µm/a;			/NAGRA 2003/	Grundwasser gesättigter Bentonit, 80 °C, 816 h
		-	Abtragsrate 20 – 40 µm/a;			/NAGRA 2003/	Grundwasser gesättigter Bentonit, 140 °C, 816h
		-	Abtragsrate 4 – 10 µm/a;			/NAGRA 2003/	Grundwasser gesättigter Bentonit, 80 °C, 6648h
		-	Abtragsrate 5 – 13 µm/a;			/NAGRA 2003/	Grundwasser gesättigter Bentonit, 140 °C, 6648h
		-	Abtragsrate 2 – 6 µm/a;			/NAGRA 2003/	verdichteter Bentonit, 80 °C, 700 Tage
		-	Aerobe Korrosion < 1mm, Lochfraß ca. 10 mm			/NAGRA 2003/	Übergangsphase mit Sauerstoffeinschluss
		-	-	0,02 mm Abtrag		/NAGRA 2003/	Korrosion durch Sulfatreduktion
		-	-	Anaerobe Korrosion: 1mm		/NAGRA 2003/	Korrosion durch Wasser
		-	Gesamt Abtrag < 1,5 cm			/NAGRA 2003/	Gesamter Abtrag über 1000 Jahre, Annahme der Nagra

Tabelle 5-56: Tabellarische Übersicht: Korrosion bei Bohrlochlagerung in Tonstein (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Korrosionsprozesse durch chemische / biologische Einwirkungen	Mikrobielle Korrosion Stahl	-	Abtragsraten bis zu 700 µm/a durch mikrobielle Korrosion			/GRS 2011c/	
		-	Verdopplung der Abtragsrate auf ca. 30 µm/a durch sulfatreduzierende Mikroben			/GRS 2011c/	Kohlenstoffstahl in 20 % Lösung von Callovo-Oxfordian Ton in synthetischem Porenwasser, erkennbare Grübchen innerhalb eines Monats
		-	Veränderung der Abtragsrate von 11 µm/a in sterilem Zustand auf ca. 27 µm/a			/GRS 2011c/	In-Situ Druck von 12 MPa, Callovo-Oxfordian Tonstein
		-	Lokale Effekte mit Abtragsraten von 30 µm/a bis zu 500 – 700 µm/a bei direktem Kontakt von Stahl mit Ton; Veränderung von Flächenabtrag zu Lochfraß			/GRS 2011c/	

5.6 Modifiziertes KBS-3-Konzept im Kristallin

Das modifizierte KBS-3-Konzept für ein Endlager in Kristallingestein wurde in Anlehnung an das schwedisch / finnische KBS-3-Konzept skizziert. Hierfür soll eine Brennstabkokille um eine Kupferhülle ergänzt werden. Die aufgelisteten Einwirkungen sind überwiegend endlagerkonzeptspezifische Annahmen. Einige Einwirkungen konnten aus dem schwedischen KBS-3-Konzept übernommen werden. Die Einwirkungen werden zunächst erläutert und dann in Tabelle 5-58 bis Tabelle 5-68 dargestellt.

5.6.1 Mechanische Einwirkungen

5.6.1.1 Statische Einwirkungen

Scherkräfte

Scherkräfte sind im Kristallingestein vor allem in Bereichen von aktiven Störungszonen oder Klüften zu erwarten. Die Errichtung der Einlagerungsbohrlöcher soll in ausreichendem Abstand zu diesen Regionen erfolgen /DBETEC 2017a/. Es sind daher keine Scherkräfte auf die Endlagerbehälter zu erwarten. Allerdings können sich durch das Auffahren des Endlagerbergwerks Scherungen ergeben. Diese lassen sich zurzeit noch nicht quantifizieren. Einwirkende Scherkräfte werden zudem durch den Buffer abgetragen.

Isotrope Drücke

Als Isotrope Drücke wirken vor allem die Gebirgslasten. In /DBETEC 2017a/ ist eine Dichte des Gebirges von 2700 kg/m^3 angegeben. Für eine Teufe von 300 m ergibt dies einen Gebirgsdruck von 8 MPa. In 800 m Teufe beträgt der Gebirgsdruck 21 MPa. In diesem Konzept wirken die Gebirgslasten hauptsächlich über den Buffer auf den Endlagerbehälter ein.

Für tonige Versatzmaterialien wird von einem Quelldruck von 2 MPa ausgegangen. Der Bentonit des Buffers kann nach SKB /SKB 2010b/ bis zu 15 MPa Quelldruck erreichen. Bei ungleichmäßiger Aufsättigung des Buffers ist auch ein anisotroper Quelldruck denkbar.

Da pro Bohrloch nur eine Kokille eingelagert wird, treten keine Stapellasten auf.

Anisotrope Drücke

Weitere anisotrope Drücke sind durch die Gebirgslasten und durch den Bentonitbuffer möglich. Vor allem durch ungleichmäßige Aufsättigung des Bentonitbuffers können anisotrope Drücke entstehen. Für das modifizierte KBS-3-Konzept und Standorte in Deutschland sind diese noch zu quantifizieren. Für das KBS-3-Konzept gehen Posiva und SKB /POSIVA 2018/ davon aus, dass der Quelldruck des Buffers zwischen 3 MPa und 10 MPa beträgt und auch asymmetrisch auftreten wird. Weitere anisotrope mechanische Lasten, die über die Langzeitentwicklung des Endlagers auftreten können, ergeben sich zum einen aus unterschiedlichen Einbaudichten des Buffers und aus der Einlagerung in nicht perfekt senkrechten oder geraden Bohrlöchern.

Handhabungslasten

Die Handhabungen entsprechen grundsätzlich den schon aus den anderen Bohrlochkonzepten bekannten Vorgängen. Durch die höhere Gebindemasse auf Grund der Kupferhülle, /DBE-TEC 2017a/ treten jedoch abweichende Lasten auf. Die BSK-Cu hat hier eine Masse von ca. 9.800 kg. Dies ergibt eine Gewichtskraft von ca. 96 kN beim Anschlagen am Traggilz. Lasten aus Rückholung und Bergung konnten auf Grund eines noch fehlenden Rückholungs- und Bergungskonzeptes noch nicht quantifiziert werden.

5.6.1.2 Dynamische Einwirkungen

Dynamische Einwirkungen treten beim Transport der Abfallgebinde im Schacht, in Strecken und bei der Handhabung zur Einlagerung auf. Da diese Vorgänge und die verwendete Einlagerungstechnik beim modifizierten KBS-3-Konzept identisch zu denen der Bohrlochlagerung im Steinsalz sind, können die entsprechenden Aussagen aus Kapitel 5.2.1.2 übernommen werden.

5.6.2 Thermische Einwirkungen

Beim modifizierten KBS-3-Konzept soll die Beladung der BSK-Cu mit 1,8 DWR-BE, 5,4 SWR-BE, 15,25 WWER-BE, 2 CSD-V, 3 CSD-B oder 3 CSD-C erfolgen /DBETEC 2017a/. Nach /DBETEC 2016b/ kann für DWR Mix 89/11 Brennelemente eine Zwischenlagerzeit von 57 Jahren und eine thermische Leistung von 0,6 kW pro Brennelement angenommen werden. Damit hat eine BSK-Cu eine thermische Leistung von 1,1 kW. Dies gilt als abdeckend für die weiteren Beladungen.

Für den geothermischen Gradienten wurde im Vorhaben CHRISTA /DBETEC 2016a/ eine Zunahme der Temperatur um 3 K pro 100 m Teufe abgeschätzt. An der Oberfläche beträgt die Durchschnittstemperatur ungefähr 9 °C. Für eine nach KONEKD /DBETEC 2017a/ wahrscheinliche Endlagerteufe von 600 m kann demnach von einer ungestörten Gebirgstemperatur von ca. 27 °C ausgegangen werden. Für tiefere Teufenlagen wird diese entsprechend ansteigen. Für 1000 m Teufe läge die Gebirgstemperatur bei 38 °C.

5.6.3 Radiologische Einwirkungen

5.6.3.1 Materialversprödung durch Strahlung

Für Stahl ist ab einer Neutronenfluenz von 10^{18} n/cm² mit sicherheitsrelevanten Schädigungen zu rechnen /POSIVA 2012/. Eine Bewertung auf Grundlage geplanter Inventare hat noch zu erfolgen.

5.6.3.2 Zersetzung von Organika

In der Brennstabkokille ist eine Moderatorplatte aus Polyethylen verbaut. Für Polyethylen ist ab einer Dosis von 3×10^5 Gy bis 3×10^6 Gy /KFK 1994/ mit Verschlechterung der Materialeigenschaften zu rechnen. Ein Erreichen dieser Dosis durch das Inventar des Behälters ist noch zu überprüfen.

5.6.4 Chemische und biologische Einwirkungen

5.6.4.1 Korrosionsprozesse

Die Betrachtung der Korrosion erfolgt hier aufgeteilt für die Kupferhülle und die Brennstabkokille.

Kupferhülle

Die Umhüllung des Behälters soll aus Kupfer gefertigt werden. Die SKB in Schweden geht davon aus, dass in 1 Million Jahren ein Abtrag von 5 mm durch Korrosion an der Kupferhülle zu erwarten ist /SKB 2010c/. Bei der Posiva in Finnland /POSIVA 2012/, wo identische Behälter verwendet werden sollen, wird von maximal 2 mm Abtrag in 1 Million Jahren ausgegangen. Dabei soll sich ein Abtrag von 0,1 mm bis 1 mm im Zeitraum kurz nach Endlagerverschluss ergeben. Zu dieser Zeit ist der Buffer noch nicht gesättigt und es ist noch eingeschlossener Sauerstoff für Korrosionsreaktionen verwendbar. Nach Sättigung des Buffers und sauerstofffreier Umgebung wird von einem weiteren Abtrag von 1 mm ausgegangen. Daraus ergeben sich die genannten maximal 2 mm Abtrag.

Korrosionsuntersuchungen von reinem Kupfer sowie zwei Kupferlegierungen wurden in Granitwasser mit einem Chloridgehalt von 98 mg/l durchgeführt /SMAILOS 2004/. Bei einer Temperatur von 90 °C wurde für reines Kupfer eine Korrosionsrate von $4,3 \pm 0,5 \mu\text{m/a}$ ermittelt. Für die Legierung Cu-Ni-90-10 wurde eine Abtragsrate von $6,4 \pm 0,4 \mu\text{m/a}$ ermittelt. Für die Legierung Cu-Ni-70-30 ergab sich eine Abtragsrate von $1,1 \pm 0,5 \mu\text{m/a}$. Die Versuche wurden jeweils über 430 Tage durchgeführt. Allgemein kann mit geringer Korrosion von Kupfer in Granitwasser gerechnet werden. Bei höherem Chloridgehalt der Granitwässer steigt die Abtragsrate an. Dasselbe gilt für das Vorhandensein von Sulfid reduzierenden Bakterien. Reines Kupfer bildet bei Korrosion eine schützende Schicht an der Oberfläche. Wird diese beschädigt, kann es zu Lochfraß kommen.

Weitere Untersuchungen /SMAILOS 2004/ fanden an Cu-Ni-70-30 und sauerstofffreiem Kupfer statt. Diese wurden in Granit-Bentonit Wässern, wie sie im spanischen Konzept vorkommen, geprüft. Dazu wurden Proben in Wässern mit unterschiedlichen Chloridgehalten geprüft. Dabei zeigt sich eine Abhängigkeit der Abtragsrate vom Chloridgehalt der Wässer. Mit steigendem Chloridgehalt steigt auch die Abtragsrate.

Tabelle 5-57: Abtragsraten für Kupferwerkstoffe bei verschiedenen Chloridgehalten nach /SMAILOS 2004/

Material	Cl ⁻ (mg/l)	Abtragsrate (µm/a)	
		25 °C	90 °C
CuOF	6550	11	13
	15000	14	70
	50000	86	140
Cu30Ni	6550	21	70
	15000	-	70
	50000	65	390

Ebenso wurden in /SMAILOS 2004// steriles und mit Sulfat reduzierenden Bakterien versehene Granitwasser verglichen. Dabei war eine deutliche Zunahme der Korrosionsprodukte an der Probenoberfläche bei Anwesenheit von Mikroben sichtbar. Zudem wurden auch deutlich höhere Abtragsraten ermittelt. So ergibt sich für Cu30Ni eine Abtragsrate von ca. 10 µm/a bei 675 Stunden Versuchsdauer in sterilem Wasser. Bei Anwesenheit von Sulphid reduzierenden Bakterien steigt die Abtragsrate auf ca. 90 µm/a. Die Tests fanden unter einem Chloridgehalt von 6500 mg/l statt. Die Temperatur betrug ca. 25 °C bis 27 °C, da für die Bakterien nur ein Überleben bei einer Temperatur von 10 °C bis 50 °C angegeben wurde.

In /GRS 2011c/ findet sich auch eine Angabe zum Zusammenspiel von Kupfer, Bentonit und mikrobieller Korrosion. Hier ist für MX-80 Bentonit angegeben, dass die Korrosion bei Erwärmung auf über 120 °C und damit abnehmender mikrobieller Aktivität um das ca. 4 bis 16-fache zurückgeht.

Stahlwerkstoffe

In /FZKA 2003/ wurde der Werkstoff TStE 355 in Granitwasser untersucht. In einem Granitwasser mit 98 mg/l Cl⁻ wurde eine Abtragsrate von 21,1 ± 2,1 µm/a ermittelt. Bei höherem Chloridgehalt von 6260 mg/l trat eine Abtragsrate von 22,6 ± 3,6 µm/a auf. Hier lagerten sich außerdem die Korrosionsprodukte auf der Oberfläche ab und bildeten eine schützende Schicht. An Stellen wo diese verletzt wurde, bildete sich Lochfraß mit Abtragsraten von bis zu 1300 µm in 460 Tagen.

Für unlegierte und Kohlenstoffstähle sind Abtragsraten in /NAGRA 2003/ angegeben. Für den Zusammenhang mit Bentonit sind diese bereits in Kapitel 5.5.4.1 angegeben. Zusätzlich sind aber auch noch kristallinspezifische Werte angegeben. Für synthetisches Granitwasser ist eine Abtragsrate von max. 0,1 µm/a angegeben. Für Grundwasser aus dem schwedischen Untergrundlabor Äspö mit einem Chloridgehalt von 0,3 mol/l wird eine Abtragsrate von 0,1 µm/a genannt.

In /NAGRA 2003/ sind zudem ältere konservative Annahmen aus den Schweizer Untersuchungen im Kristallin genannt. Hier wird für Kohlenstoffstähle innerhalb von 1000 Jahren von folgenden Abträgen ausgegangen:

- 1 mm Abtrag in der Übergangsphase mit eingeschlossenem Sauerstoff
- 9 mm Abtrag durch Sulfid entstehend aus Sulfat Reduktion
- 20 mm anaerobe Korrosion durch Wasser

Insgesamt wurde somit die Annahme getroffen, dass ca. 30 mm in 1000 Jahren abgetragen werden.

Für die Korrosion der Stahlwerkstoffe ist die Auswirkung der Kupferhülle zu prüfen. Bleibt diese für eine Million Jahre zuverlässig dicht, kommt die Brennstabkokille nicht in Kontakt mit dem geochemischen Milieu. Daher ist keine Korrosion der Brennstabkokille im Inneren zu erwarten. Diese könnte nur minimal durch den Restwassergehalt des Inventars von innen korrodieren.

5.6.4.2 Materialversprödung durch Wasserstoff

In /FZKA 1999/ werden ebenfalls Untersuchungen zur Spannungsrisskorrosion in Granitwässern beschrieben. Spannungsrisskorrosion trat hier nicht auf, eine festgestellte Abnahme der Duktilität an den Proben wird auf Wasserstoffversprödung zurückgeführt. Quantitative Angaben zur Abnahme der Duktilität wurden nicht gemacht.

Mögliche Einflusskriterien auf die Materialversprödung durch Wasserstoff wurden bereits in Kapitel 5.4.4.2 beschrieben. Eine Übertragbarkeit auf die veränderten Endlagerbedingungen ist noch zu überprüfen. Vor allem ist hier der Einfluss der Kupferhülle zu beachten. Sollte diese zuverlässig über eine Million Jahre gasdicht bleiben, ist das Vorkommen von Wasserstoffversprödung an der Brennstabkokille möglicherweise ausschließbar.

Für die Kupferhülle wird im KBS-3-Konzept der SKB hochreines, sauerstoffreies und phosphordotiertes Kupfer verwendet. In /SKB 2019/ werden verschiedene Experimente zum Eindringen von Wasserstoff in Kupfer ausgewertet. In den dabei untersuchten Probekörpern wurden Wasserstoff gefüllte Blasen oder intergranulare Risse nur innerhalb einer dünnen Randschicht gefunden. Diese war etwa 20 µm bis 110 µm dick und befand sich an der dem Wasserstoff ausgesetzten Oberfläche. Da der Großteil des Materials nicht von der Wasserstoffaufnahme beeinflusst war, konnte keine Festigkeitsveränderung bzw. Versprödung festgestellt werden. Selbst in Probekörpern mit dicken von 1,5 mm oder weniger konnte nur geringfügig verringerte Festigkeiten und Zähigkeiten festgestellt werden. Dabei stand bei den Experimenten mehr freier Wasserstoff zur Verfügung als später unter Endlagerbedingungen erwartet wird. Auf Grundlage dieser Auswertung hat die SKB geschlussfolgert, dass durch Wasserstoffversprödung die Behälterintegrität im KBS-3-Konzept nicht gefährdet ist.

Eine Wasserstoffversprödung während der Behälterfertigung, zum Beispiel beim Verschweißen des Behälters, ist zu verhindern. Der Wasserstoffgehalt für das Behältermaterial wird deshalb bei der SKB auf maximal 0,6 ppm begrenzt /SKB 2010a/.

Tabelle 5-58: Tabellarische Übersicht: Statisch-Mechanische Einwirkungen beim modifizierten KBS-3-Konzept

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Statisch-Mechanische Einwirkungen	Isotroper Druck	-	p = 8 MPa			/DBETEC 2017a/	Dichte: 2700 kg/m ³ ; Teufe: 300 m
		-	p = 21 MPa			/DBETEC 2017a/	Dichte: 2700 kg/m ³ ; Teufe: 800 m
		-	2 MPa			/DBETEC 2017a/	Quelldruck Versatzmaterial
		-	Bis zu 15 MPa			/SKB 2010b/	Quelldruck Buffer
		-	entfällt			-	Nur eine Kokille pro Bohrloch
	Anisotroper Druck	-	3 bis 10 MPa			/POSIVA 2018/	Anisotroper Quelldruck des Buffers
	Scherung	-	Vorhanden, abhängig von der konkreten Endlagerauslegung			-	Nicht direkt quantifizierbar, Anisotropie
	Handhabungslasten	F _G = 96 kN			-	/DBETEC 2017a/	Max. Gebindemasse 9800 kg, Kokille angeschlagen am Tragpils
		-	Nicht spezifiziert			-	Lasten aus Rückholung und Bergung

Tabelle 5-59: Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen beim modifizierten KBS-3-Konzept

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Dynamisch-Mechanische Einwirkungen	Beschleunigungen	Bremsverzögerung: 0,5 m/s ² , Beschleunigung: 0,5 m/s ²			-	/DBE 1994/	Kennwerte Schachtförderanlage
		Max. Beschleunigung ≤ 2g			-	/DBETEC 2010a/	Annahme maximale dyn. Einwirkung bei Handhabung
	Vibrationen auf Grund von:	Max. Hubgeschwindigkeit mit Last 10 m/s; Aufsetzen mit 1 m/s			-	/DBETEC 2006/	Absenken / Heraufziehen der Kokille im Bohrloch
		Transport auf Plateauwagen mit 10 km/h in gerader Strecke, 5 km/h in Kurven			-	/DBE 1995/	
		Schachtförderung mit 5 m/s			-	/DBE 1994/	
		-	Noch nicht spezifiziert		-	/GRS 2012b/	Vibration / Rütteln bei im Versatz klemmender Ko- kille

Tabelle 5-60: Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen beim modifizierten KBS-3-Konzept (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Dynamisch-Mechanische Einwirkungen	Schläge / Stöße	Anschlagen mit max. Hubgeschwindigkeit von 10 m/s an die Bohrlochwand				/DBETEC 2006/	
		Aufsetzen mit 1 m/s			-	/DBETEC 2006/	
		Bremskraft 288 kN			-	/DBETEC 2006/	Bremskraft Kokillenhubwerk

Tabelle 5-61: Tabellarische Übersicht: Thermische Einwirkungen beim modifizierten KBS-3-Konzept

Einwirkungen		Zeitraum				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Thermische Einwirkungen	thermische Behälterleistung	Max. 1,1 kW	< 1,1 kW			/DBETEC 2016b/	1,8 DWR-BE mix 89/11, 57 a Zwischenlagerung
	Gebirgstemperatur	27 °C	Max. 100 °C nach StandAG			/DBETEC 2016a/	600 m Teufe

Tabelle 5-62: Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Strahlung beim modifizierten KBS-3-Konzept

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Materialversprödung durch Strahlung	Neutronenfluenz	Sicherheitsrelevante Schäden ab einer Neutronenfluenz $> 10^{18} \text{ n/cm}^2$				/POSIVA 2012/	Angabe für Stähle

Tabelle 5-63: Tabellarische Übersicht: Zersetzung von Organika beim modifizierten KBS-3-Konzept

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Zersetzung von Organika	Polyethylen	Zersetzung ab einer Dosis von $3 \times 10^5 \text{ Gy}$ bis $3 \times 10^6 \text{ Gy}$				/KFK 1994/	

Tabelle 5-64: Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Wasserstoff beim modifizierten KBS-3-Konzept

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Material- versprödung durch Wasser- stoff	Kupfer	Keine sicherheitsrelevanten Schädigungen zu erwarten. Wasserstoffversprödung während der Fertigung ist zu verhindern.				/SKB 2019/	Für sauerstofffreies Kupfer ist keine sicherheitsrelevante Wasserstoffversprödung zu erwarten
	Stahl TStE355	-	Auftreten in Versuchen, keine quantitativen Angaben			/FZKA 1999/	Korrosionsversuche, Granitwässer, 90 °C
	Kohlenstoffstahl	-	Unter Schweizer Endlagerbedingungen geht die Nagra von keiner Sicherheitsrelevanz des Phänomens aus. Eine mögliche Abnahme der Festigkeit lässt sich nicht quantifizieren.			/NAGRA 2009/	Eine Überprüfung deutscher Konzepte anhand von Kriterien scheint notwendig. Genauere Ausführungen in Kapitel 5.4.4.2
	Einfluss auf die Umgebungsbedingungen	-	Sulfatreduzierende Mikroben schaffen eine Schwefelwasserstoff-Umgebung, diese erhöht die Anfälligkeit für Wasserstoffversprödung von Metallen.			/GRS 2011c/	

Tabelle 5-65: Tabellarische Übersicht: Korrosion beim modifizierten KBS-3-Konzept

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Korrosionsprozesse durch chemische / biologische Einwirkungen	Kupfer und Kupferlegierungen	-	Abtrag von 5 mm in 10 ⁶ Jahren			/SKB 2010c/	Einschätzung SKB Schweden
		-	Abtragsrate 4,3 ± 0,5 µm/a			/SMAILOS 2004/	Cu, Granitwasser 1, 98 mg/l Cl, 90 °C
		-	Abtragsrate 6,4 ± 0,4 µm/a			/SMAILOS 2004/	Cu-Ni-90-10, Granitwasser 1, 98 mg/l Cl, 90 °C
		-	Abtragsrate 1,1 ± 0,5 µm/a;			/SMAILOS 2004/	Cu-Ni-70-30, Granitwasser 1, 98 mg/l Cl, 90 °C
		-	Abtragsrate 11 µm/a;			/SMAILOS 2004/	CuOF; Granit-Bentonit Wasser; Chloridgehalt 6550 mg/l, 25 °C
		-	Abtragsrate 13 µm/a;			/SMAILOS 2004/	CuOF; Granit-Bentonit Wasser; Chloridgehalt 6550 mg/l, 90 °C
		-	Abtragsrate 14 µm/a;			/SMAILOS 2004/	CuOF; Granit-Bentonit Wasser; Chloridgehalt 15000 mg/l, 25 °C
		-	Abtragsrate 70 µm/a;			/SMAILOS 2004/	CuOF; Granit-Bentonit Wasser; Chloridgehalt 15000 mg/l, 90 °C
		-	Abtragsrate 86 µm/a;			/SMAILOS 2004/	CuOF; Granit-Bentonit Wasser; Chloridgehalt 50000 mg/l, 25 °C
		-	Abtragsrate 140 µm/a;			/SMAILOS 2004/	CuOF; Granit-Bentonit Wasser; Chloridgehalt 50000 mg/l, 90 °C

Tabelle 5-66: Tabellarische Übersicht: Korrosion für das modifizierte KBS-3-Konzept (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Korrosionsprozesse durch chemische / biologische Einwirkungen	Kupfer und Kupferlegierungen	-	Abtragsrate 21 µm/a			/SMAILOS 2004/	Cu30Ni, Granit-Bentonit Wasser; Chloridgehalt 6550 mg/l, 25 °C
		-	Abtragsrate 70 µm/a			/SMAILOS 2004/	Cu30Ni, Granit-Bentonit Wasser; Chloridgehalt 6550 mg/l, 90 °C
		-	Abtragsrate 70 µm/a;			/SMAILOS 2004/	Cu30Ni, Granit-Bentonit Wasser; Chloridgehalt 15000 mg/l, 90 °C
		-	Abtragsrate 65 µm/a;			/SMAILOS 2004/	Cu30Ni, Granit-Bentonit Wasser; Chloridgehalt 50000 mg/l, 25 °C
		-	Abtragsrate 390 µm/a;			/SMAILOS 2004/	Cu30Ni, Granit-Bentonit Wasser; Chloridgehalt 50000 mg/l, 90 °C
		-	Abtrag von 0,1 mm bis 1 mm	-		/POSIVA 2012/	Zeitraum nach Endlagerverschluss, Sauerstoff in Behälterumgebung noch vorhanden
		-	-	Abtrag von 1 mm in 10 ⁶ Jahren		/POSIVA 2012/	Anaerobe Korrosion
		-	Max. 2 mm Abtrag in 10 ⁶ Jahren			/POSIVA 2012/	Abtrag über gesamten Nachweiszeitraum

Tabelle 5-67: Tabellarische Übersicht: Korrosion beim modifizierten KBS-3-Konzept (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Korrosionsprozesse durch chemische / biologische Einwirkungen	TStE355	-	Abtragsrate $21,1 \pm 2,1 \mu\text{m/a}$; geringer Lochfraß			/FZKA 2003/	Granitwasser 1, 98 mg/l Cl
		-	Abtragsrate $22,6 \pm 3,6 \mu\text{m/a}$; Lochfraß bis zu 1300 μm in 460 Tagen			/FZKA 2003/	Granitwasser 2, 6260 mg/l Cl
	Unlegierte Stähle / Kohlenstoffstahl	-	Abtragsrate 24 – 68 $\mu\text{m/a}$;			/NAGRA 2003/	Grundwasser gesättigter Bentonit; 80 °C, 816 h
		-	Abtragsrate 20 – 40 $\mu\text{m/a}$;			/NAGRA 2003/	Grundwasser gesättigter Bentonit; 140 °C, 816h
		-	Abtragsrate 4 – 10 $\mu\text{m/a}$;			/NAGRA 2003/	Grundwasser gesättigter Bentonit; 80 °C, 6648h
		-	Abtragsrate 5 – 13 $\mu\text{m/a}$;			/NAGRA 2003/	Grundwasser gesättigter Bentonit; 140 °C, 6648h
		-	Abtragsrate 2 – 6 $\mu\text{m/a}$;			/NAGRA 2003/	verdichteter Bentonit; 80 °C, 700 Tage
		-	Abtragsrate 0,15 $\mu\text{m/a}$;			/NAGRA 2003/	Bentonitwasser, 30 °C, 7500 h
		-	Abtragsrate 0,05 $\mu\text{m/a}$;			/NAGRA 2003/	Bentonitwasser, 50 °C, 5000 h
		-	Abtragsrate < 0,1 $\mu\text{m/a}$;			/NAGRA 2003/	synth. Granitwasser
		-	Abtragsrate 0,1 $\mu\text{m/a}$;			/NAGRA 2003/	Äspö-Wasser, 0,3 mol/l Cl
		-	≤ 30 mm Abtrag			/NAGRA 2003/	Annahme Nagra, Abtrag in 1000 Jahren

Tabelle 5-68: Tabellarische Übersicht: Korrosion beim modifizierten KBS-3 Konzept (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Korrosionsprozesse durch chemische / biologische Einwirkungen	Mikrobielle Korrosion Kupfer	-	In MX-80 Bentonit verringert sich die Korrosionsrate von Kupfer um das 4 bis 16-Fache bei Temperaturen über 120 °C. Grund ist die Abnahme an mikrobieller Aktivität.			/GRS 2011c/	Es erfolgt keine Sterilisation des Bentonits
		-	Steril: Abtragsrate 10 µm/a; Abtragsrate 90 µm/a bei Anwesenheit von sulfatreduzierenden Bakterien			/SMAILOS 2004/	Cu30Ni, Chloridgehalt 6500 mg/l; 25-27 °C; 675 h
	Mikrobielle Korrosion Stahl	-	Abtragsraten bis zu 700 µm/a durch mikrobielle Korrosion			/GRS 2011c/	
		-	Verdopplung der Abtragsrate auf ca. 30 µm/a durch sulfatreduzierende Mikroben			/GRS 2011c/	Kohlenstoffstahl in 20 % Lösung von Callovo-Oxfordian Ton in synthetischem Porenwasser, erkennbare Grübchen innerhalb eines Monats
		-	Veränderung der Abtragsrate von 11 µm/a in sterilem Zustand auf ca. 27 µm/a			/GRS 2011c/	In-Situ Druck von 12 MPa, Callovo-Oxfordian Tonstein
		-	Lokale Effekte mit Abtragsraten von 30 µm/a bis zu 500-700 µm/a bei direktem Kontakt von Stahl mit Ton; Veränderung von Flächenabtrag zu Lochfraß			/GRS 2011c/	

5.7 Konzept multipler ewG im Kristallin

Für dieses Endlagerkonzept soll eine rückholbare Kokille verwendet werden. Diese wird mit einer 5 mm starken Kupferschicht ummantelt. Die rückholbare Kokille wurde ursprünglich für die Bohrlochlagerung im Steinsalz entwickelt. Die aufgelisteten Einwirkungen entsprechen endlagerkonzeptspezifischen Annahmen. Die ermittelten Einwirkungen werden zunächst erläutert und anschließend in Tabelle 5-69 bis Tabelle 5-76.

5.7.1 Mechanische Einwirkungen

5.7.1.1 Statische Einwirkungen

Scherkräfte

Scherkräfte sind im Kristallingestein vor allem in Bereichen von aktiven Störungszonen oder Klüften zu erwarten. Die Errichtung der Einlagerungsbohrlöcher soll in ausreichendem Abstand zu diesen Regionen erfolgen /DBETEC 2017a/. Es sind daher keine Scherkräfte auf die Endlagerbehälter zu erwarten. Allerdings können sich durch das Auffahren des Endlagerbergwerks Scherungen ergeben.

Isotrope Drücke

Der auf den Bohrlochliner wirkende Gebirgsdruck beträgt laut /DBETEC 2017a/ in 300 m Teufe 8 MPa. In 800 m Teufe ist von einem Gebirgsdruck von 21 MPa auszugehen. Dies gilt bei einer mittleren Gesteinsdichte von 2700 kg/m^3 . Durch thermische Einwirkungen erhöhte Gebirgsdrücke sind noch zu ermitteln.

In jedem Bohrloch wird nur eine Brennstabkokille eingelagert. Stapellasten sind daher nicht zu berücksichtigen.

Anisotrope Drücke

Weitere Anisotrope Drücke, zum Beispiel aus Gebirgslasten oder Quelldruck von Versatzmaterialien konnten für das Konzept des multiplen ewG noch nicht quantifiziert werden.

Handhabungslasten

Durch die 5 mm-Kupferummantelung hat die Brennstabkokille eine höhere Masse von 5.700 kg /DBETEC 2017a/. Damit ergibt sich beim Anschlag am Tragpflz eine wirkende Gewichtskraft von ca. 56 kN. Der Versatz des Bohrungsliners erfolgt mit Quarzsand. Daher wird die Reibungskraft von 20,3 kN beim Ziehen der Kokillen für die Rückholung hier als weiterhin gültig angesehen.

5.7.1.2 Dynamische Einwirkungen

Dynamische Einwirkungen treten beim Transport der Abfallgebinde im Schacht, in Strecken und bei der Handhabung zur Einlagerung auf. Da diese Vorgänge und die verwendete Einlagerungstechnik beim multiplen ewG Konzept identisch zu denen der Bohrlochlagerung im

Steinsalz sind, können die entsprechenden Aussagen aus Kapitel 5.2.1.2 übernommen werden.

5.7.2 Thermische Einwirkungen

Beim Konzept des multiplen ewG soll die Beladung der BSK-RCu mit 1,8 DWR-BE, 5,4 SWR-BE, 15,25 WWR-BE, 2 CSD-V, 3 CSD-B oder 3 CSD-C erfolgen /DBETEC 2017a/. Nach /DBETEC 2016b/ kann für DWR Mix 89/11 Brennelemente eine Zwischenlagerzeit von 57 Jahren und eine thermische Leistung von 0,6 kW pro Brennelement angenommen werden. Damit hat eine BSK-RCu eine thermische Leistung von 1,1 kW. Dies gilt als abdeckend für die weiteren Beladungen.

Die Gebirgstemperatur ist vergleichbar zum modifizierten KBS-3-Konzept in Kapitel 5.6.2.

5.7.3 Radiologische Einwirkungen

5.7.3.1 Materialversprödung durch Strahlung

Für Stahl ist ab einer Neutronenfluenz von 10^{18} n/cm² mit sicherheitsrelevanten Schädigungen zu rechnen /POSIVA 2012/. Eine Bewertung auf Grundlage geplanter Inventare hat noch zu erfolgen.

5.7.3.2 Zersetzung von Organika

In der Brennstabkokille ist eine Moderatorplatte aus Polyethylen verbaut. Für Polyethylen ist ab einer Dosis von 3×10^5 Gy bis 3×10^6 Gy /KFK 1994/ mit Verschlechterung der Materialeigenschaften zu rechnen. Ein Erreichen dieser Dosis durch das Inventar des Behälters ist noch zu überprüfen.

5.7.4 Chemische Einwirkungen

5.7.4.1 Korrosion

Die Betrachtung zur Behälterkorrosion erfolgt nachfolgend getrennt für die Kupferhülle und den Stahlbehälter.

Kupferhülle

Für die Kupferhülle wird in /DBETEC 2017a/ auf eine Einschätzung der kanadischen Nuclear Waste Management Organisation verwiesen. Demnach ist unter deren Bedingungen mit einem Abtrag von 0,026 mm in 10^6 Jahren zu rechnen. Laut /DBETEC 2017a/ sind diese mit den Bedingungen für den multiplen ewG vergleichbar. In Kanada werden nach /Kremer 2017/ sehr geringe Korrosionsraten von nur 0,026 nm pro Jahr angesetzt. Dadurch wurden sehr

lange Behälterlebensdauern von weit über 10^6 Jahren abgeschätzt. Im Rahmen einer Standorterkundung ist eine Überprüfung der Vergleichbarkeit der Standortbedingungen in Deutschland mit den kanadischen Verhältnissen unabdingbar. Grundlage der kanadischen Einschätzung sind Grundwässer mit sehr geringem Sulfidgehalt.

Aus Versuchen ermittelte Abtragsraten für reines Kupfer und Kupferlegierungen sind bereits in Kapitel 5.6.4.1 beschrieben worden. Diese werden hier weiterhin als abdeckend betrachtet und sind wesentlich höher als die Einschätzung der NWMO Kanada. Für eine genaue Abschätzung der Korrosionsraten sind daher Kenntnisse über die Wässer und Lösungen am zukünftigen Endlagerstandort notwendig.

Stahlwerkstoffe

Die Korrosionsraten für Stahlwerkstoffe entsprechen denen des modifizierten KBS-3-Konzepts in Kapitel 5.6.4.1. Auch hier ist der Einfluss der Kupferhülle zu prüfen. Bleibt diese zuverlässig dicht, kann Korrosion an der Brennstabkokille ausgeschlossen werden.

5.7.4.2 Materialversprödung durch Wasserstoff

In /FZKA 1999/ werden ebenfalls Untersuchungen zur Spannungsrisskorrosion in Granitwässern beschrieben. Spannungsrisskorrosion trat hier nicht auf, eine festgestellte Abnahme der Duktilität an den Proben wird auf Wasserstoffversprödung zurückgeführt. Quantitative Angaben zur Abnahme der Duktilität wurden nicht gemacht.

Mögliche Einflusskriterien auf die Materialversprödung durch Wasserstoff wurden bereits in Kapitel 5.4.4.2 beschrieben. Eine Übertragbarkeit auf die veränderten Endlagerbedingungen ist noch zu überprüfen. Vor allem ist hier der Einfluss der Kupferhülle zu beachten. Sollte diese zuverlässig über eine Million Jahre gasdicht bleiben, ist das Vorkommen von Wasserstoffversprödung an der Brennstabkokille ausschließbar.

Die mögliche Wasserstoffversprödung von Kupfer ist bereits in Kapitel 5.7.3.2 beschrieben worden. Bei Verwendung von sauerstofffreiem, phosphordotiertem Kupfer können sicherheitsrelevante Schädigungen durch Wasserstoffversprödung vermieden werden.

Tabelle 5-69: Tabellarische Übersicht: Statisch-Mechanische Einwirkungen beim multiplen ewG Konzept

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Statisch-Mechanische Einwirkungen	Isotroper Druck	-	p = 8 MPa			/DBETEC 2017a/	Dichte: 2700 kg/m ³ ; Teufe: 300 m
		-	p = 21 MPa			/DBETEC 2017a/	Dichte: 2700 kg/m ³ ; Teufe: 800 m
		-	2 MPa			/DBETEC 2017a/	Quelldruck Versatzmaterial
		-	Bis zu 15 MPa			/SKB 2010b/	Quelldruck Buffer
	Scherung	-	Vorhanden, abhängig von der konkreten Endlagerauslegung			-	Nicht direkt quantifizierbar, Anisotropie
	Anisotroper Druck	-	unbekannt			-	Noch nicht quantifiziert
	Handhabungslasten:	F _G =96 kN			-	/DBETEC 2017a/	Max. Gebindemasse 9,8Mg, Kokille angeschlagen am Tragpilz
		-	Nicht spezifiziert		-	-	Lasten aus Rückholung und Bergung
		-	Unbekannt			-	Quelldruck durch ungleichmäßige Aufsättigung des Buffers

Tabelle 5-70: Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen beim multiplen ewG Konzept

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Dynamisch-Mechanische Einwirkungen	Beschleunigungen	Bremsverzögerung: 0,5 m/s ² , Beschleunigung: 0,5 m/s ²			-	/DBE 1994/	Kennwerte Schachtförderanlage
		Max. Beschleunigung ≤ 2g			-	Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.	Annahme maximale dyn. Einwirkung bei Handhabung
	Vibrationen auf Grund von:	Max. Hubgeschwindigkeit mit Last 10 m/s; Aufsetzen mit 1 m/s			-	/DBETEC 2006/	Absenken / Heraufziehen der Kokille im Bohrloch
		Transport auf Plateauwagen mit 10 km/h in gerader Strecke, 5 km/h in Kurven			-	/DBE 1995/	
		Schachtförderung mit 5 m/s			-	/DBE 1994/	
		-	Noch nicht spezifiziert		-	/GRS 2012b/	Vibration / Rütteln bei im Versatz klemmender Ko- kille

Tabelle 5-71: Tabellarische Übersicht: Thermische Einwirkungen beim multiplen ewG Konzept

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Thermische Einwirkungen	thermische Behälterleistung	max. 1,1 kW	< 1,1 kW			/DBETEC 2016b/	1,8 DWR-BE mix 89/11, 57 a Zwischenlagerung
	Gebirgstemperatur	27 °C	Max. 100 °C nach StandAG			/DBETEC 2016a/	600 m Teufe

Tabelle 5-72: Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Strahlung beim multiplen ewG Konzept

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Materialversprödung durch Strahlung	Neutronenfluenz	Sicherheitsrelevante Schäden ab einer Neutronenfluenz > 10^{18} n/cm ²				/POSIVA 2012/	Angabe für Stähle

Tabelle 5-73: Tabellarische Übersicht: Zersetzung von Organika beim multiplen ewG Konzept

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Zersetzung von Organika	Polyethylen	Zersetzung ab einer Dosis von 3×10^5 Gy bis 3×10^6 Gy				/KFK 1994/	

Tabelle 5-74: Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Wasserstoff beim multiplen ewG Konzept

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Materialversprödung durch Wasserstoff	Kupfer	Keine sicherheitsrelevanten Schädigungen zu erwarten. Wasserstoffversprödung während der Fertigung ist zu verhindern.				/SKB 2019/	Für sauerstofffreies Kupfer ist keine sicherheitsrelevante Wasserstoffversprödung zu erwarten
	Stahl TStE355	-	Auftreten in Versuchen, keine quantitativen Angaben			/FZKA 1999/	Korrosionsversuche, Granitwässer, 90 °C
	Kohlenstoffstahl	-	Unter Schweizer Endlagerbedingungen geht die Nagra von keiner Sicherheitsrelevanz des Phänomens aus. Eine mögliche Abnahme der Festigkeit lässt sich nicht quantifizieren.			/NAGRA 2009/	Eine Überprüfung deutscher Konzepte anhand von Kriterien scheint notwendig. Genauere Ausführungen in Kapitel 5.4.4.2
	Einfluss auf die Umgebungsbedingungen	-	Sulfatreduzierende Mikroben schaffen eine Schwefelwasserstoff-Umgebung, diese erhöht die Anfälligkeit für Wasserstoffversprödung von Metallen.			/GRS 2011c/	

Tabelle 5-75: Tabellarische Übersicht: Korrosion beim multiplen ewG Konzept

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Korrosionsprozesse durch chemisch / biologische Einwirkungen	Kupfer und Kupferlegierungen	-	0,026 nm/a			/Kremer 2017/	Einschätzung für kanadische Grundwässer mit geringem Sulphidgehalt
		-	Abtrag von 0,026 mm in 10 ⁶ Jahren			/DBETEC 2017a/	Einschätzung NWMO Kanada
		-	Abtragsrate 4,3 ± 0,5 µm/a			/SMAILOS 2004/	Cu, Granitwasser 1, 98 mg/l Cl, 90 °C
		-	Abtragsrate 6,4 ± 0,4 µm/a			/SMAILOS 2004/	Cu-Ni-90-10, Granitwasser 1, 98 mg/l Cl, 90 °C
		-	Abtragsrate 1,1 ± 0,5 µm/a;			/SMAILOS 2004/	Cu-Ni-70-30, Granitwasser 1, 98 mg/l Cl, 90 °C
	TStE355	-	Abtragsrate 21,1 ± 2,1 µm/a; geringer Lochfraß			/FZKA 2003/	Granitwasser 1, 98 mg/l Cl
		-	Abtragsrate 22,6 ± 3,6 µm/a; Lochfraß bis zu 1300 µm in 460 Tagen			/FZKA 2003/	Granitwasser 2, 6260 mg/l Cl
	Kohlenstoffstahl	-	Abtragsrate < 0,1 µm/a;			/NAGRA 2003/	synth. Granitwasser
		-	Abtragsrate 0,1 µm/a;			/NAGRA 2003/	Äspö-Wasser, 0,3 mol/l Cl
		-	≤ 30 mm Abtrag			/NAGRA 2003/	Annahme Nagra, Abtrag in 1000 Jahren

Tabelle 5-76: Tabellarische Übersicht: Korrosion beim multiplen ewG Konzept (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Korrosionsprozesse durch chemisch / biologische Einwirkungen	Mikrobielle Korrosion Kupfer	-	Steril: Abtragsrate 10 µm/a; Abtragsrate 90 µm/a bei Anwesenheit von sulfatreduzierenden Bakterien			/SMAILOS 2004/	Cu30Ni, Chloridgehalt 6500 mg/l; 25-27 °C; 675 h
	Mikrobielle Korrosion Stahl	-	Abtragsraten bis zu 700 µm/a durch mikrobielle Korrosion			/GRS 2011c/	
		-	Verdopplung der Abtragsrate auf ca. 30 µm/a durch sulfatreduzierende Mikroben			/GRS 2011c/	Kohlenstoffstahl in 20 % Lösung von Callovo-Oxfordian Ton in synthetischem Porenwasser, erkennbare Grübchen innerhalb eines Monats
		-	Veränderung der Abtragsrate von 11 µm/a in sterilem Zustand auf ca. 27 µm/a			/GRS 2011c/	In-Situ Druck von 12 MPa, Callovo-Oxfordian Tonstein
		-	Lokale Effekte mit Abtragsraten von 30 µm/a bis zu 500-700 µm/a bei direktem Kontakt von Stahl mit Ton; Veränderung von Flächenabtrag zu Lochfraß			/GRS 2011c/	

5.8 Konzept überlagernder ewG im Kristallin

Für das Endlagerkonzept des überlagernden ewG im Kristallin sollen POLLUX®-3 Behälter in Streckenlagerung verwendet werden. Diese wurden bislang nur nach geometrischen Gesichtspunkten skizziert. Die aufgelisteten Einwirkungen sind daher als konzeptspezifische Annahmen zu verstehen. Die ermittelten Einwirkungen werden zunächst erläutert und dann in Tabelle 5-77 bis Tabelle 5-86 dargestellt.

5.8.1 Mechanische Einwirkungen

5.8.1.1 Statische Einwirkungen

Scherkräfte

Scherkräfte sind im Kristallingestein vor allem in Bereichen von aktiven Störungszonen oder Klüften zu erwarten. Die Errichtung der Einlagerungsbohrlöcher soll in ausreichendem Abstand zu diesen Regionen erfolgen /DBETEC 2017a/. Es sind daher keine Scherkräfte auf die Endlagerbehälter zu erwarten. Allerdings können sich durch das Auffahren des Endlagerbergwerks Scherungen ergeben.

Isotrope Drücke

Der lithostatische Gebirgsdruck wird als identisch mit dem aus dem modifizierten KBS-3-Konzept in Kapitel 5.6.1.1 angenommen. Eine mögliche Erhöhung durch thermische Einwirkungen konnte noch nicht quantifiziert werden.

Die Hohlräume in den Einlagerungsstrecken um die Behälter werden mit Bentonitgranulat versetzt. Hier ist von einer zusätzlichen Einwirkung eines Quelldrucks von 2 MPa auszugehen. Durch ungleichmäßige Aufsättigung kann dieser auch anisotrop einwirken.

Anisotrope Drücke

Anisotrope Drücke können aus den Gebirgslasten oder dem Quelldruck der Versatzmaterialien entstehen. Bislang konnten diese noch nicht quantifiziert werden.

Handhabungslasten

Lasten aus der Handhabung entsprechen denen bei der Streckenlagerung im Tonstein. Dort werden derselbe Endlagerbehälter und die gleiche Einlagerungstechnik verwendet. Aufgelistet sind diese in Kapitel 5.4.1.1.

5.8.1.2 Dynamische Einwirkungen

Für die Einlagerung der Behälter im Konzept des überlagernden ewG soll die gleiche Einlagerungstechnik wie bei der Streckenlagerung im Steinsalz verwendet werden. Entsprechende dynamische Lasten können daher aus Kapitel 5.1.1.2 übernommen werden. Ob der POLLUX®-3 analog zum POLLUX®-9 /10 ebenfalls als TYP B(U) Versandstück ausgelegt werden soll,

steht noch nicht fest. Ob die davon abhängenden Einwirkungen aus den Zulassungstests auch hier auslegungsrelevant sind, ist noch zu überprüfen.

5.8.2 Thermische Einwirkungen

Im Konzept des überlagernden ewGs werden die Brennstäbe von 3 Brennelementen in POLLUX[®]-Behältern eingelagert. Für diese wird laut /DBETEC 2016b/ eine Zwischenlagerzeit von 57 Jahren und eine thermische Leistung von ca. 0,6 kW für ein DWR mix 89/11 Brennelement angesetzt. Damit hat ein beladener POLLUX[®]-3 Behälter eine thermische Leistung von 1,8 kW.

Die Gebirgstemperatur ist vergleichbar zum modifizierten KBS-3-Konzept in Kapitel 5.6.2.

5.8.3 Radiologische Einwirkungen

5.8.3.1 Materialversprödung durch Strahlung

Für Stahl ist ab einer Neutronenfluenz von 10^{18} n/cm² mit sicherheitsrelevanten Schädigungen zu rechnen /POSIVA 2012/. Eine Bewertung auf Grundlage geplanter Inventare hat noch zu erfolgen.

5.8.3.2 Zersetzung von Organika

In der Brennstabkokille ist eine Moderatorplatte aus Polyethylen verbaut. Für Polyethylen ist ab einer Dosis von 3×10^5 Gy bis 3×10^6 Gy /KFK 1994/ mit Verschlechterung der Materialeigenschaften zu rechnen. Ein Erreichen dieser Dosis durch das Inventar des Behälters ist noch zu überprüfen.

5.8.4 Chemische und biologische Einwirkungen

5.8.4.1 Korrosionsprozesse

Innenbehälter POLLUX[®]

Der Innenbehälter des POLLUX[®]-3 ist aus dem Stahl 15MnNi6-3 gefertigt. Die in Kapitel 5.7.4.1 genannten Korrosionsraten für Stahlwerkstoffe können auch für den Innenbehälter des POLLUX[®]-3 Behälters als abdeckend angenommen werden. Der Innenbehälter steht nicht in direktem Kontakt mit dem geochemischen Milieu. Korrosion daran ist erst wahrscheinlich, wenn Wasser oder Lösungen in den Außenbehälter des POLLUX[®] eindringen.

Außenbehälter POLLUX®

Untersuchungen an Proben aus Gussstahl und Gusseisen mit Kugelgraphit wurden in Grundwässern und Bentonit durchgeführt. Diese sind vergleichbar zum Außenbehälter des POLLUX®-3. Dabei wurden keine Unterschiede zwischen den Werkstoffen festgestellt. Beschrieben sind die Ergebnisse in /NAGRA 2008/.

Im Grundwässern vom Typ Säckingen und dem künstlichen Böttsteinwasser ergeben sich Abtragsraten von 5 $\mu\text{m/a}$ bis 10 $\mu\text{m/a}$. Dieses sind flächige Abtragsraten, Lochfraß trat nicht auf. Diese Werte wurden bei 80 °C über 260 Tage ermittelt. Das Grundwasser vom Typ Säckingen ist von geringer Chloridkonzentration mit 0,046 mol/l, das Böttsteinwasser enthält ca. die 5-fache Konzentration an Chlorid mit 0,23 mol/l. Die Abtragsraten werden trotzdem als vergleichbar angegeben. In /NAGRA 2008/ sind noch weitere Abtragsraten aus Versuchen mit Gusseisenproben angegeben. Wegen der geringen Versuchstemperaturen von 25 °C bis 80 °C werden diese hier zunächst nicht aufgeführt.

Zusätzlich gibt die Nagra /NAGRA 2008/ Abtragsraten für Stahlguss und Gusseisen in Bentonit an. Dabei wurden Proben für 90 Tage den korrosiven Bedingungen ausgesetzt. Für einen Bentonit mit hoher Dichte ergab sich dabei eine Abtragsrate von 8 $\mu\text{m/a}$ bis 12 $\mu\text{m/a}$. Für einen Bentonit mit geringer Dichte betrug die Abtragsrate 14 $\mu\text{m/a}$ bis 29 $\mu\text{m/a}$. Auch hier gab es keinen Unterschied zwischen Gusseisen und Stahlguss.

Da der Außenbehälter des POLLUX®-3 in direktem Kontakt mit dem geochemischen Milieu steht, ist Korrosion an diesem wahrscheinlich.

5.8.4.2 Materialversprödung durch Wasserstoff

In /FZKA 1999/ werden ebenfalls Untersuchungen zur Spannungsrisskorrosion in Granitwässern beschrieben. Spannungsrisskorrosion trat hier nicht auf, eine festgestellte Abnahme der Duktilität an den Proben wird auf Wasserstoffversprödung zurückgeführt. Quantitative Angaben zur Abnahme der Duktilität wurden nicht gemacht.

Mögliche Einflusskriterien auf die Materialversprödung durch Wasserstoff wurden bereits in Kapitel 5.4.4.2 beschrieben. Eine Übertragbarkeit auf die veränderten Endlagerbedingungen ist noch zu überprüfen.

Tabelle 5-77: Tabellarische Übersicht: Statisch-Mechanische Lasten beim überlagernden wG Konzept

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Statisch-Mechanische Lasten	Isotrope Drücke	-	p = 8 MPa			/DBETEC 2017a/	Dichte: 2700 kg/m ³ ; Teufe: 300 m
		-	p = 21 MPa			/DBETEC 2017a/	Dichte: 2700 kg/m ³ ; Teufe: 800 m
		-	2 MPa			/DBETEC 2017a/	Quelldruck Bentonit
	Anisotroper Druck	-	unbekannt			-	Noch nicht quantifiziert
	Scherung	-	Vorhanden, abhängig von der konkreten Endlagerauslegung			-	Nicht direkt quantifizierbar, Anisotropie

Tabelle 5-78: Tabellarische Übersicht: Statisch-Mechanische Einwirkungen beim überlagernden ewG Konzept (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Statisch-Mechanische Einwirkungen	Handhabungslasten	$F_G = 372,78 \text{ kN}$, ca. 93 kN pro Tragzapfen	-	-	-	/GRS 2011b/ /DBETEC 2017a/	Brückenkran, Einlagerungsvorrichtung: max. Gebinde-masse 160.000 kg, 4-Tragzapfen, Verwendung von 4-Punkt Anschlagmitteln
		$\Psi=1,8$	-	-	-	/KTA 2012/	Multiplikation der Kräfte mit Hublastbeiwert zur Auslegung der Tragzapfen
		-	$F_R = 100 \text{ kN}$		-	/GRS 2011b/	Ziehen in die Rückholungs-/Bergungsstrecke, axial oder radial, $F_N=372 \text{ kN}$, $\mu = 0,27$
		-	Linienlast vertikal: 406,25 kN/m Horizontal: 247,65 kN/m		-	/SIEMAG 2016/	Handhabungslasten modifizierte Einlagerungsvorrichtung, Auslegungsnahme Anliegen nur an der Spitze der Zange. Abhängig vom Eigengewicht des Behälters.
		-	Unbekannt			-	Anisotroper Quelldruck durch ungleichmäßige Aufsättigung des Versatzes

Tabelle 5-79: Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen beim überlagernden ewG Konzept

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Dynamisch-Mechanische Einwirkungen	Beschleunigungen	Bremsverzögerung: 0,5 m/s ² , Beschleunigung: 0,5 m/s ²			-	/DBE 1994/	Kennwerte Schacht-förderanlage
		Max. 1 g			-	/DBE 1994/	Verzögerung durch Selda-Anlage bei schwerem Übertreiben
		Max. 1,4 g			-	/DBETEC 2008c/	Anstoß Plateauwagen Puffer an Puffer
		Horizontale Beschleunigung: ±0,2 g; vertikale Beschleunigung ±0,1 g			-	/DBETEC 2008c/	Erdbeben bei übertägiger Handhabung

Tabelle 5-80: Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen beim überlagernden ewG Konzept (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Dynamisch-Mechanische Einwirkungen	Vibrationen auf Grund von:	Fahrt mit max. 5 m/s			-	/DBE 1994/	Kennwerte Schacht-förderanlage
		Max. 10 km/h gerade Strecke, max. 5 km/h in Kurven			-	/DBE 1995/	Transport auf Plateauwagen
		Max. 0,25 m/s			-	/DBE 1995/	Absenken und Aufnehmen mit der Einlage-rungsvorrichtung
		-	Max. 0,5 m/s		-	/SIEMAG 2016/	Fahrgeschwindigkeit modifizierte Einlagerungsvorrichtung
	Schläge / Stöße	ablegen mit 0,25 m/min	-		-	/DBE 1995/	Ablegen des Behälters auf der Sohle
		Fall aus 3 m Höhe auf Betonboden			-	/DBETEC 2008c/	Absturz in der übertägigen Handhabung
		Fall aus 0,95 m Höhe auf die Streckensohle			-	/DBETEC 2008c/	Absturz aus der Einlage-rungsvorrichtung

Tabelle 5-81: Tabellarische Übersicht: Thermische Einwirkungen beim überlagernden ewG Konzept

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Thermische Einwirkungen	thermische Behälterleistung	max. 1,8 kW	< 1,8 kW			/DBETEC 2016b/	3 DWR-BE mix 89/11, 57 a Zwischenlagerung
	Gebirgstemperatur	27 °C	Max. 100 °C nach StandAG			/DBETEC 2016a/	600 m Teufe

Tabelle 5-82: Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Strahlung beim überlagernden ewG Konzept

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Materialversprödung durch Strahlung	Neutronenfluenz	Sicherheitsrelevante Schäden ab einer Neutronenfluenz > 10^{18} n/cm ²				/POSIVA 2012/	Angabe für Stähle

Tabelle 5-83: Tabellarische Übersicht: Zersetzung von Organika beim überlagernden ewG Konzept

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Zersetzung von Organika	Polyethylen	Zersetzung ab einer Dosis von 3×10^5 Gy bis 3×10^6 Gy				/KFK 1994/	

Tabelle 5-84: Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Wasserstoff beim überlagernden ewG Konzept

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Materialversprödung durch Wasserstoff	Stahl TStE355	-	Auftreten in Versuchen, keine quantitativen Angaben			/FZKA 1999/	Korrosionsversuche, Granitwässer, 90 °C
	Kohlenstoffstahl	-	Unter Schweizer Endlagerbedingungen geht die Nagra von keiner Sicherheitsrelevanz des Phänomens aus. Eine mögliche Abnahme der Festigkeit lässt sich nicht quantifizieren.			/NAGRA 2009/	Eine Überprüfung deutscher Konzepte anhand von Kriterien scheint notwendig. Genauere Ausführungen in Kapitel 5.4.4.2
	Einfluss auf die Umgebungsbedingungen	-	Sulfatreduzierende Mikroben schaffen eine Schwefelwasserstoff-Umgebung, diese erhöht die Anfälligkeit für Wasserstoffversprödung von Metallen.			/GRS 2011c/	

Tabelle 5-85: Tabellarische Übersicht: Korrosion beim überlagernden ewG Konzept

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Korrosionsprozesse durch chemische / biologische Einwirkungen	TStE355	-	Abtragsrate $21,1 \pm 2,1 \mu\text{m/a}$; geringer Lochfraß			/FZKA 2003/	Granitwasser 1, 98 mg/l Cl
		-	Abtragsrate $22,6 \pm 3,6 \mu\text{m/a}$; Lochfraß bis zu 1300 μm in 460 Tagen			/FZKA 2003/	Granitwasser 2, 6260 mg/l Cl
	Unlegierte Stähle / Kohlenstoff-stahl	-	Abtragsrate 24 – 68 $\mu\text{m/a}$;			/NAGRA 2003/	Grundwasser gesättigter Bentonit; 80 °C, 816 h
		-	Abtragsrate 20 – 40 $\mu\text{m/a}$;			/NAGRA 2003/	Grundwasser gesättigter Bentonit; 140 °C, 816h
		-	Abtragsrate 4 – 10 $\mu\text{m/a}$;			/NAGRA 2003/	Grundwasser gesättigter Bentonit; 80 °C, 6648h
		-	Abtragsrate 5 – 13 $\mu\text{m/a}$;			/NAGRA 2003/	Grundwasser gesättigter Bentonit; 140 °C, 6648h
		-	Abtragsrate 2 – 6 $\mu\text{m/a}$;			/NAGRA 2003/	verdichteter Bentonit; 80 °C, 700 Tage
		-	Abtragsrate 0,15 $\mu\text{m/a}$;			/NAGRA 2003/	Bentonitwasser, 30 °C, 7500 h
		-	Abtragsrate 0,05 $\mu\text{m/a}$;			/NAGRA 2003/	Bentonitwasser, 50 °C, 5000 h
		-	Abtragsrate < 0,1 $\mu\text{m/a}$;			/NAGRA 2003/	synth. Granitwasser
		-	Abtragsrate 0,1 $\mu\text{m/a}$;			/NAGRA 2003/	Äspö-Wasser, 0,3 mol/l Cl
		-	$\leq 30 \text{ mm}$ Abtrag			/NAGRA 2003/	Annahme Nagra, Abtrag in 1000 Jahren

Tabelle 5-86: Tabellarische Übersicht: Korrosion beim überlagernden ewG Konzept (Fortsetzung)

Einwirkungen		Nutzungsphase				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb		
Korrosionsprozesse durch chemische / biologische Einwirkungen	Stahlguss / Gusseisen mit Kugelgraphit	-	Abtragsrate 8 – 12 µm/a;			/NAGRA 2003/	Bentonit hoher Dichte, 90 Tage
		-	Abtragsrate 14 – 29 µm/a;			/NAGRA 2003/	Bentonit geringer Dichte, 90 Tage
		-	Abtragsrate 5-10 µm/a; kein Lochfraß			/NAGRA 2003/	Grundwasser Typ Säckingen, 80 °C, 260 Tage, geringer Chloridgehalt
		-	Abtragsrate 5 – 10 µm/a; kein Lochfraß			/NAGRA 2003/	Synth. Grundwasser Typ Böttstein, 80 °C, 260 Tage, 5 facher Chloridgehalt zu Säckingen.
	Mikrobielle Korrosion Stahl	-	Abtragsraten bis zu 700 µm/a durch mikrobielle Korrosion			/GRS 2011c/	
		-	Verdopplung der Abtragsrate auf ca. 30 µm/a durch Sulfatreduzierende Mikroben			/GRS 2011c/	Kohlenstoffstahl in 20 % Lösung von Callovo-Oxfordian Ton in synthetischem Porenwasser, erkennbare Grübchen innerhalb eines Monats
		-	Veränderung der Abtragsrate von 11 µm/a in sterilem Zustand auf ca. 27 µm/a			/GRS 2011c/	In-Situ Druck von 12 MPa, Callovo-Oxfordian Tonstein
		-	Lokale Effekte mit Abtragsraten von 30 µm/a bis zu 500-700 µm/a bei direktem Kontakt von Stahl mit Ton; Veränderung von Flächenabtrag zu Lochfraß			/GRS 2011c/	

6 Quantifizierung der Behälterfunktionen

In diesem Kapitel werden die zuvor ermittelten Behälterfunktionen quantifiziert. Im Ergebnis werden den Behälterfunktionen entsprechende Zahlenwerte zugeordnet, ohne dass zum jetzigen Zeitpunkt bereits konkrete Annahmebedingungen für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle entwickelt wurden.

6.1 Einschluss des radioaktiven Inventars

In den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 2010/ sind keine quantifizierten Forderungen an den Einschluss eines Endlagerbehälters enthalten. Lediglich für die mögliche Bergung wird eine Vermeidung der Freisetzung von radioaktiven Aerosolen durch den Endlagerbehälter gefordert (Abs. 8.6). Weitere auf den Einschluss der Abfälle beziehbare Forderungen lassen sich aus den Festlegungen zur zusätzlichen Jahresdosis auf eine Einzelperson der Bevölkerung ableiten. Hier ist unter wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers eine zusätzliche Dosis von 10 $\mu\text{Sv/a}$ zulässig (Abs. 6.2). Unter unwahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems darf die zusätzliche Dosis 0,1 mSv/a betragen (Abs. 6.3). Für den Endlagerbehälter bedeutet dies, dass dieser in den Nutzungsphasen, in denen er nach Kapitel 2.3.2 die Einschlussfunktion zu erfüllen hat, so ausgelegt werden muss, dass zusammen mit den weiteren vorhandenen Barrieren des Endlagers diese Grenzwerte eingehalten werden. Diese Grenzwerte sind auch in der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung /BMU 2020/ in § 7 beibehalten worden. Hier sind höchstens 10 $\mu\text{Sv/a}$ unter zu erwartenden Entwicklungen und 0,1 mSv/a unter abweichenden Entwicklungen zulässig.

Im Verordnungsentwurf zur neuen Endlagersicherheitsanforderungsverordnung /BMU 2020/ ist direkt in § 4 quantifiziert, wie der Einschluss des radioaktiven Inventars durch die im Sicherheitskonzept zu spezifizierenden wesentlichen Barrieren zu erfolgen hat. Der sichere Einschluss soll dabei so erfolgen, dass die Radionuklide weitestgehend am Ort der Einlagerung verbleiben. Für zu erwartende Entwicklungen ist deshalb nachzuweisen, dass insgesamt höchstens ein Anteil von 10^{-4} und jährlich höchstens ein Anteil von 10^{-9} sowohl der Masse als auch der Anzahl der Atome der eingelagerten Radionuklide einschließlich ihrer Zerfallsprodukte aus dem Bereich der wesentlichen Barrieren ausgetragen wird. Wird der Endlagerbehälter im Sicherheitskonzept den wesentlichen Barrieren zugeschrieben, ist die Einschlussfunktion entsprechend so auszulegen, dass die oben genannten Grenzwerte aus /BMU 2020/ sicher erreicht werden.

Weiterhin sind die Grenzwerte nach Strahlenschutzgesetz /StrlSchG 2017/ und Strahlenschutzverordnung /StrlSchV 2018/ zu beachten. Die Behälterauslegung muss so erfolgen, dass durch Einschluss des radioaktiven Inventars diese Grenzwerte eingehalten werden. Dabei gilt nach Strahlenschutzgesetz § 80 Absatz 1, ein Grenzwert für die effektive Dosis zum Schutz von Einzelpersonen der Bevölkerung von 1 mSv pro Kalenderjahr. Dieser gilt für kerntechnische Anlagen und sonstige Anlagen zum Umgang mit radioaktiven Stoffen. Der Grenzwert gilt dabei für die Summe aus Direktstrahlung und der Strahlenexposition aus Ableitungen aus der kerntechnischen Anlage. Die Strahlenschutzverordnung legt dabei in § 99 Absatz 1

fest, dass die Strahlenbelastung aus einer einzelnen Anlage über die Pfade Abluft und Abwasser jeweils 0,3 mSv pro Jahr nicht überschreiten darf. Zulässig sind demnach 0,3 mSv/a über den Expositionspfad Abluft, 0,3 mSv/a über den Expositionspfad Abwasser und 0,4 mSv/a als Direktstrahlung.

Für berufliche exponierte Personen ist im Strahlenschutzgesetz § 78 Absatz 1 eine maximale effektive Dosis von 20 mSv im Kalenderjahr zulässig. In Ausnahmefällen kann die zuständige Behörde eine effektive Dosis von 50 mSv im Kalenderjahr erlauben. Dabei dürfen in fünf aufeinanderfolgenden Jahren allerdings 100 mSv effektive Dosis nicht überschritten werden. Die Berufslebensdosis darf 400 mSv nicht übersteigen. Die Behälter sind so auszulegen, dass diese Grenzwerte für das bei der Handhabung eingesetzte Personal durch Einschluss des radioaktiven Inventars eingehalten werden. Dabei ist die zusätzliche Dosis aus der Direktstrahlung der Endlagergebinde zu beachten.

In der ADR /UNECE 2016 wird ein anderer Ansatz zur Quantifizierung des Einschlusses gewählt. Der Einschluss beim Transport radioaktiver Stoffe wird hier nach 6.4.10.3 über die Aktivität möglicherweise austretender Stoffe bestimmt. Für Typ B(U) Versandstücke ist dabei unter den Bedingungen der Prüfungen zur Widerstandsfähigkeit unter normalen Beförderungsbedingungen ein Verlust von radioaktivem Inhalt von höchstens $10^{-6} A_2$ pro Stunde zulässig. Der Wert A_2 ist dabei der nach ADR den radioaktiven Stoffen zugeordnete Aktivitätswert. Dieser kann Tabelle 2.2.7.2.2.1 in /UNECE 2016/ entnommen werden. Für Stoffgemische muss die Summe der Quotienten von Aktivitätsfreisetzung und dem entsprechenden Grenzwert der Einzelnuklide kleiner als 1 sein, mit der Ausnahme, das für Kr-85 der 10-fache A_2 Wert eingesetzt werden kann. Unter den Bedingungen der Prüfungen zum Nachweis der Widerstandsfähigkeit unter Unfall-Beförderungsbedingungen ist für den Zeitraum einer Woche ein Verlust von radioaktivem Inhalt in Höhe von A_2 und $10 A_2$ für Kr-85 zulässig. Für Stoffgemische gilt das vorgenannte. Da sich diese Grenzwerte auf den Transport radioaktiver Stoffe im öffentlichen Verkehrsraum beziehen, finden solche Grenzwerte vor Allem dann Anwendung, wenn die Konditionierungsanlage sich nicht am Standort des Endlagers befindet.

Die hier genannten Einschlusskriterien sind als Beispiele zu verstehen. Durch den Einschluss des radioaktiven Inventars ist vor allem das Personal in der Konditionierungsanlage und dem späteren Endlager vor Strahlenexposition durch freigesetzte radioaktive Stoffe zu schützen. Die Kriterien nach ADR sind vor allem für den möglichen Transport von Endlagerbehältern über öffentliche Verkehrswege zum Endlagerstandort relevant. Werden Endlagerbehälter nur innerbetrieblich von einer am Endlagerstandort befindlichen Konditionierungsanlage zum Endlager transportiert, kann auf eine Auslegung als Typ-B(U)-Versandstück verzichtet werden. Relevant für die Auslegung der Endlagerbehälter sind bezüglich der Einschlussfunktion der Endlagerbehälter vor allem die Grenzwerte für die Strahlenbelastung von Bevölkerung und Personal nach den Sicherheitsanforderungen des BMU und dem Strahlenschutzgesetz. Die Auslegung der Endlagerbehälter hat so zu erfolgen, dass durch Verhinderung der Freisetzung aus den Behältern diese eingehalten werden. Zu beachten ist auch die geforderte Dichtheit der Behälter gegen Aerosole bei der Bergung.

Nach der zeitlichen Abhängigkeit ist der Einschluss des radioaktiven Inventars durch die Behälter für die Nutzungsphasen Einlagerung, Rückholbarkeit und Bergbarkeit grundsätzlich als

gas- bzw. aerosoldicht zu fordern. Nach diesen Nutzungsphasen ist die zu fordernde Dichtheit der Behälter abhängig vom Zusammenspiel mit den weiteren Barrieren. Diese ist so festzulegen, dass die Einhaltung der in den Sicherheitsanforderungen festgelegten Grenzwerte der Dosis für die Bevölkerung und der Freisetzung nach /BMU 2020/ erfolgt. Für mögliche Endlagersysteme im Kristallin, in denen der Einschluss im Wesentlichen durch technische und geotechnische Barrieren erfolgen soll, ist die Einschlussfunktion für den gesamten Nachweiszeitraum aufrecht zu erhalten. Die endgültige Quantifizierung von Einschluss bzw. Dichtheit der Behälter hat mit der Aufstellung der Annahmebedingungen für das zukünftige Endlager zu erfolgen.

6.2 Abschirmung ionisierender Strahlung

Maßgebliche Grundlage zur Quantifizierung der Abschirmungsfunktion sind die Vorgaben des Strahlenschutzgesetzes und der Strahlenschutzverordnung. Die dort geforderten Grenzwerte wurden bereits für die Einschlussfunktion erläutert. Eine weitere Möglichkeit die Abschirmungsfunktion zu quantifizieren, ist die Auslegung des Endlagerbehälters analog zur ADR /UNECE 2016/ aus dem Transport von Gefahrgut. Dort sind für die Ortsdosisleistungen für Behälter zum Transport radioaktiver Stoffe folgende Grenzwerte festgelegt:

- Eine Ortsdosisleistung von max. 2 mSv/h an jedem Punkt der Gebindeoberfläche oder eines zugehörigen Overpacks (4.1.9.1.11)
- Eine Ortsdosisleistung von max. 0,1 mSv/h in 2 m Abstand von der Oberfläche des Transportfahrzeugs (7.5.11 CV33)

Weiterhin wird in ADR 6.4.8.8 gefordert, dass unter den Bedingungen der für die Zulassung notwendigen Behältertests eine maximale Ortsdosisleistung von 10 mSv/h in 1 m Abstand von der Gebindeoberfläche eingehalten wird.

Erfolgt der Transport der Endlagerbehälter innerhalb des Endlagers ohne weitere Abschirmungen oder Overpacks, wäre auch die Ortsdosisleistung von max. 0,1 mSv/h in 2 m Abstand durch den Behälter selbst zu gewährleisten. Aus ADR 6.4.8.8 kann die erforderliche Abschirmung für Unfall- oder Störfallbedingungen abgeleitet werden. Sind die geforderten Abschirmungen nicht durch den Behälter selbst erfüllbar, müssen für Transport und Einlagerung zusätzliche Transferbehälter und Abschirmungen eingesetzt werden. Die genannten Grenzwerte sind dann durch diese zu erfüllen. Neben der ADR müssen weiterhin die Grenzwerte des Strahlenschutzgesetzes für beruflich exponierte Personen und die danach möglichen Aufenthaltsdauern in Behälternähe beachtet werden. Die genannten Grenzwerte nach ADR werden als Möglichkeit angesehen, die Abschirmungsfunktion von Endlagerbehältern für die Nutzungsphasen Einlagerung, Rückholbarkeit und Bergbarkeit zu quantifizieren. Die Grenzwerte der ADR sind zunächst nur für den Transport von radioaktivem Material im öffentlichen Verkehr einzuhalten. Falls der Transport der Endlagerbehälter nur innerbetrieblich im Bereich des Endlagers geschieht, ist eine Einhaltung der ADR nicht erforderlich. Hier sind dann Grenzwerte zu ermitteln, die eine Einhaltung des Strahlenschutzgesetzes zuverlässig gewährleisten.

Eine weitere Anforderung an die Abschirmung der Endlagerbehälter wurde aus der möglichen Schädigung weiterer Barrieren durch ionisierende Strahlung abgeleitet. Entsprechende Grenzwerte resultieren aus den Schädigungsgrenzen der jeweiligen geologischen Barriere in Abhängigkeit vom Endlagerkonzept.

Bei den Endlagerkonzepten im Steinsalz, ist eine Strahlenschädigung direkt am Wirtsgestein und Gasbildung durch Radiolyse möglich. Im FuE-Vorhaben ISIBEL /DBETEC 2008a/ wurde daher in Form einer groben Abschätzung eine Begrenzung der Dosisleistung auf 10^4 Gy/h vorgeschlagen. Damit soll eine Schädigung der geologischen Barriere durch die Strahlung verhindert werden. Grundlage dieser Einschätzung ist zum einen die RSK-Stellungnahme "Strahlenschädigung im Steinsalz" /RSK 2006/ und die RSK-Stellungnahme "Gase im Endlager" /RSK 2005/. In /RSK 2006/ wird für auftretende Strahlenschäden im Steinsalz eine notwendige Minstdosis von "einigen Megagray" genannt. Nachdem diese in das Salz eingestrahlt seien, könnten sich Strahlenschäden bilden. Der Umfang der Strahlenschäden ist abhängig von der Dosisleistung und der Dosis. In /RSK 2005/ werden mögliche Gasbildungsmechanismen in Endlagern beschrieben, Grenzwerte für die Dosisleistung zur Vermeidung von Radiolyse werden allerdings nicht genannt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bei den herangezogenen Daten (z. B. /Den Hartog 1999/) bezüglich Dosisleistung und Dosis die zugrundeliegenden Randbedingungen nicht direkt mit den Randbedingungen eines Endlagers vergleichbar sind /RSK 2006/. Dabei wurde eine Schädigung des Steinsalzes im Behälternahfeld als nicht sicherheitsrelevant in Kauf genommen, da zum Zeitpunkt dieser Abschätzung keine Anforderungen an eine Rückholbarkeit oder Bergbarkeit der Gebinde bestanden. Deshalb ist in /DBETEC 2008a/ unter dieser Prämisse der Richtwert von 10^4 Gy/h vorgeschlagen worden. Im Rahmen der untertägigen Standorterkundung sollte dieser Richtwert auf seine Plausibilität überprüft und dann endgültig festgelegt werden. Bei dickwandigen Behältern wie POLLUX®-Behältern, kann davon ausgegangen werden, dass diese Anforderung durch die notwendige Abschirmung für den Endlagerbetrieb mit abgedeckt wird. Bei dünnwandigen Endlagerbehältern wie Brennstabkokillen, ist eine Einhaltung dieser Anforderung zu überprüfen.

Für die Wirtsgesteine Tonstein und Kristallin ist vor allem die Radiolyse vorhandener Wässer zu beachten. Diese kann zum Aufbau von Gasdruck, zur Veränderung des geochemischen Milieus und zur Schädigung von Barrieren aus Bentonit, wie z. B. Buffern, führen. Um diese zu quantifizieren wird auf Einschätzungen der finnischen POSIVA für den Bentonitbuffer im KBS-3-Konzept zurückgegriffen /POSIVA 2012/. Dort wurde im KBS-3-Konzept die Dosisleistung an der Behälteroberfläche auf 1 Gy/h begrenzt. Für die Endlagerkonzepte in Tonstein und Kristallin in Deutschland kann diese Begrenzung hier übernommen werden.

6.3 Kritikalitätsausschluss

In allen Sicherheitskonzepten wird als grundlegende Sicherheitsanforderung der Ausschluss von Kritikalität für alle Betriebsphasen des Endlagers gefordert und ist entsprechend nachzuweisen. Die Regelungen zum Kritikalitätsausschluss sind international einheitlich und legen einen maximalen effektiven Neutronenmultiplikationsfaktor $k_{\text{eff}} < 1$ fest (kritisches System: $k_{\text{eff}} = 1$). In Deutschland wird zukünftig nach § 8 des vorliegenden Entwurfs der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) /BMU 2020/ ein Grenzwert von $k_{\text{eff}} < 0,95$ bis

500 Jahre nach dem Verschluss des Endlagers und $k_{\text{eff}} < 0,98$ über den gesamten weiteren Nachweiszeitraum von bis zu 1 Million Jahren nach dem Verschluss des Endlagers gelten.

Laut Endlagersicherheitsanforderungsverordnung hat die Berechnung des effektiven Neutronenmultiplikationsfaktors anhand der reaktivsten Anordnung des Kernbrennstoffs zu erfolgen. Damit ist auch der unwahrscheinliche, aber im Sinne einer konservativen Nachweisführung zu betrachtende Fall der Flutung des Endlagergebindes mit Wasser bzw. Lösung und einer entsprechenden Moderatorwirkung zu berücksichtigen. Die Berechnung des Neutronenmultiplikationsfaktors wird in der Anlage „Berechnung des Neutronenmultiplikationsfaktors“ zu /BMU 2020/ erläutert.

6.4 Temperaturbeschränkung

Die Temperatur an der Behälteroberfläche ist für den Endlagerbetrieb, sowie zum Schutz der weiteren Barrieren zu begrenzen.

Grundlage zur Festlegung der Behälteroberflächentemperatur während des Endlagerbetriebes kann das Europäische Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, kurz ADR sein. Hier ist für den Transport von radioaktiven Stoffen in Typ B(U) Versandstücken in Abschnitt 6.4.8.4 die maximale Temperatur an berührbaren Oberflächen der Behälter auf 85 °C begrenzt /UNECE 2016/. Vorher wird schon in Abschnitt 6.4.8.3 festgelegt, dass die Oberflächentemperatur an berührbaren Oberflächen 50 °C nicht überschreiten soll. Beide Werte gelten ohne eine weitere Aufheizung durch Sonneneinstrahlung und bei einer angenommenen Umgebungstemperatur von 38 °C. Nach Absatz 6.4.8.2 wird gefordert, dass die Versandstücke so auszulegen sind, dass durch die Wärmeentwicklung innerhalb des Behälters die Schutzfunktionen Einschluss und Abschirmung nicht negativ beeinflusst werden. Eine allgemeine Festlegung einer maximalen Temperatur für Behälter außer an berührbaren Oberflächen erfolgt nicht.

Für die Nutzungsphasen Einlagerung, Rückholbarkeit und Bergbarkeit wird daher aus betrieblicher Sicht angenommen, dass die Oberflächentemperatur der Behälter 85 °C nicht überschreiten darf. Dies gilt für den Behälter während des Transports im Endlager und während des Einlagerungsvorgangs. Für die Zeiträume Rückholbarkeit und Bergbarkeit entsprechend für den wieder freigelegten und zum Transport im bewetterten Bergwerk bereitstehenden Endlagerbehälter. Für einen versetzten Behälter gilt dies nicht. Zu beachten ist hier die Formulierung der ADR bezüglich berührbarer Oberflächen. An nicht berührbaren Oberflächen, z. B. in Transferbehältern verpackte Kokillen, sind daher höhere Oberflächentemperaturen möglich. Zusätzlich müssen die Auswirkungen des Wärmeeintrags durch die Endlagerbehälter auf die Temperatur innerhalb des Grubengebäudes (KlimaBergV) und die benötigte Wettermenge beachtet werden. Für die Handhabbarkeit der Endlagerbehälter wird eine Oberflächentemperatur von 85 °C als abdeckend angesehen.

Für die Inventare der Behälter wurden in /DBETEC 2008a/ folgende Temperaturbeschränkungen angegeben: Maximal 390 °C für DWR-BE, max. 410 °C für SWR-BE. Entnommen wurden diese in /DBETEC 2008a/ aus den Auslegungsunterlagen für POLLUX®-Behälter /DWK 1986/.

Bei Überschreitung dieser Temperaturen kann die Integrität der Brennstabhüllrohre geschädigt werden und gasförmige Spaltprodukte können in den Innenraum des Behälters austreten. Ist für den Langzeitsicherheitsnachweis die Integrität der Brennstabhüllrohre als Barriere nicht erforderlich und ist der Endlagerbehälter auf den sich einstellenden Innendruck ausgelegt, kann auf eine Anforderung für die Temperatur am Brennstabhüllrohr verzichtet werden. Bei der trockenen Zwischenlagerung von bestrahlten Brennelementen in Deutschland sind momentan maximale Hüllrohrtemperaturen von 370 °C genehmigt /Spykman 2018/.

Für das Glasprodukt in HAW-Kokillen beträgt die Transformationstemperatur, ab der die verwendeten Gläser in einen zähflüssigen Zustand übergehen und zur Entmischung neigen /KIT 2017/, ca. 773 K bis 823 K /FZKA 2001/. Damit ergibt sich für die HAW-Kokillen eine theoretische Maximaltemperatur von ca. 500 °C. In /BFE 2019/ wird darauf hingewiesen, dass die Glasübergangstemperatur in der Praxis immer 50 °C bis 100 °C unter der theoretischen Maximaltemperatur liege. Bei den endzulagernden HAW-Kokillen solle daher die Innentemperatur nicht über 450 °C liegen. Zur Erfordernis dieser Anforderung gilt das gleiche wie bei der Anforderung an die Hüllrohrtemperatur. Ist die Intaktheit des Glasproduktes für den Langzeitsicherheitsnachweis notwendig, ist die Anforderung an den Endlagerbehälter zu stellen, ansonsten kann auf eine Anforderung an die Inventartemperatur auch verzichtet werden.

Für den eingelagerten und versetzten Behälter ist die zulässige Oberflächentemperatur abhängig vom Wirtsgestein. Maßgebend sind hier die physikalisch möglichen oder zulässigen Temperaturen, bevor es zu temperaturbedingten, sicherheitsrelevanten Schädigungen an der Barriere Wirtsgestein kommt. Die maximal physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen sind momentan noch Gegenstand der Forschung. Im Standortauswahlgesetz /StandAG 2017/ wurde die Oberflächentemperatur der Endlagerbehälter daher aus Vorsorgegründen vorläufig auf 100 °C unabhängig vom Wirtsgestein begrenzt. Durch die Ergebnisse zukünftiger FuE-Vorhaben kann diese Grenztemperatur wieder erhöht werden. Für das Wirtsgestein Steinsalz wurde vor Verabschiedung des Standortauswahlgesetzes eine Grenztemperatur von 200 °C angenommen /GRS 2011b/. Für Tonstein wurde im Vorhaben ANSICHT /DBETEC 2015c/ eine Temperatur von 150 °C als vorteilhaft angesehen, da bei diesen Temperaturen die mikrobielle Aktivität und die damit verbundene Korrosion merklich zurückgehen. In Kristallin wird im Schwedisch-Finnischen KBS-3-Konzept die Behälteroberflächentemperatur auf 100 °C begrenzt /POSIVA 2012/, um bei der Verwendung von Bentonit als Buffermaterial Schäden am Buffer zu verhindern. Einen Gegensatz dazu bildet das Schweizer Endlagerkonzept, dort wird der Bentonitbuffer entsprechend massiv ausgelegt, sodass auch noch Oberflächentemperaturen bis zu 160 °C ermöglicht werden /NAGRA 2003/. Weitere Beispiele zur Behälteroberflächentemperatur in internationalen Endlagerkonzepten sind im Bericht zum AP1 des Vorhabens KoBrA angegeben /BAM 2020/.

Eine erste Überprüfung der generellen Temperaturvorgabe durch das StandAG erfolgte als Literaturrecherche durch die GRS in /BFE 2019/. Dabei sollte aufgezeigt werden, welche Prozesse im Hinblick auf die Wärmeverträglichkeit der Endlagerkomponenten besonders zu betrachten sind und deren Relevanz für die Betriebs- und Langzeitsicherheit eines Endlagers nach Stand von Wissenschaft und Technik bewertet werden. Als Ergebnis des Vorhabens wird keine Festlegung einer wirtsgesteinsübergreifenden Grenztemperatur empfohlen. Als Begrün-

dung dafür wird der Erhalt von Gestaltungsspielräumen in zukünftigen Sicherheits- und Nachweiskonzepten und eine mögliche Optimierung dieser im Verlauf des Standortauswahlverfahrens genannt. Die zulässigen Behälteroberflächentemperaturen sollen nach /BFE 2019/ durch das Sicherheitskonzept und an das Endlagerkonzept angepasst festgelegt werden. Als Bandbreite plausibler und international verwendeter Behälteroberflächentemperaturen werden in /BFE 2019/ 80 °C bis 230 °C genannt. In /BFE 2019/ wird auch auf die Behälteroberflächentemperatur im Zusammenhang mit der Handhabbarkeit und Stabilität der Behälter sowie Rückholbarkeit und Bergbarkeit eingegangen. Die Rückholbarkeit sei demnach nicht wesentlich temperaturabhängig, maßgeblich seien Behälterkonzept und Rückholungstechniken. Zusammenfassend ist nach /BFE 2019/ festzustellen, dass Rückholung und Bergung durch niedrigere Oberflächentemperaturen erleichtert werden könnten. Hohe Behälteroberflächentemperaturen seien allerdings kein Ausschlusskriterium, sondern seien im Rahmen der technischen Planungen zu berücksichtigen. Für die Phase der Bergbarkeit werden weitere Untersuchungen als erforderlich betrachtet, um sicherzustellen, dass die Handhabbarkeit bei der Bergung und den möglichen auftretenden Temperaturen gewährleistet ist.

6.5 Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion

In einem Endlager können Gase durch verschiedene Mechanismen entstehen. Hauptmechanismus ist die Wasserstoffentstehung bei der Metallkorrosion. Weiterhin können Gase bei der Zersetzung organischer Materialien oder durch die in Kapitel 6.2 schon genannte Radiolyse gebildet werden. Durch die dort eingeführte Anforderung an die Abschirmung wird diese hier als für ausreichend abgeschirmte Behälterkonzepte als abgedeckt betrachtet. Für unabgeschirmte Endlagergebinde muss die Radiolyse im Rahmen der durchzuführenden Sicherheitsuntersuchungen mitbetrachtet werden. Innerhalb des Endlagers können Gase zum Druckaufbau und damit verbundener Schädigung von Barrieren, zur Änderung des chemischen Milieus und zur gesteigerten Mobilität von freigesetzten Radionukliden führen.

Eine Quantifizierung der Funktion der Begrenzung der Gasproduktion ist hier nicht möglich. Die Einflussbedingungen auf die Gasbildung und damit verbundenen Druckaufbau, wie chemisches Milieu oder die Speicherkapazität im versetzten Grubengebäude, sind zum jetzigen Zeitpunkt noch unbekannt. Daher kann kein Zahlenwert für zulässige Gasbildungsrate pro Endlagerbehälter abgeleitet werden.

Bei der Auslegung der Endlagerbehälter ist die Verringerung der Gasproduktion vor allem bei der Werkstoffauswahl zu beachten. Es sollten Werkstoffe gewählt werden, die unter den Bedingungen des zukünftigen Endlagerstandorts möglichst keine oder nur geringe Korrosion erwarten lassen. Zudem sollte möglichst auf die Verwendung organischer Materialien verzichtet werden. Dadurch wird die Gasproduktion durch Zersetzungsprozesse verringert.

6.6 Handhabbarkeit

An die Endlagerbehälter wird auch die Anforderung an die Funktion der Handhabbarkeit gestellt. Damit soll sichergestellt werden, dass der Behälter zur Einlagerung, sowie zur potentiellen Rückholung und Bergung handhabbar ist. Die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung /BMU 2010/ verlangen konkret unter wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers eine Handhabbarkeit der Behälter für den Bergungszeitraum (Abs. 8.6). Eine allgemeingültige Quantifizierung der Funktion Handhabbarkeit kann hier nicht erfolgen. Diese ist direkt abhängig vom gewählten Endlager- und Behälterkonzept. Die Behälterabmessungen und ihre Geometrie, die Masse, die Behältermaterialien, die geplante Einlagerungs- und Transporttechnik oder die geplanten Anschlagpunkte des Behälters beeinflussen diese direkt. Hauptanforderung ist hier die Sicherstellung, dass alle Sicherheitsfunktionen des Endlagerbehälters unter der Einwirkung von Handhabungslasten erhalten bleiben.

Mit der Funktion der Handhabung können beispielhaft folgende weitere Anforderungen verbunden sein:

- Anforderung an den Einschluss des radioaktiven Inventars
- Anforderungen an die Abschirmung
- Beschränkung der Oberflächentemperatur
- Beschränkungen der Behälterabmessungen und Masse
- Verfügbarkeit von Lastanschlagpunkten
- Erhaltung der Formstabilität und Funktionssicherheit von Lastanschlagpunkten und von Endlagerbehältern unter Einwirkung der Handhabungslasten

Die Funktionen des Einschlusses, der Abschirmung und der Temperaturbeschränkung wurden bereits in den Kapiteln 6.1, 6.2 und 6.4 behandelt. Kann der Endlagerbehälter diese Anforderungen selbst nicht erfüllen, wie z. B. die Abschirmung bei Brennstabkokillen, sind für die Handhabung weitere Komponenten wie Zusatzabschirmungen, Overpacks oder Transferbehälter zu verwenden. Auf diese geht dann im Sinne eines modularen Behälterkonzepts ein Teil der Anforderungen über.

Für verschiedene Behälterkonzepte haben bereits Arbeiten und Demonstrationsversuche zur Handhabung stattgefunden. Für POLLUX®-Behälter ist eine Schachtförderanlage mit einer Nutzlast von 85 Mg entworfen worden. Diese wurde im Rahmen von Demonstrationsversuchen /DBE 1994/ als Stand der Technik bestätigt. Die Einlagerung der POLLUX®-Behälter in Strecken wurde im Rahmen der Handhabungsversuche zur Streckenlagerung /DBE 1995/ ebenfalls als machbar und Stand der Technik nachgewiesen. Endlagerbehälter mit einer Masse von 65 Mg können damit gehandhabt werden. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie für die kerntechnische Industrie zur direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (DI-REGT) /DBETEC 2014a/ wurde die Schachtförderanlage auf eine Nutzlast von 175 Mg erweitert. Eine grundsätzliche Machbarkeit wurde durch Sachverständige bestätigt, ein Nachweis durch Demonstrationsversuche ist noch ausstehend. Ebenfalls nachgewiesen wurde im Vorhaben DENKMAL/ESDRED /DBETEC 2010a/ die Machbarkeit der Einlagerung von Brennstabkokillen in vertikalen Bohrlöchern. Dabei wurde ein Dummy der Brennstabkokille mit einer

Masse von 5,3 Mg und der zugehörige Transferbehälter mit einer Masse von 52 Mg verwendet. Dabei ist zu beachten, dass eine Auslegung der Transport- und Einlagerungstechnik immer zusammen mit der Behälterentwicklung oder zugeschnitten auf ein bestimmtes Behälterkonzept stattfand. Eine generelle Beschränkung der Behältermasse zur Sicherstellung der Handhabbarkeit wird daher als wenig sinnvoll angesehen.

Nach Absatz 8.2 der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010/ ist die Durchörterung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit Schächten, Auffahrungen oder Bohrungen zu minimieren. Hieraus lässt sich ableiten, dass auch die Abmessungen der Endlagerbehälter so klein wie möglich gewählt werden sollten. Dadurch lässt sich die Transport- und Einlagerungstechnik kompakter gestalten und die Querschnitte der Auffahrungen verringern sich. Nach § 11 Absatz 4 in /BMU 2020/ ist die Verletzung des Gebirges im Endlagerbereich bzw. des vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit Schächten, Bohrungen und Auffahrungen auf das unvermeidliche Ausmaß für sichere Errichtung, Betrieb und Stilllegung zu beschränken.

Die Dimensionierung von Endlagerbehältern muss einerseits die geometrischen Abmessungen der radioaktiven Abfälle (Brennelemente verschiedener Typen, Kokillen) berücksichtigen und ist andererseits Restriktionen durch das Handhabungs- und Endlagerkonzept hinsichtlich Begrenzungen bei Masse und Außenabmessungen unterworfen. Einerseits sollten Endlagerbehälter möglichst kompakt, robust und mit standardisierten Außenabmessungen hinsichtlich möglichst unkomplizierter Handhabungsabläufe und Minimierung der erforderlichen Auffahrungsvolumens ausgeführt sein, andererseits sollte eine Zerlegung von Brennelementen zur Verringerung der Abmessungen bzw. des Volumens wegen des dafür sehr hohen technischen Aufwands und der damit verbunden komplexen Strahlenschutz-, Sicherheits- und Sicherungsfragen möglichst nicht in Betracht gezogen werden.

7 Anforderungen an die Bergbarkeit bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und ihre Auswirkungen auf Behälterkonzepte

Sicherheitstechnische Betrachtungen zur Langzeitbeständigkeit von Transport- und Lagerbehältern für hochradioaktive Abfälle liegen in Deutschland der atomrechtlich genehmigten trockenen Behälterzwischenlagerung über einen Zeitraum von bis zu 40 Jahren zugrunde. Ausgehend von den vom BMU definierten *Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle* /BMU 2010/ und den bei der Zwischenlagerung einschließlich des bisherigen Betriebes gewonnenen Erkenntnissen und Erfahrungen, sowie unter Berücksichtigung internationaler Entwicklungen in der Endlagerforschung, werden im Vorhaben KoBrA spezifische Anforderungen an Endlagerbehälter hergeleitet. Dabei resultieren zusätzliche Anforderungen aus der in den Sicherheitsanforderungen des BMU geforderten Möglichkeit einer Rückholung während der Betriebsphase oder einer Bergung der Behälter für bis zu 500 Jahre nach dem endgültigen Verschluss des Endlagerbergwerkes.

Im Verlauf der Bearbeitung des Vorhabens „KoBrA“ ist deutlich geworden, dass gerade die Anforderung an eine spätere Bergbarkeit der Endlagergebäude auslegungsbestimmend für die zu entwickelnden Behälter werden kann. Daher werden zunächst ausgehend von den grundlegenden Ausführungen in den 2010 veröffentlichten Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 2010/, den Empfehlungen der ESK hinsichtlich der Anforderungen an Endlagergebäude /ESK 2017/, dem Abschlussbericht der Endlagerkommission /KDRS 2016/ sowie dem seit Inkrafttreten 2013 hierfür maßgeblichen Standortauswahlgesetz /StandAG 2017/ zunächst der Begriff der Bergung und nachfolgend die daraus resultierenden Anforderungen an Endlagerbehälter hergeleitet. Der parallel zu diesen Arbeiten vom BMU veröffentlichte Entwurf für eine *Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle* /BMU 2020/ wird hier ebenfalls berücksichtigt, um der aktuellen Regelwerksentwicklung Rechnung zu tragen. Nach ihrer Verabschiedung durch den Bundestag soll diese Verordnung die bisherigen Sicherheitsanforderungen des BMU von 2010 voraussichtlich 2020 ablösen. Unter Berücksichtigung von Anforderungen an eine geeignete Nachweisführung und die dafür grundsätzlich zur Verfügung stehenden Nachweismethoden werden die Konsequenzen aus der Forderung nach Bergung hergeleitet und Auswirkungen auf die Entwicklung von Behälterkonzepten diskutiert.

7.1 Begriff der Bergung

Nach § 26 Abs. 2 Nr. 3 StandAG ist neben der Möglichkeit einer Rückholung der Abfälle während der Betriebsphase auch zu gewährleisten, dass „für einen Zeitraum von 500 Jahren nach dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers ausreichende Vorkehrungen für eine mögliche Bergung der Abfälle vorgesehen werden“, wobei die Bergung nach § 2 Abs. 4 StandAG das „ungeplante Herausholen von radioaktiven Abfällen aus einem Endlager“ umfasst /StandAG 2017/. Diese Definition ist seit Inkrafttreten des Standortauswahlgesetzes 2013 verbindlich. Vorgaben zur Ermöglichung einer Bergung der Endlagergebäude werden auf Grundlage von § 26 Abs. 3 Nr. 2 StandAG in der gegenwärtig als Entwurf vorliegenden *Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV)* weiter konkretisiert. Damit ist die bisherige Definition der Bergung gemäß den vom BMU 2010 veröffentlichten *Sicherheitsanforderungen an die*

Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 2010/ überholt und die daraus resultierenden Anforderungen an die Ermöglichung einer Bergung werden voraussichtlich 2020 mit Inkrafttreten der EndlSiAnfV neu festgelegt.

In den *Sicherheitsanforderungen* von 2010 wurde die Bergung als „*Rückholung radioaktiver Abfälle aus dem Endlager als Notfallmaßnahme*“ bezeichnet /BMU 2010/. Im Entwurf der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung /BMU 2020/ wird der Begriff Bergung nicht weiter definiert. Stattdessen werden in § 14 EndlSiAnfV die zur „*Ermöglichung einer Bergung eingelagerter Endlagergebäude*“ zu treffenden Vorkehrungen und Maßnahmen dargestellt. Aufgrund der Ableitung der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung aus § 26 Abs. 3 und § 27 Abs. 6 StandAG ist hier die oben genannte Definition aus dem Standortauswahlgesetz maßgeblich.

Im Gesamtprozess einer Standortauswahl in Deutschland und der Entwicklung eines wirtschaftersteins- bzw. standortspezifischen Endlagerkonzeptes mit entsprechendem Sicherheitskonzept stellen die Rückholbarkeit während des Einlagerungsbetriebes und der sich an den Verschluss des Endlagerbergwerkes anschließende Zeitraum von 500 Jahren für eine Bergung grundsätzliche Möglichkeiten für künftige Generationen dar, bereits getroffene Entscheidungen hinsichtlich des Endlagerkonzeptes zu revidieren und mögliche Fehler zu korrigieren. Die Bergung selbst würde dabei z. B. über „*das Auffahren eines zweiten Bergwerkes in Nachbarschaft zu dem ursprünglichen Endlagerbergwerk erfolgen*“ /KDRS 2016/. „*Voraussetzungen dafür sind die Wiederauffindbarkeit, das heißt die genaue Kenntnis der Lage der Abfälle zum Zeitpunkt der Einlagerung, sowie der intakte Zustand der Behälter*“ /KDRS 2016/. Gemäß § 26 Abs. 2 Nr. 3 StandAG ist dies allgemein notwendig, da sich der Zeitraum einer möglichen Bergung an den Verschluss des eigentlichen Endlagerbergwerkes anschließt /BMU 2010/ und demzufolge ein neues Bergwerk angelegt werden muss, um die eingelagerten Abfälle zu erreichen.

Hinsichtlich des für die Gewährleistung einer Bergbarkeit der Endlagergebäude zu betrachtenden Zeitraumes ist zu beachten, dass sich die zugrundeliegenden Definitionen mit der *Endlagersicherheitsanforderungsverordnung* /BMU 2020/ verändern werden. In den *Sicherheitsanforderungen* von 2010 und, darauf aufbauend, den *Empfehlungen der Entsorgungskommission vom 17.03.2017*, wird für die Rückholbarkeit der Zeitraum der Betriebsphase des Endlagers angesetzt und für die Bergbarkeit ein Zeitraum von bis zu 500 Jahren, beginnend mit dem vollendeten Verschluss des Endlagersystems /BMU 2010/, /ESK 2017/. Während nach § 26 Abs. 2 Nr. 3 StandAG die Möglichkeit einer Rückholung weiterhin während der Betriebsphase zu gewährleisten ist /StandAG 2017/, ist dies nach § 13 Abs. 1 des Entwurfes der *Endlagersicherheitsanforderungsverordnung* /BMU 2020/ nunmehr bis zum Beginn der in der Betriebsphase liegenden Stilllegung des Endlagerbergwerkes notwendig. Mit den in § 14 Abs. 1 EndlSiAnfV getroffenen Festlegungen zur Bergbarkeit – eine Bergung muss „*während der Stilllegung und für einen Zeitraum von 500 Jahren nach dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers möglich*“ sein /BMU 2020/ – ergibt sich, dass die Stilllegungsarbeiten notwendigerweise ebenfalls bereits in die Bergbarkeitsphase fallen. Damit wären abhängig vom Zeitpunkt der Bergungsentscheidung während oder nach Beendigung der Verschlussarbeiten bergtechnische Maßnahmen bis hin zur Errichtung eines neuen Bergwerkes notwendig. Der Unterschied

zur bisherigen Regelung besteht in dieser Formulierung der *Endlagersicherheitsanforderungsverordnung* in einer Vorverlegung des Beginns der Bergbarkeitsphase bei gleichbleibendem Endpunkt. Für die zu betrachtenden Gebinde ergibt sich ein früherer Zeitpunkt einer möglichen Bergung während der Stilllegungsarbeiten, nach erfolgtem Verschluss des Endlagers hingegen gibt es – sowohl was anzunehmende Einwirkungen als auch Behälterstandzeiten betrifft – keinen Unterschied zu den bisherigen Regelungen. In jedem Fall erfordert die Gewährleistung und mögliche Durchführung einer Bergung vor bzw. neben der eigentlichen Planung und Errichtung des Bergwerkes auch die Schaffung der dazu notwendigen rechtlichen Voraussetzungen und die Einrichtung entsprechender übertägiger logistischer Infrastruktur und den damit verbundenen Zeitaufwand.

7.2 Anforderungen an Endlagerbehälter

In § 26 Abs. 2 StandAG werden für die Sicherheitsanforderungen verbindliche Schutzziele und Schutzprinzipien formuliert, darunter Einschluss und Konzentration der Abfälle mit dem Ziel, sie von der Biosphäre fernzuhalten (§ 26 Abs. 2 Nr. 1 StandAG), der *„Schutz des Menschen und, soweit es um den langfristigen Schutz der menschlichen Gesundheit geht, der Umwelt“* (§ 26 Abs. 2 Nr. 1 StandAG), die zu gewährleistenden Möglichkeiten einer Rückholung der Abfälle während der Betriebsphase bzw. einer Bergung der Abfälle *„für einen Zeitraum von 500 Jahren nach dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers“* (§ 26 Abs. 2 Nr. 3 StandAG) sowie die passive Sicherheit des Endlagers in der Nachverschlussphase (§ 26 Abs. 2 Nr. 4 StandAG) /StandAG 2017/. Die in Kapitel 3 der *Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle* des Bundesumweltministeriums von 2010 festgeschriebenen Schutzziele des *„dauerhafte[n] Schutz[es] von Mensch und Umwelt vor der ionisierenden Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle“* und der *„Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen“* /BMU 2010/ wurden als Teil der allgemeinen Vorschriften in § 1 Abs. 2 StandAG übernommen und definieren die allgemeinen Ziele des Standortauswahlverfahrens /StandAG 2017/. Der Verweis auf *„ein robustes Barrierensystem, bei dem die Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen unempfindlich sind“* /BMU 2010/ entfällt.

Zur Erreichung dieser Schutzziele und der daraus abgeleiteten Anforderungen sind grundlegende Funktionen sowohl seitens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs als auch der geotechnischen und technischen Barrieren einschließlich der Endlagergebäude notwendig und nachzuweisen. Dabei müssen die Endlagerbehälter Anforderungen hinsichtlich des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle für einen in Abhängigkeit von den geologischen Einschlussfunktionen des gewählten Wirtsgesteins festzulegenden Zeitraum genügen. Dieser umfasst mindestens den sicheren Betrieb des Endlagers – mit einer möglichen Rückholung der Gebinde während der Betriebsphase – sowie den Zeitraum bis 500 Jahre nach Verschluss des Endlagerbergwerkes mit einer möglichen Bergung der Gebinde /ESK 2017/. Bereits an dieser Stelle wird deutlich, dass die Forderung nach einer Bergbarkeit der Gebinde Anforderungen an die Sicherheitsfunktionen der Behälter über mehr als 500 Jahre (je nach Dauer des Betriebes und der Umsetzung der Verschlussmaßnahmen) stellen, und zwar unabhängig davon, welches Wirtsgestein und welches Endlagerkonzept letztlich ausgewählt wird. Für die

spätere Nachweisführung ist es wichtig, die längste nachweisrelevante Gebindestandzeit eindeutig zu definieren.

Grundlegend müssen Behälter als Teil des Multibarrierensystems sowie als direkte transportable Verpackungen der im Endlagersystem einzulagernden Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle die Einhaltung folgender **Schutzziele** gewährleisten (nach /ESK 2017/):

- den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle, d. h. die Vermeidung einer unzulässigen Freisetzung radioaktiver Stoffe, für einen konzeptabhängig festzulegenden Zeitraum (Gebindestandzeit)
- die Unterkritikalität, d. h. der Ausschluss einer selbsterhaltenden Kettenreaktion
- die sichere Abfuhr der im Inventar freigesetzten Zerfallswärme und
- die Vermeidung einer unnötigen Strahlenexposition des Betriebspersonals und der Bevölkerung

Diese grundlegenden Schutzziele für die technischen Barrieren finden sich auch in der im Entwurf vorliegenden *Endlagersicherheitsanforderungsverordnung* wieder, namentlich in § 6 Abs. 1 EndlSiAnfV (Einschlussfunktion), § 8 EndlSiAnfV (Unterkritikalität), § 5 Abs. 2 Nr. 4 und § 6 Abs. 2 Nr. 3 EndlSiAnfV (Nachweis der Nichtbeeinträchtigung geologischer, geotechnischer und technischer Barrieren durch die Temperaturentwicklung des Endlagersystems) sowie § 12 Abs. 1 Nr. 2 EndlSiAnfV (Betriebssicherheit als Optimierungsziel der technischen Endlagerauslegung).

Für die **Betriebsphase des Endlagers** – also für Anlieferung und Einlagerung der Abfallgebinde, das Verfüllen der Einlagerungsbereiche und die Standzeit bis zum Verschluss des Endlagerbergwerkes – sind entsprechend den Empfehlungen der Entsorgungskommission /ESK 2017/ folgende Anforderungen an die Endlagergebinde zu stellen:

- Integrität der Endlagergebinde und sicherer Einschluss der radioaktiven Abfälle
- Diese Anforderung gilt grundsätzlich in allen Phasen des Endlagerbetriebes /ESK 2017/, wobei die Einschlussfunktion nach einem vom Sicherheitskonzept des Endlagersystems abhängigen Wirkzeitraum auf die geologische Barriere des Wirtsgesteines übergehen kann
- Sichere Handhabbarkeit
- Die Endlagergebinde müssen eine sichere Handhabung (z. B. Umladung, Einlagerung und ggf. Rückholung) sowie einen sicheren innerbetrieblichen Transport ermöglichen
- Ausreichende Abschirmung der ionisierenden Strahlung durch die Behälter und gegebenenfalls sonstige über- und untertägige technische Einrichtungen (z. B. Transferbehälter). Die Anforderungen des Strahlenschutzes sind einzuhalten
- Rückholbarkeit der eingelagerten Abfallgebinde aus verfüllten Einlagerungsbereichen. Hierzu getroffene Maßnahmen dürfen die Langzeitsicherheit nicht unzulässig beeinträchtigen. Es gilt auch während einer Rückholung die Anforderung des gasdichten Einschlusses des Inventars
- Ein Beladungskonzept der Endlagergebinde, das eine sichere und einfache Be- oder Umladung mit Abfällen gewährleistet

- Kritikalitätsausschluss über den gesamten Nachweiszeitraum
- Kennzeichnung der Gebinde für eine eindeutige Identifizierung im Falle einer Rückholung

Diese Anforderungen können auch unter Verwendung ergänzender technischer Systeme wie z. B. Transferbehälter für nicht abgeschirmte Behälter erfüllt werden. Hinsichtlich der Rückholbarkeit ist bei derartigen modularen Konzepten nur für das Abfallgebinde selbst eine Rückholbarkeit zu gewährleisten, wobei zusätzliche technische Systeme wie Transferbehälter dann erneut zur Gewährleistung einer ausreichenden Abschirmung und Handhabbarkeit notwendig sind /ESK 2017/. Sämtliche Anforderungen, explizit der sichere (gasdichte) Einschluss und die Handhabbarkeit, sind auch im Falle betrieblicher Störungen oder bei Störfällen zu erfüllen. Entsprechende Betrachtungen und Nachweise sind Teil des Sicherheitskonzeptes.

Eine Begrenzung der Behälteroberflächen- und Inventartemperaturen wird in den Empfehlungen der ESK /ESK 2017/ für die Betriebsphase nicht explizit genannt, jedoch folgen erstere aus der Gewährleistung der Handhabbarkeit der Gebinde. Die Begrenzung der Temperaturen des Inventars folgt schrittweise aus den einzelnen Betriebsphasen, d. h. der Gewährleistung einer sicheren Be- oder Umladung der Abfälle über das Prinzip der Vermeidung einer Schädigung sicherheitsrelevanter Barrierefunktionen während der Einlagerung und explizit während der Nachverschlussphase.

Da eine **Rückholbarkeit** der Behälter nach § 26 Abs. 2 Nr. 3 StandAG während der Betriebsphase des Endlagers gefordert ist, müssen alle Behälter ihre Funktionen als technische Barriere zur Einhaltung der beschriebenen Sicherheitsanforderungen nicht nur bis zum Abschluss der Einlagerung über einen vergleichsweise kurzen Zeitraum bis zum Verschluss des Einlagerungsbereiches oder Bohrlochs, sondern bis zum endgültigen Verschluss des gesamten Endlagerbergwerks erfüllen. Nach § 13 Abs. 1 EndlSiAnfV wiederum gilt diese Forderung nur bis zum Beginn der Stilllegung des Endlagers /BMU 2020/, womit ein Übergang von einer Rückholbarkeit in eine sich unmittelbar anschließende Bergbarkeit auf diesen früheren Zeitpunkt verlagert wird. Unabhängig davon beginnt der für die Behälterstandzeit zu betrachtende Zeitraum mit dem erstmaligen Verschluss eines Einlagerungsbereiches. Er endet mit dem Beginn der Stilllegung des Endlagerbergwerkes zuzüglich des notwendigen Zeitraumes bis zur Rückholung des letzten Behälters. Da es sich bei einer Rückholung um eine betriebliche Maßnahme handelt, sind die Anforderungen an das Nachweisniveau gegenüber dem Einlagerungsbetrieb unverändert. Dies schließt verlässliche Prognosen über den Zustand des potenziell „ältesten“ Behälters mit ein, dessen Eigenschaften weiterhin eine planbare Handhabung zur Verbringung nach über Tage erlauben müssen. Unterstellt man für den Rückholprozess einen vergleichbaren Zeitaufwand wie für den Einlagerungsprozess, so ist von einer Verdoppelung der möglichen Dauer der Betriebsphase des Endlagers und damit des notwendigen Nachweiszeitraumes bezüglich des Zustands der Endlagerbehälter auszugehen. Letztlich ergibt sich der genaue Zeitbedarf jedoch erst mit der Festlegung des Endlagerkonzeptes und seines Betriebsregimes einschließlich der Rückholungstechnologie. Damit folgen für die Endlagerbehälter aus der Gewährleistung einer möglichen Rückholung der Endlagergebinde während der Betriebsphase in erster Linie erweiterte Anforderungen hinsichtlich ihrer Langzeitbeständigkeit unter den Bedingungen der verfüllten Einlagerungsbereiche.

Für die mit dem vollständigen Verschluss des Endlagerbergwerkes beginnende Nachverschlussphase ergibt sich für die **Bergbarkeit** ein verändertes Anforderungsprofil /ESK 2017/:

- Sicherer Einschluss
- Die Endlagergebinde müssen für eine aus dem Endlagerkonzept abgeleitete Wirkungs-
dauer die durch das Sicherheitskonzept festgelegten Einschlusseigenschaften aufwei-
sen. Daher ergeben sich Anforderungen an die Dichtheit der Endlagergebinde abhängig
von Wirtsgestein, technischem Endlagerkonzept und dazu durchgeführten Sicherheits-
analysen. Für die Bergbarkeitsphase ist nach /BMU 2010/ grundsätzlich gefordert, dass
die Endlagergebinde bis zu 500 Jahre nach Verschluss des Endlagerbergwerkes noch
aerosoldicht und handhabbar sein müssen
- Strukturelle Integrität
- Zur Gewährleistung der festgelegten Einschlusseigenschaften über die Wirkungs-
dauer der Endlagergebinde müssen die Endlagergebinde inneren und äußeren Lasten wider-
stehen, ohne ihre strukturelle Integrität einzubüßen
- Temperaturbegrenzung
- Die Temperaturen des Gebindes (Behälteroberflächentemperatur) dürfen maximal zu-
lässige Temperaturgrenzen für das Wirtsgestein und die geotechnischen Barrieren nicht
überschreiten, um deren Barrierewirkung nicht zu beeinträchtigen. Im Behälterinneren
sind Grenzwerte für Inventar- und Bauteiltemperaturen einzuhalten
- Vermeidung negativer Einflüsse auf weitere Barrieren
- Die Endlagergebinde dürfen keine unzulässigen negativen Wirkungen auf weitere Barri-
eren des Multi-Barrierensystems ausüben. Diese Anforderung beinhaltet neben der Be-
achtung von Temperaturgrenzwerten die Begrenzung physikalisch-chemischer und mik-
robieller Prozesse (z. B. galvanische Korrosion, Radiolyse, Gasbildung)
- Materialauswahl
- Die verwendeten Materialien müssen den sicheren Einschluss und die Integrität des
Endlagergebindes unter inneren und äußeren Lasten gewährleisten. Auch hier sind ne-
gative chemisch-physikalische und mikrobielle Einwirkungen (s. o.) sowie mechanische
und hydraulische Belastungen zu berücksichtigen
- Handhabbarkeit
- Für einen Zeitraum von bis zu 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers müssen die
Abfallgebinde (modular) bzw. Endlagergebinde (integral) bergbar sein. Diese Anforde-
rung beinhaltet Aerosoldichtheit (s. o. „Sicherer Einschluss“) sowie den Erhalt der struk-
turellen Integrität (s. o.). Für die Durchführung einer Bergung müssen die Gebinde hand-
habbar sein. Maßnahmen zur Gewährleistung der Bergbarkeit dürfen die Langzeitsicher-
heit nicht unzulässig beeinträchtigen
- Kritikalitätsausschluss über den gesamten Nachweiszeitraum
- Kennzeichnung der Gebinde für eine eindeutige Identifizierung im Falle einer Bergung.

Da diese Anforderungen sämtlich auch für eine Rückholbarkeit gewährleistet sein müssen /ESK 2017/, entspricht eine Gewährleistung der diesbezüglichen Behälterfunktionen für eine mögliche Bergung der eingelagerten Gebinde eine abdeckende Auslegung für eine mögliche Rückholung zu einem definitionsgemäß früheren Zeitpunkt. Die Vorverlegung des Beginns der

Bergbarkeitsphase entsprechend des in § 13 Abs. 1 EndlSiAnfV festgesetzten Endes des Zeitraumes einer möglichen Rückholung ändert daher das Anforderungsprofil qualitativ nicht.

Bei diesen Betrachtungen ist zu berücksichtigen, dass Schutzfunktionen abhängig vom Endlagerkonzept während der Nachverschlussphase vom Endlagergebäude auf die geologischen Barrieren übergehen können. Dabei ist die Einhaltung der Unterkritikalität in jedem Falle zu gewährleisten. Die Abschirmung ionisierender Strahlung in der Betriebsphase hingegen wird nach der Einlagerung bzw. nach der Verfüllung des Einlagerungsbereiches vollständig durch das geotechnische Barrierensystem abgedeckt, sodass von der Abschirmwirkung des Behälters kein Kredit mehr genommen werden muss. Bei einer Endlagerung in Sedimentgesteinen (Ton oder Salz) wird gemäß ESK-Empfehlung /ESK 2017/ nach einer Übergangsphase auch die Einschlussfunktion vom Wirtsgestein übernommen (einschlusswirksamer Gebirgsbereich), womit eine zeitlich darüberhinausgehende Gewährleistung der Einschlussfunktion durch die Endlagerbehälter nicht erforderlich ist. Alternativ zur Definition einer Übergangsphase wird in § 5 des Entwurfes der EndlSiAnfV /BMU 2020/ der notwendige Zeitraum der Einschlusswirksamkeit für technische und geotechnische Barrieren als Bestandteil des zu erstellenden Sicherheitskonzeptes ausgewiesen. Für Endlagergebäude ist demnach anzugeben, für welchen Zeitraum die einschlussrelevanten Behältereigenschaften mindestens nach dem jeweiligen Sicherheitskonzept zu gewährleisten wären. In nicht vollständig wasserundurchlässigen Wirtsgesteinen müssen der dichte Einschluss des radioaktiven Inventars und die Unterkritikalität auch langfristig durch technische oder geotechnische Barrieren gewährleistet werden, wobei der Endlagerbehälter für eine bestimmte Dauer (im Falle eines Endlagersystems, in dem den geotechnischen und geologischen Barrieren keine ausreichende Barrierefunktion zugewiesen werden kann, auch bis hin zum gesamten Nachweiszeitraum von 1 Million Jahre) die maßgebliche Rolle übernehmen muss. In einem Endlagerkonzept mit der Anforderung der Gewährleistung einer Bergbarkeit der Endlagergebäude nach Verschluss des Endlagers muss diese nach Sicherheitskonzept erforderliche Zeitdauer der Barrierewirkung der Endlagergebäude (die Übergangsphase nach /ESK 2017/), immer mindestens dem Bergbarkeitszeitraum entsprechen. Nach Kap. A-3.1.1 aus /ESK 2017/ werden beispielhaft folgende Gebindestandzeiten genannt: 100.000 Jahre für Kristallin (Finnland), 1.000 Jahre für Opalinuston (Schweiz) und bis zu 1.000 Jahre für Salz (Deutschland), wodurch ein Bergbarkeitszeitraum von 500 Jahren in allen Fällen abgedeckt wäre. Hierbei wird unter **Gebindestandzeit** derjenige Zeitraum verstanden, für den der Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleistet sein muss, d. h. die Integrität des Endlagerbehälters gegeben sein muss. Aus einer nachzuweisenden Einschlussfunktion der Endlagergebäude über diese Gebindestandzeit hinweg lässt sich per se keine Bergbarkeit der Endlagergebäude ableiten, da neben den Einschluss der Radionuklide auch weitere Anforderungen an die Behälterfunktionen, namentlich an deren mechanische Stabilität (§ 14 Abs. 2 im Entwurf der EndlSiAnfV /BMU 2020/), bestehen. Eine Bergbarkeit der Endlagergebäude ist daher unabhängig von der o. g. Gebindestandzeit zu zeigen.

Eine Begrenzung des Sicherheitsnachweises für die Gewährleistung der wesentlichen Behälterfunktionen findet aufgrund der möglichen Entwicklungen des Endlagersystems statt. Hier wird im vorliegenden Entwurf der *Endlagersicherheitsanforderungsverordnung* eine von den Definitionen der *Sicherheitsanforderungen des BMU* von 2010 abweichende Regelung getroffen, die allerdings mögliche Sicherheitsnachweise in gleicher Weise eingrenzt:

Entsprechend den Sicherheitsanforderungen des BMU von 2010 waren die Entwicklungsszenarien des Endlagersystems und seiner Komponenten bislang nach Wahrscheinlichkeitsklassen zu betrachten /BMU 2010/. Entwicklungen während der Nachverschlussphase waren nach ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit in wahrscheinliche ($\geq 10\%$), weniger wahrscheinliche ($1\% \dots 10\%$) und unwahrscheinliche Entwicklungen ($< 1\%$) unterteilt. Hinsichtlich der Freisetzung von Stoffen aus dem Endlagersystem in die Biosphäre waren für weniger wahrscheinliche Entwicklungen dementsprechend höhere Grenzwerte zulässig. Für unwahrscheinliche Entwicklungen galt kein Grenzwert; hier wurde der Schwerpunkt auf die Begrenzung/Reduzierung etwaiger Auswirkungen eines Versagens des Multi-Barrierensystems gelegt. Im Einzelnen wurden nach /BMU 2010/ für die die Bergbarkeitsphase enthaltende Nachverschlussphase hinsichtlich des Einschlusses der radioaktiven Abfälle die folgenden Anforderungen an den Langzeitsicherheitsnachweis des Endlagers gestellt:

- Der Einschluss der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich muss so nachgewiesen werden, dass „*allenfalls geringfügige Stoffmengen*“ /BMU 2010/ in eine begrenzte Umgebung entlassen werden
- Für wahrscheinliche Entwicklungen ist nachzuweisen, dass für (lebenslang exponierte) Einzelpersonen heutiger Lebenserwartung aufgrund von aus dem Endlager entweichender Radioaktivität eine zusätzliche effektive Jahresdosis von $10\ \mu\text{Sv}$ nicht überschritten wird
- Für weniger wahrscheinliche Entwicklungen ist nachzuweisen, dass für obigen Annahmen genügende Einzelpersonen eine effektive Jahresdosis von $100\ \mu\text{Sv}$ nicht überschritten wird
- Für unwahrscheinliche Entwicklungen werden keine zumutbaren Risiken oder Jahresdosen festgelegt; für Auswirkungen möglicher Ereignisse mit hoher Strahlungsfreisetzung ist „*zu prüfen, ob eine Reduzierung dieser Auswirkungen mit vertretbarem Aufwand möglich ist*“ /BMU 2010/

Diese Eintrittswahrscheinlichkeiten sind als Wahrscheinlichkeitsaussage über den gesamten Nachweiszeitraum von 1 Million Jahren zu verstehen. Damit wird deutlich, dass mit der Forderung nach Bergbarkeit der Abfallgebinde für bis zu 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers, d. h. mit der Forderung nach struktureller Integrität und Aerosoldichtheit der Abfallbehälter eine zusätzliche Robustheit hinsichtlich langfristiger Nuklidfreisetzungen in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich und ggf. die Biosphäre erreicht wird. Gleichzeitig dürften die o. g. Wahrscheinlichkeitsklassen langfristiger geologischer Entwicklungen und damit ggf. auch bzgl. der Beanspruchungsparameter für die Behälter, wie z. B. Gebirgsdruck, Wasserzutritt, für den Bergbarkeitszeitraum von 500 Jahren wenig Einfluss auf die Behälterauslegung haben, zumal für einen für technische Behältersysteme derartig großen Nachweiszeitraum ohnehin erhebliche Sicherheitszuschläge und eine robuste Behälterauslegung erforderlich sein werden. Für die Handhabbarkeit der Behälter galt nach /BMU 2010/ nur eine Anforderung für wahrscheinliche Entwicklungen. Grundlegend musste die „*Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein. Dabei [war] die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole zu beachten*“. Schließlich war zu berücksichtigen, dass für „*Entwicklungen aufgrund eines unbeabsichtigten Eindringens in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich [...] kein Wert für zumutbare Risiken oder zumutbare Strahlenexpositionen festgelegt*“ wurde /BMU

2010/. Allerdings handelt es sich bei einer Bergung um ein beabsichtigtes Eindringen in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich, so dass auch hierbei betriebliche Anforderungen aus Strahlen- und Arbeitsschutz sowie abhängig vom konkreten Bergungsszenarium unter Umständen weitergehende Anforderungen berücksichtigt werden müssen.

In § 3 Abs. 1 des Entwurfes der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung werden mögliche Entwicklungen des Endlagersystems nun nicht mehr in Wahrscheinlichkeitsklassen eingeteilt, sondern in entsprechende Kategorien zu erwartender, abweichender und hypothetischer Entwicklungen /BMU 2020/. Die Einteilung erfolgt hierbei nicht anhand von Eintrittswahrscheinlichkeiten, sondern nach einer zu erstellenden Methodik u. a. auf Basis der Sicherheitsfunktionen. Die Vorkehrungen für die Ermöglichung einer Bergung ist nach § 14 Abs. 2 Nr. 1 EndlSiAnfV ausreichend, wenn sie für zu erwartende Entwicklungen gezeigt werden kann, während die zur Ermöglichung einer Bergung notwendige Dokumentation der Endlagerung nach § 14 Abs. 2 Nr. 2 auch für „*prognostizierte mögliche Entwicklungen des Endlagersystems*“ /BMU2020/ angelegt wird. Die Beschränkung eines Nachweises für die Bergbarkeit (und damit verbunden, der Aerosoldichtigkeit, der mechanischen Integrität und der Handhabbarkeit) der Endlagergebinde auf zu erwartende Entwicklungen im derzeitigen Entwurf der *Endlagersicherheitsanforderungsverordnung* ist hierbei analog zu der in den *Sicherheitsanforderungen* von 2010 formulierten Beschränkung auf wahrscheinliche Entwicklungen als Teilmenge der möglichen Entwicklungen des Endlagersystems.

7.3 Sicherheitstechnische Nachweisführung

Eine sicherheitstechnische Nachweisführung für ein Endlagersystem kann im Detail erst auf Grundlage eines konkreten Endlagerkonzeptes erfolgen, wenn alle auslegungsrelevanten Beanspruchungsbedingungen für einen konkreten Standort in Verbindung mit spezifischen Behälterkonzepten hinreichend bekannt sind. Grundsätzlich sind für die geforderten behälterspezifischen Sicherheitsnachweise wie den Integritätsnachweis die ungünstigsten Beanspruchungszustände und Alterungsbedingungen zu berücksichtigen /BMU 2010/. Zur Ermittlung der auslegungsrelevanten Beanspruchungsgrößen sind neben den normalen Betriebsbedingungen aus der Sicherheitsanalyse der Anlage ermittelte auslegungsrelevante Störfallszenarien (z. B. Brand, Kollision, Behälterabsturz) zu berücksichtigen. Weiterhin sind abhängig vom Nachweiszeitraum langfristige Schädigungs- und Alterungsmechanismen hinsichtlich der mechanischen Stabilität der Endlagerbehälter bzw. der sicherheitsrelevanten Behälterkomponenten zu berücksichtigen. Für die erforderliche konservative Nachweisführung sind die ungünstigsten Behälterereignisse in Verbindung mit den ungünstigsten Beanspruchungsbedingungen zugrunde zu legen, die im Laufe der gesamten konzeptabhängig festzulegenden Behälterlebensdauer auftreten können.

Neben dem Strahlungsfeld des Inventars und möglicher radiolytischer Prozesse des Nahfeldes sind für eine mögliche Degradation des Behälterzustands vor Allem mechanische (statische und dynamische) Lasten und chemische Prozesse wie mikrobiell induzierte oder chemische Korrosion und die damit einhergehende Gasbildung und wasserstoffinduzierte Material-

versprödung wesentlich. Die mikrobielle, chemische, thermische oder radiolytische Zersetzung organischer Stoffe im Endlagersystem trägt über die resultierende Gasentstehung und Verschiebung chemischer Gleichgewichte zu diesen Prozessen bei.

Die entsprechenden Kriterien für die konzeptionelle und später konstruktive Auslegung der Behälter ergeben sich aus den von ihnen zu erfüllenden Sicherheitsanforderungen unter Berücksichtigung der mechanischen, chemischen, mikrobiellen und thermischen Beanspruchungen, denen die Behälter ausgesetzt sind. Der für die sicherheitstechnische Nachweisführung anzunehmende ungünstigste Behälterzustand, der sich am Ende der zu bewertenden Zeitspanne unter Berücksichtigung sämtlicher anzunehmender Degradationsmechanismen eingestellt haben kann, ist wesentlich von der Standzeit des Behälters im verfüllten Einlagerungsbereich abhängig. Das bedeutet, dass mit der Forderung nach Bergbarkeit ein spezifischer Behältersicherheitsnachweis in jedem Fall für einen Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers zu führen ist.

Sicherheitsnachweise sind grundsätzlich entsprechend den an das System gestellten Anforderungen oder diese abdeckend zu führen, also system-, zeit- und entwicklungsrelevant:

- Systemrelevanz bezieht sich auf die geologische Barriere des Endlagersystems und das verwirklichte Endlagerkonzept. Die sich aus der Standortgeologie (einschließlich der sich daraus ergebenden Einwirkungen durch z. B. Wasserzutritt und -durchfluss, Ionenkonzentrationen oder mikrobielle Besiedlung) und dem Endlagerkonzept (z. B. verwendete Materialien, Temperaturfelder) ergebenden Einwirkungen auf die Endlagergebäude sind in Sicherheitsnachweisen so getreu wie möglich oder nachweisbar konservativ abzubilden
- Zeitrelevanz beinhaltet die Veränderung von Anforderungen an die Endlagerbehälter über die Zeitphasen der Endlagerung. Mit den z. B. zwischen Betriebsphase und Nachverschlussphase unterschiedlichen Anforderungen sind auch die Nachweise entweder für die in der jeweiligen Phase geltenden oder konservativ abdeckenden Anforderungen zu führen
- Entwicklungsrelevanz leitet sich aus den für die Entwicklung des Endlagersystems definierten Wahrscheinlichkeitsklassen ab. Für den Nachweis einer erfüllten Anforderung in einer gegebenen Wahrscheinlichkeitsklasse sind mindestens sämtliche den Systementwicklungen dieser Wahrscheinlichkeitsklasse zugeordnete Einwirkungen auf die Endlagergebäude zugrunde zu legen. Dies bedeutet, dass z. B. eine für wahrscheinliche Entwicklungen gestellte Anforderung dann als erfüllt gilt, wenn ihre Erfüllung unter Berücksichtigung sämtlicher für wahrscheinliche Entwicklungen angenommenen Behältereinwirkungen nachgewiesen wird. Ein konservativer Nachweis für diesen Fall wäre eine nachgewiesene Erfüllung der Anforderung unter allen Umständen (also wahrscheinliche, weniger wahrscheinliche und unwahrscheinliche Entwicklungen)

Der Gesamtnachweis für die Erfüllung einer Anforderung ergibt sich aus einem konservativ abdeckenden Nachweis der Erfüllung dieser Anforderung für das gewählte Endlagerkonzept über den gesamten Nachweiszeitraum. Im Rahmen der Sicherheitsanforderungen des BMU von 2010 /BMU 2010/ wird für den Langzeitsicherheitsnachweis die umfangreiche Bewertung

und Dokumentation aller Betriebszustände des Endlagersystems (inklusive übertägiger Anlagen) gefordert, inklusive des zugrunde liegenden Endlagerkonzeptes und der Umsetzbarkeit der Anforderungen an technischen Barrieren (Systemrelevanz), der Qualitätssicherung erhobener Daten und Informationen, der Identifizierung, Bewertung und Handhabung von Unsicherheiten, der Identifizierung, Charakterisierung und Modellierung sicherheitsrelevanter Prozesse, der Analyse sicherheitsrelevanter Szenarien (Entwicklungsrelevanz).

Auslegungsrelevante Parameter sind nach den ESK-Empfehlungen /ESK 2017/:

- die zulässige inventarisierte Gesamtaktivität eines Abfallgebundes
- die Aktivitäten relevanter Radionuklide in einem Abfallgebunde
- die Kritikalitätssicherheit der Abfallgebunde
- die thermischen Gebindeeigenschaften
- die Dosisleistung am Gebinde
- die Oberflächenkontamination
- einzuhaltende Qualitätsanforderungen
- die zu handhabende Masse
- Qualitätssicherung in der Herstellung und
- die Erfüllung von aus Sicherheitsanalysen resultierender weiterer Anforderungen

Als Nachweismethoden zur Erbringung der geforderten Sicherheitsnachweise, d. h. der Einhaltung der sicherheitstechnischen Anforderungen, stehen grundsätzlich theoretische, d. h. analytische bzw. numerische sowie experimentelle Verfahren zur Verfügung, die originalmaßstäblich sowie skaliert an Modellen oder Teilsystemen und Komponenten eingesetzt werden können. Bei komplexen Nachweisverfahren werden die verschiedenen Methoden, d. h. Simulation und Experiment, in der Regel komplementär eingesetzt um valide Aussagen zu generieren.

Analytische bzw. numerische Simulationen erfolgen an Modellen anhand der ein System beschreibenden Parameter (z. B. Temperaturfeld, Ionenkonzentrationen, Behälterwandstärken etc.). Sie können auf deterministischen oder probabilistischen Ansätzen beruhen. Beide Ansätze haben Vor- und Nachteile für die Prognose einer Systementwicklung und für die Interpretation der Ergebnisse. Während deterministische Nachweise im Rahmen ihrer Annahmen exakte Aussagen erlauben und z. B. auch der Einfluss von Unsicherheiten in verschiedenen Rechengrößen genau quantifizierbar ist, sind sie auf vereinfachende Modelle und Annahmen beschränkt, die analytisch lösbare mathematisch-physikalische Probleme ergeben. Numerische Berechnungen können auch komplexere Wechselwirkungen abbilden, sind aber ebenfalls auf vereinfachende Modellannahmen angewiesen. Probabilistische Berechnungen können auch in komplexen Systemen eine große Menge an Parametern mitsamt deren Variationen verarbeiten und so die Entwicklung realistischerer Systemmodelle abbilden. Allerdings sind diese Berechnungen sehr aufwendig und benötigen überdies viele Iterationen, um anhand von Parametervariationen statistische Einflüsse von Ungenauigkeiten in den Eingangsparametern auf die Systementwicklung zu ermitteln. Für jeweils zu betrachtende Problemstellungen ist es daher notwendig, im Vorfeld abzuwägen, welcher Ansatz zu wählen ist.

Experimentelle Verfahren umfassen einerseits Versuche und Messungen an Modellen oder Probekörpern zur Gewinnung von Daten zum Systemverhalten, die dann wiederum in theoretischen Nachweisen Verwendung finden. Andererseits sind hier auch Versuche und Messungen an Originalkomponenten und -behältern einzuordnen, die unmittelbar einer sicherheitstechnischen Nachweisführung dienen. Schließlich dienen experimentell gewonnene Erkenntnisse der gezielten Validierung theoretisch hergeleiteter Nachweise, deren Ergebnisse wiederum zur Präzisierung der Nachweisführung mittels modifizierter Simulationen und/oder Experimente beitragen. Auf experimentellen Ergebnissen beruhende Simulationen von Endlagersystemen über lange Zeiträume dienen als Grundlage sowohl der Endlagerkonzeption als auch der Sicherheitsnachweise für das Endlager (/NWMO 2015/, /NWMO 2016/, /SKB 2005/, /SKB 2006/). Die insgesamt durchgeführten Versuche, Messungen und Simulationen kann man zusammen mit weiteren Vorgängen in a-priori-Maßnahmen und a-posteriori-Maßnahmen unterteilen, die sich ebenfalls ergänzen.

A-priori-Maßnahmen umfassen in der konzeptionellen und konstruktiven Auslegung der Behälter und Behälterkomponenten sowie in der Fertigung getroffene Vorkehrungen, um die qualitative und quantitative Erfüllung der an die Endlagergebinde gestellten Anforderungen zu gewährleisten. So hat die Auslegung der Endlagergebinde und ihrer Komponenten nach anerkannten Standards zu erfolgen, um deren strukturelle Integrität über die geforderten Zeiträume belastbar begründen zu können /ESK 2017/. Schließlich gewährleistet erst die ständige Qualitätskontrolle im gesamten Fertigungsprozess die – innerhalb einer engen Fehlerspanne – qualitative und quantitative Übereinstimmung der serienmäßig hergestellten Behälter mit der qualifizierten Behälterbauart und damit die durchgängige Erfüllung der an sie gestellten Anforderungen.

Als a-posteriori-Maßnahmen können zerstörende oder nicht-zerstörende Nachweise an speziell gefertigten maßstäblichen Modellen oder Prototyp-Behältern der beabsichtigten Bauart angesehen werden. Durch die Messung des Behälter- und Komponentenverhaltens unter spezifischen Lasten liefern diese den experimentellen Nachweis einer Lastverträglichkeit und können somit die Erfüllung der getesteten Anforderung(en) unter spezifischen Einwirkungen im Versuch bestätigen. Zerstörungsfreie Prüfverfahren an gefertigten Behältern sowie die Qualitätskontrolle während Beladung, Transport und Einlagerung der Behälter sind weitere Aspekte der Nachweisführung /ESK 2017/.

Zum Nachweis der langfristigen Robustheit von technischen Barrieren mit Sicherheitsfunktion sind verlässliche Prognosen für die Entwicklung des Endlagersystems und der sicherheitsrelevanten Systemkomponenten erforderlich. Das Langzeitverhalten des Endlagers ist unter anderem hinsichtlich des Behälterverhaltens, der Mobilisierung von Radionukliden und eventueller radiologischer Konsequenzen anhand numerischer Simulationen zu analysieren. Explizit gefordert sind deterministische Berechnungen auf Grundlage einer möglichst realitätsnahen Modellierung z. B. anhand von Medianwerten der Eingangsparameter mit dem Ziel einer Darstellung und Analyse des Systemverhaltens, einer Ableitung von Anforderungen an Systemkomponenten und einer Optimierung des Endlagersystems. Unsicherheits- bzw. Sensitivitätsanalysen sollen den Lösungsraum des anzunehmenden Systemverhaltens aufzeigen. Während des Einlagerungsbetriebes sind die in diesen Sicherheitsnachweisen ermittelten Ergebnisse durch ein Kontroll- und Beweissicherungsprogramm zu überprüfen /BMU 2010/.

7.4 Konsequenzen aus der Forderung nach Bergbarkeit der Behälter

Eine Bergbarkeit der Endlagerbehälter bzw. -gebäude für einen Zeitraum von bis zu 500 Jahren nach Verschluss des Endlagerbergwerkes erfordert die Erfüllung wesentlicher Schutzfunktionen des Behälters über die Betriebsphase des Endlagers hinaus und unter Berücksichtigung der spezifischen Beanspruchungsbedingungen des gewählten Endlagers. Die dazu notwendige Sicherheitsbewertung muss auf Grundlage der aktuellen Wissensbasis und unter Einbeziehung des aktuell bekannten oder noch zu untersuchenden Verhaltens und der Eigenschaften der Behälterinventare und Behälterkomponenten insbesondere hinsichtlich Freisetzungspotenzialen und Kritikalitätssicherheit erfolgen. Von zentraler Bedeutung für die Gewährleistung der Bergbarkeit der Behälter ist die in den Empfehlungen der Endlagerkommission formulierte Forderung nach einem „*intakten Zustand der Behälter*“ /KDRS 2016/. Damit müssen die wesentlichen Schutzfunktionen des Behälters auch für den Fall einer Bergung, ggf. im Zusammenwirken mit im Zuge der Bergungstätigkeit mitgeführten technischen Hilfsmitteln, wie z. B. Transfer- oder Abschirmbehältern, gegeben sein. Für die Bergbarkeit des Behälters ist der ungünstigste Behälterzustand nach 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers zu betrachten, zuzüglich der Standzeit des „ältesten“ Behälters im zuerst verfüllten Einlagerungsbereich bis zum vollendeten Verschluss des Endlagers. Im Entwurf der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung ergibt sich durch die Verlagerung des Beginns der Bergbarkeitsphase vom vollendeten Verschluss des Endlagerbergwerkes auf den Beginn der Stilllegungsarbeiten diesbezüglich keine Änderung /BMU 2020/. Die Sicherheitsfunktionen der Behälter müssen soweit gewährleistet werden, dass das eingesetzte Personal nicht gefährdet wird. Ausdrücklich muss für wahrscheinliche Entwicklungen die „*Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole zu beachten*“ /BMU 2010/. Diese Forderung wird für *zu erwartende Entwicklungen* im Entwurf der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung aufgegriffen /BMU 2020/.

Hinsichtlich sicherem Einschluss, Behälterintegrität und Handhabbarkeit sind neben den auf die Behälter einwirkenden statischen und dynamischen Lasten vor allem äußere korrosive Einwirkungen durch das jeweilige Endlagermedium zu berücksichtigen. Zu beachten sind unterschiedliche Korrosionsarten wie u. a. aerobe und anaerobe Korrosion, Flächenkorrosion und lokale Schädigungen (Lochfraß), Spannungsrisskorrosion, mikrobiell induzierte Korrosion bzw. Korrosion infolge von Sulfiden in Abhängigkeit von Behälterwerkstoff, Wirtsgestein, Verfüllmaterial und Dauer der Lagerung. Hinzu kommen die Einwirkungen auf den Behälter durch die Errichtung eines neuen Bergwerkes zur Bergung der Behälter im direkten Umfeld der Einlagerungsbereiche. Diese untertägigen Arbeiten entsprechen im Wesentlichen der Errichtung des Endlagerbergwerkes selbst vor bzw. während der Betriebsphase des Endlagers.

Ggf. können im Hinblick auf eine sichere Handhabung bei einer Bergung auf der Grundlage eines bezüglich des aerosoldichten Einschlusses stabilen Behälterzustands zusätzliche Handhabungstechniken auch erst im Zuge der Bergung zum Einsatz gebracht werden, falls ursprünglich vorhandene Anschlagelemente der Behälter (z. B. Tragzapfen) nicht mehr funktionstüchtig sein sollten. Im Entwurf der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung wird in

§ 14 Abs. 2 Nr. 1 EndlSiAnfV für die Endlagergebinde neben der Verhinderung von Aerosolfreisetzung auch die für eine Handhabung ausreichende mechanische Stabilität der Gebinde gefordert /BMU 2020/.

Unterkritikalität muss für alle wahrscheinlichen oder weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems gewährleistet sein /BMU 2010/. Nach § 8 Abs. 1 EndlSiAnfV überträgt sich dieser Nachweis auf zu erwartende und abweichende Entwicklungen im Nachweiszeitraum /BMU 2020/. Da diese Funktion im Wesentlichen dem Endlagergebinde selbst zufällt (Beladung/ Geometrie/ Moderatorordichte unter ungünstigsten Bedingungen), ist für alle nicht unwahrscheinlichen Entwicklungen der unterkritische Zustand bei der Bergung der Endlagergebinde nachzuweisen. Der Eintritt einer Kritikalität ist, wenn nicht absolut auszuschließen, auf jeden Fall als unwahrscheinliche Entwicklung zu betrachten, so dass eine Bergung kritischer Anordnungen aus tiefen geologischen Formationen nicht in Betracht zu ziehen ist.

Hinsichtlich des Arbeitsschutzes und des Strahlenschutzes sind die Strahlendosisleistung und die Temperatur an der Behälteroberfläche bzw. die Umgebungstemperatur des umliegenden Wirtsgesteines mit den darin enthaltenen (Wärme entwickelnden) Einlagerungsfeldern durch die Auslegung der Behälter und ggf. durch zusätzliche technische Maßnahmen (Abschirm- oder Transferbehälter, Bewetterung, Fernhantierung) auch bei einer Bergung zu begrenzen. Für die Bewertung des Temperatur- und Strahlungsfeldes im Endlagerbereich ist zu beachten, dass die von den eingelagerten radioaktiven Abfällen emittierte ionisierende Strahlung exponentiell mit der Zeit abnimmt, die Temperatur aber nach der Einlagerung der Endlagergebinde und dem Verschluss der Einlagerungsbereiche zunächst aufgrund der geringeren Wärmeabfuhr ansteigt, ehe sie über lange Zeiträume wieder sinkt. Daher sind bei einer Bergung insbesondere bei einem frühen Bergungszeitraum gegenüber der Einlagerungsphase ggf. erhöhte Temperaturen der Behälter zu berücksichtigen.

Eine besondere Herausforderung stellt sich für modulare Einlagerungskonzepte mit dünnwandigen Endlagerbehältern aufgrund der für solche nicht-robusten Systeme nur schwer nachweisbaren Erhaltung einer strukturellen Integrität während eines Bergbarkeitszeitraumes von 500 Jahren. Im Abschlussbericht der Endlagerkommission /KDRS 2016/ wird die Bergbarkeit von Behältern in Bohrlochlagerung über einen Zeitraum von 500 Jahren „*mit heutigen Kenntnissen als nicht machbar eingestuft*“.

Ein möglicherweise zu präzisierender Punkt in den Sicherheitsanforderungen an die Behälter betrifft die Gewährleistung einer Handhabbarkeit und die Vermeidung einer Aerosolfreisetzung für den Zeitraum einer möglichen Bergung nur *für wahrscheinliche Entwicklungen* /BMU 2010/, da dies impliziert, dass für weniger wahrscheinliche Entwicklungen die Gewährleistung dieser Schutzfunktionen nicht nachgewiesen werden muss. Da die Möglichkeit einer Bergung nach dem Verschluss des Endlagerbergwerkes als Notfallmaßnahme eingeführt worden ist /BMU 2010/, und (gerade) auch weniger wahrscheinliche Entwicklungen die Möglichkeit in sich tragen, eine Notfallmaßnahme notwendig werden zu lassen, erscheint es angebracht, die Grundbedingungen für eine Bergbarkeit der Behälter (aerosoldichter Einschluss und Handhabbarkeit) auch für weniger wahrscheinliche Entwicklungen zu fordern. Die Anforderung der Bergbarkeit selbst gilt unabhängig von Wahrscheinlichkeitsklassen /StandAG 2017/ und damit konservativ implizit für alle möglichen Entwicklungen.

Auch im Entwurf der neuen Endlagersicherheitsanforderungsverordnung sind Vorkehrungen zur Ermöglichung einer Bergung der Endlagergebinde lediglich für die zu erwartenden Entwicklungen des Endlagersystems zu treffen /BMU 2020/. Auch hier werden die neben die zu erwartenden Entwicklungen gestellten *abweichenden* Entwicklungen nicht berücksichtigt. Beide Klassen zusammen umfassen nach § 3 Abs. 1 EndLSiAnfV die *relevanten möglichen Entwicklungen*. Hierbei stellt sich die Frage, inwieweit möglicherweise auch über die abweichenden Entwicklungen hinausgehende hypothetische Entwicklungen, die dezidiert „dem Systemverständnis dienen“ (Anlage A EndLSiAnfV), in den Betrachtungen zu berücksichtigen sind.

Entsprechende Betrachtungen und Nachweise hinsichtlich dichtem Einschluss und Handhabbarkeit sind auch bereits für das Konzept der Rückholung für Zeiträume von voraussichtlich mehreren Jahrzehnten anzustellen, sodass dieses Wissen als Grundlage für entsprechende Betrachtungen zur Bergbarkeit über bis zu 500 Jahre dienen kann. Ein entsprechend robustes Behälterdesign vorausgesetzt sollten somit auch belastbare Nachweise zur Machbarkeit einer Bergung prinzipiell möglich sein, wenngleich ein Nachweiszeitraum von 500 Jahren zzgl. der vorhergehenden Einlagerungsphase für technische Produkte wie derartige Endlagerbehälter eine außerordentliche Herausforderung hinsichtlich der Prognose des langfristigen Material- und Bauteilverhaltens unter gegebenen komplexen Beanspruchungsrandbedingungen darstellt. Hinsichtlich des Bergungszeitraumes von 500 Jahren ist davon auszugehen, dass die bislang diskutierte Nachweisführung einen entsprechenden Zeitraum bis zur Bergung des letzten Behälters abdeckt. Insofern muss unterstellt werden, dass eine Bergungsentscheidung so rechtzeitig erfolgt, dass der erforderliche Zeitraum für Planung, Konzeption, Genehmigung Errichtung und Betrieb des Bergungsbergwerkes bis zur Verbringung aller Endlagergebinde nach Übertage innerhalb der 500 Jahre liegt. Andernfalls müsste die sicherheitstechnische Nachweisführung um einen entsprechenden Zeitraum erweitert werden.

7.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen zur Bergbarkeit

Die für Endlagerbehälter bzw. -gebinde für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle bestehenden Sicherheitsanforderungen wurden bereits umfassend diskutiert und bezüglich der resultierenden Anforderungen an zukünftige Endlagerbehälter ausgeführt /BMU 2010/ bis /ESK 2017/. Die Einhaltung der generisch beschriebenen Sicherheitsanforderungen ist für spezifische Endlagerkonzepte jeweils im Einzelnen nachzuweisen. Kernpunkt ist hierbei die Erfüllung der wesentlichen Sicherheitsfunktionen – Abschirmung, sicherer Einschluss, Unterkritikalität und Wärmeabfuhr – durch das Endlagersystem, bestehend aus technischen Barrieren (Endlagergebinde), geotechnischen Barrieren (z. B. *buffer*, Verschlussbauwerke) und geologischen Barrieren (einschlusswirksamer Gebirgsbereich). Insbesondere in Endlagerkonzepten mit einem ausgewiesenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich kommt diesem eine bedeutende Rolle hinsichtlich des geologisch langfristig sicheren Einschlusses der eingebrachten Radionuklide zu.

Die Forderung nach einer Bergbarkeit des radioaktiven Inventars, d. h. aller Endlagergebinde innerhalb der ersten 500 Jahre der Nachverschlussphase, stellt im Gegensatz dazu einen Eingriff in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich dar, wodurch dessen Einschlussfunktion auf jeden Fall beeinträchtigt wird. Gleichzeitig werden Anforderungen an die Sicherheitsfunktionen

der Endlagerbehälter, insbesondere hinsichtlich des dichten Einschlusses, der Behälterintegrität und der Handhabbarkeit für den gleichen Zeitraum gestellt, die im großtechnischen Maßstab besondere Herausforderungen darstellen und zudem für alle in Frage kommenden Wirtsgesteine gelten, unabhängig davon, welche Einschlussfunktion ggf. bereits von geotechnischen und/oder geologischen Barrieren übernommen wird. Aufgrund der abhängig vom Endlagermedium voranschreitenden Degradation der Behälter, ihrer einschlusswirksamen Komponenten (z. B. Deckeldichtsystem, Schweißnähte, Behälterwand) und Handhabungshilfen (z. B. Tragezapfen, -griffe oder -pilze) ist die gesamte Behälterauslegung auf die Erfüllung der zugewiesenen Schutzfunktionen der Behälter zum letztmöglichen Zeitpunkt einer Bergung auszurichten.

Der für den Nachweis der Bergbarkeit der Behälter definierte Zeitrahmen von bis zu 500 Jahren bedeutet, dass die Bergung des letzten Behälters spätestens 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers erfolgt sein muss, um von diesbezüglichen Nachweisen bzgl. Sicherheitsfunktionen und Handhabbarkeit der Behälter Kredit nehmen zu können. Andersfalls müsste der Zeitraum von der Bergungsentscheidung über die Errichtung des Bergungsbergwerkes bis zum Abschluss der Bergungsarbeiten der erforderlichen Behälterstandzeit hinzugerechnet werden. Hinzu kommt zur nachzuweisenden Behälterstandzeit in jedem Fall die Berücksichtigung der vorangegangenen Einlagerungsphase von der Einlagerung des ersten Behälters bis zum Verschluss des Endlagers.

Für den Behälterzustand zum Zeitpunkt der Bergung sind in den bisherigen Sicherheitsanforderungen des BMU lediglich drei Anforderungen explizit gegeben: der aerosoldichte Einschluss des radioaktiven Inventars für wahrscheinliche Entwicklungen, eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter und die strukturelle Integrität der Gebinde, um eine Bergung mechanisch durchführbar zu machen /BMU 2010/. Diese Formulierung wurde im Entwurf der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (§ 14 Abs. 2 Nr. 1) als eine die Handhabung der Endlagergebäude ermöglichende mechanische Stabilität übernommen /BMU 2020/. Dabei dürfte der explizite Nachweis der strukturellen Integrität bzw. mechanischen Stabilität nach Behälterstandzeiten von mehr als 500 Jahren unter den Bedingungen der auf die Endlagergebäude einwirkenden Prozesse im verfüllten Einlagerungsbereich mit großen Herausforderungen behaftet sein, so dass nach derzeitigem Wissen ausschließlich entsprechend robuste Behälterkonzepte in Frage kommen /KDRS 2016/. Hierbei zeichnet sich, wie in den vorausgehenden Kapiteln beschrieben, ab, dass die aus der Bergbarkeit resultierenden Anforderungen häufig auslegungsbestimmend für das Behälterdesign werden dürften.

Für die nach der Einlagerung am Schutz der sicherheitsrelevanten Eigenschaften der geotechnischen und geologischen Barrieren bemessenen Anforderung an die Begrenzung von Temperatur und Strahlendosisleistung an der Gebindeoberfläche können sich aus der Bergung weitere Anforderungen an das gesamte Endlagersystem ableiten, da davon auszugehen ist, dass z. B. für den Schutz des eingesetzten Personals zulässigen Temperaturgrenzwerte im umliegenden Wirtsgestein auch für den Beginn der Bergbarkeitsphase (unmittelbar nach Verschluss des Endlagerbergwerkes) gefordert sind.

Nachweise zur Unterkritikalität, geeignete Materialwahl und die Vermeidung der Schädigung weiterer Barrieren werden im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises für den gesamten

Nachweiszeitraum erbracht und decken somit den Bergbarkeitszeitraum ab. Der Nachweis der Identifizierbarkeit ist bei einer Handhabbarkeit gewährleistenden Konzept nachgeordnet.

Die sich aus den Sicherheitsanforderungen des BMU von 2010 ergebenden Fragestellungen hinsichtlich des Nachweises der Bergbarkeit nicht nur für wahrscheinliche, sondern auch für weniger wahrscheinliche und unwahrscheinliche Entwicklungen /BMU 2010/ verlagert sich beim Entwurf der neuen Endlagersicherheitsanforderungsverordnung /BMU 2020/ auf die Frage nach zu treffenden Vorkehrungen für die Ermöglichung einer Bergung eingelagerter Endlagergebinde nicht nur für zu erwartende Entwicklungen, sondern auch für abweichende bzw. mögliche Entwicklungen /BMU 2020/. Dies ist insofern bedeutend, als eine Bergungsentcheidung tendenziell eher auf letztere zurückgehen dürfte. Weiterhin ist zu klären, welche Vorgaben und Bewertungskriterien für den Nachweis der Bergbarkeit anzusetzen sind.

8 Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht wurden die Anforderungen an Endlagerbehälter für Endlager für hochradioaktive Abfälle für die Wirtsgesteine Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein, systematisch hergeleitet.

In einem ersten Schritt wurde dazu auf Basis der aktuell gültigen rechtlichen Regelungen und Rahmenbedingungen eine generische Übersicht der Anforderungen an Endlagerbehälter erstellt. Dazu wurden die Schutzfunktionen des Behälters in ihrer zeitlichen Abhängigkeit aus den Regelwerken abgeleitet und die in den jeweiligen Nutzungsphasen zu berücksichtigenden Einwirkungen beschrieben.

Im nächsten Schritt wurde die generische Übersicht der zeitlichen Abhängigkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagerbehälters weiter spezifiziert. Dazu wurden bereits erstellte Sicherheits- und Nachweiskonzepte für Endlager für hochradioaktive Abfälle berücksichtigt. Für das Wirtsgestein Steinsalz waren dies die Ergebnisse der VSG und für Tonstein die Ergebnisse des FuE-Vorhabens ANSICHT. Für Kristallingestein wurde bislang noch kein Sicherheits- und Nachweiskonzept erstellt. Dazu wurde zunächst auf im FuE-Vorhaben KONEKD erstellte Endlagerkonzepte zurückgegriffen. Durch die Berücksichtigung der Sicherheits- und Nachweiskonzepte konnte eine wirtsgesteinsspezifische zeitliche Abhängigkeit der Behälterfunktionen erstellt werden.

Anschließend wurden die für den Behälter maßgeblichen Funktionen – Einschluss des radioaktiven Inventars, Abschirmung ionisierender Strahlung, Temperaturbeschränkung, Kritikalitätsausschluss, Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion und Handhabbarkeit – quantifiziert. Hier wurden jeweils Vorschläge erarbeitet, wie diese Funktionen quantifiziert werden können.

Im weiteren Schritt sollten auch die zur Auslegung relevanten Einwirkungen quantifiziert werden. Diese konnten nicht mehr generisch oder rein wirtsgesteinsspezifisch quantifiziert werden, es musste direkt auf beispielhafte Endlager- und Behälterkonzepte zurückgegriffen werden. Dabei wurden folgende Endlager- und Behälterkonzepte betrachtet:

- Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern im Steinsalz
- vertikale Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen im Steinsalz
- direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern im Steinsalz
- Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern im Tonstein
- vertikale Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen im Tonstein
- modifiziertes KBS-3-Konzept im Kristallingestein
- multipler ewG Konzept im Kristallingestein
- überlagernder ewG Konzept im Kristallingestein

Hierbei zeigte sich der unterschiedliche Entwicklungsstand für die drei in Deutschland in Betracht zu ziehenden Wirtsgesteine. Für Steinsalz sind die Endlagerkonzepte im Rahmen von

Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des BMWi weit fortgeschritten. Außerdem waren technische Auslegungen und Entwicklungsarbeiten zu konkreten Endlagerbehältern bereits durch die kerntechnische Industrie erfolgt. Daher ließ sich hier ein breites Spektrum an Einwirkungen für Endlagerbehälter ableiten. Für Tonstein und Kristallin sind vergleichbare Entwicklungsarbeiten noch nicht so weit fortgeschritten. Viele angegebene Einwirkungen basieren deshalb auf beispielhaften Annahmen aus Forschungsvorhaben oder mussten aus vergleichbaren Endlagerkonzepten in anderen Wirtsgesteinen übernommen werden. Zudem konnten viele Einwirkungen nur für generische Modellstandorte erfasst werden.

Bei der systematischen Herleitung von Behälteranforderungen im Vorhaben KoBrA hat sich folgendes gezeigt:

- Aus den regulatorischen Rahmenbedingungen ergeben sich grundlegende Behälteranforderungen. Diese sind bei der Erstellung von Sicherheits- und Nachweiskonzepten zu spezifizieren und zu quantifizieren
- Im Rahmen der Sicherheits- und Nachweiskonzepte sind unter Berücksichtigung der Einlagerungsbedingungen quantifizierte Bewertungskriterien, z. B. Ortsdosisleistungen oder Dichtheitskriterien, für die Endlagergebinde zu definieren
- Einwirkungen auf Endlagerbehälter sind Endlagerkonzept- und Standortabhängig und müssen im Rahmen der Konzeptentwicklung und Standorterkundung ermittelt und quantifiziert werden
- Ermittelte Einwirkungen sind auf ihre Auslegungsrelevanz zu prüfen
- Anforderungen aus Rückholung und vor allem aus Bergung werden für Endlagerbehälter auslegungsrelevant sein

9 Abkürzungsverzeichnis

a	Jahre
ADR	Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route)
A ₂	Aktivitätswert
ALZ	Auflockerungszone
BE	Brennelement
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BSK	Brennstabkille
°C	Grad Celsius
cm	Zentimeter
CSD-B	Colis standard des déchets boues
CSD-C	Colis standard des déchets compactés
CSD-V	Colis standard des déchets vitrifiés
DWK	Deutsche Gesellschaft zur Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen
DWR	Druckwasserreaktor
ewG	einschlusswirksamer Gebirgsbereich
g	Erdbeschleunigung
Gy	Gray
Gy/h	Gray pro Stunde
HAW	Hochradioaktiver Abfall (Highly Active Waste)
IAEA	Internationale Atomenergieorganisation (International Atomic Energy Agency)
ICRP	Internationale Strahlenschutzkommission (International Commission on Radiological Protection)
KBS	schwedisch: kärnbränslesäkerhet
kg	Kilogramm
kg/m ³	Kilogramm pro Kubikmeter
km/h	Kilometer pro Stunde
kN	Kilonewton
kPa	Kilopascal
Kr-85	Krypton-85
kW	Kilowatt
m	Meter
Mg	Megagramm
MgCl ₂	Magnesiumchlorid
mm	Millimeter
m/min	Meter pro Minute
mol/l	Mol pro Liter
MOX	Mischoxid
MPa	Megapascal
m/s	Meter pro Sekunde
m/s ²	Meter pro Quadratsekunde
mSv/a	Millisievert pro Jahr
mSv/h	Millisievert pro Stunde

$\mu\text{m/a}$	Mikrometer pro Jahr
$\mu\text{Sv/a}$	Mikrosievert pro Jahr
NaCl	Natriumchlorid
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
n/cm^2	Neutronen pro Quadratzentimeter
nm/a	Nanometer pro Jahr
NWMO	Nuclear Waste Management Organization
RK	Rückholbare Kokille
RSK	Reaktor-Sicherheitskommission
SKB	Svensk Kärnbränslehantering Ab
StandAG	Standortauswahlgesetz
STEV	Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung
SWR	Siedewasserreaktor
TFB	Transferbehälter
TSS	Thermische Simulation Streckenlagerung
UO_2	Uranoxid
VSG	Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben
WENRA	Western European Nuclear Regulators Association
WWER	Druckwasserreaktor russischer Bauart

10 Literatur

- /AtG 2017/ Atomgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 2 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist
- /BAM 2020/ Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Nationaler und Internationaler Stand zu bereits existierenden Anforderungen und Konzepten für Endlagerbehälter und Zusammenstellung sicherheitsrelevanter Behältereigenschaften, FuE-Vorhaben KoBrA, Bericht zum Arbeitspaket 1, Berlin, 2020
- /BAMBUSII 2004/ BAMBUS II Project, Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt, Final Report, EUR 20621, 2004
- /BbergG 2017/ Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), das durch Artikel 2 Absatz 4 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist
- /BFE 2019/ Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit, Ressortforschungsberichte zur Sicherheit der nuklearen Entsorgung, Untersuchungen zu den "maximal physikalisch möglichen Temperaturen" gemäß § 27 StandAG im Hinblick auf die Grenztemperatur an der Außenfläche von Abfallbehältern, Vorhaben 4717E03241, BfE-RESFOR-003/19, Salzgit-ter, 2019
- /BGETEC 2020/ BGE TECHNOLOGY GmbH, Behälterrelevante Randbedingungen und Beanspruchungen in den drei potenziellen Wirtsgesteinen Salz, Tonstein und Kristallin, FuE-Vorhaben KoBrA, Bericht zum Arbeitspaket 2, BGE TEC 2018-12, Peine, 2020
- /BGR 2013/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Endlagerstandortmodell Nord (ANSICHT), Teil I: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells, Hannover, 2013
- /BGR 2016a/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Endlagerstandortmodell SÜD (ANSICHT), Teil II: Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis, Hannover, 2016
- /BGR 2016b/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Endlagerstandortmodell SÜD (ANSICHT), Teil I: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells, Hannover, 2016
- /BMU 2010/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2010). Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickeln-der radioaktiver Abfälle, Bonn, 30. September 2010

- /BMU 2020/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Nukleare Sicherheit (BMU) (2019). Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung – EndlSiAnfV) (Bearbeitungsstand: 06.04.2020)
- /DBE 1994/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, Simulation des Schachttransports, Abschlussbericht, Hauptband, DEAB T 41, Peine, 1994
- /DBE 1995/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, Handhabungsversuche zur Streckenlagerung, Abschlussbericht, Hauptband, DEAB T 60, Peine, 1995
- /DBETEC 2004/ DBE TECHNOLOGY GmbH, Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein, FuE Vorhaben Geist, Abschlussbericht, Hauptband, Peine, 2004
- /DBETEC 2006/ DBE TECHNOLOGY GmbH, Komponentenbeschreibung Einlagerungsvorrichtung BSK-3, 2006, unveröffentlicht
- /DBETEC 2008a/ DBE TECHNOLOGY GmbH, Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW, AP 1.2 – Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars, FuE Vorhaben ISIBEL, TEC-20-2008-AP, Peine, 2008
- /DBETEC 2008b/ DBE TECHNOLOGY GmbH, Untersuchungen zur direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB), AP2: Aspekte zur Beurteilung der Notwendigkeit von Anpassungsmaßnahmen an die TLB für die Endlagerung, Peine, 2008
- /DBETEC 2008c/ DBE TECHNOLOGY GmbH, Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW, AP5: Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren, FuE Vorhaben ISIBEL, TEC-15-2008-AP, Peine, 2008
- /DBETEC 2010a/ DBE TECHNOLOGY GmbH, Optimization of the Direct Disposal Concept by Emplacing SF Canisters in Boreholes, Final Report, TEC-10-2009-AB, Peine, 2010
- /DBETEC 2010b/ DBE TECHNOLOGY GmbH, Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein, FuE Vorhaben ERATO, TEC-28-2008-AB, Peine, 2010

- /DBETEC 2012/ DBE TECHNOLOGY GmbH, DIREGT II, Konzeptplanung des Strecken-transportes und der Einlagerung unter Tage für Transport und Lager-behälter bis 160 Mg, Peine, 2012
- /DBETEC 2014a/ DBE Technology GmbH, DIREGT III, Schachtfördertechnik für die Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern bis 160 Mg, Peine, 2014
- /DBETEC 2014b/ DBE Technology GmbH, DIREGT III, Einlagerungstechnik für die Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern bis 160 Mg, Peine, 2014
- /DBETEC 2015a/ DBE Technology GmbH, Endlagerkonzept sowie Verfüll und Verschluss-konzept für das Endlagerstandortmodell SÜD, FuE Vorhaben ANSICHT, Technischer Bericht, TEC-26-2015-TB, Peine, 2015
- /DBETEC 2015b/ DBE Technology GmbH, Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschluss-konzept für das Endlagerstandortmodell NORD, FuE Vorhaben AN-SICHT, TEC-14-2015-TB, Peine, 2015
- /DBETEC 2015c/ DBE Technology GmbH, Quantifizierung von Kriterien für Integritätsnach-weise im Tonstein, FuE Vorhaben ANSICHT, TEC-08-2013-AP, Peine, 2015
- /DBETEC 2016a/ DBE Technology GmbH, Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung ei-ner Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme-ent-wickeln- de radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland, FuE Vorhaben CHRISTA, TEC-20-2016-AB, Peine, 2016
- /DBETEC 2016b/ DBE Technology GmbH, Gutachten, Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickeln- de, hoch radioaktive Abfälle, 2016
- /DBETEC 2017a/ DBE Technology GmbH, Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickeln- de Abfälle und ausge- diente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland, FuE-Vorhaben KONEKD, TEC-20-2017-AB, Peine, 2017
- /DBETEC 2017b/ DBE Technology GmbH, Projekt ANSICHT, Sicherheits- und Nachweis- methodik für ein Endlager im Tongestein in Deutschland, Synthesebe- richt, TEC-19-2016-AB, Peine, 2017
- /Den Hartog 1999/ H. W. den Hartog, D. Vainshtain, V. Dubinko, A. Turkin, V. Gann und J. Jacobs, „Radiation Damage in NaCl. Retrievability - Smart Backfill Materials - Monitoring. Final Report (CORA Research Project),“ State University of Groningen, Groningen, 1999.
- /DWK 1986/ Deutsche Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen mbH, Planungsvorgaben zum POLLUX-Behälter, DWK, Hannover, 1986

- /ESK 2017/ Entsorgungskommission (ESK), Anforderungen an Endlagergebinde zur Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle, Empfehlung der Entsorgungskommission vom 17.03.2016 – redaktionell überarbeitete Fassung vom 20.01.2017
- /EURATOM 2009/ RICHTLINIE 2009/71/EURATOM DES RATES vom 25. Juni 2009 über einen Gemeinschaftsrahmen für die nukleare Sicherheit kerntechnischer Anlagen
- /FZJÜL 1998/ Forschungszentrum Jülich, Wasserstoffbildung durch Metallkorrosion, JÜL-3495, Jülich, 1998
- /FZJÜL 1999/ Forschungszentrum Jülich, Referenzkonzept zur direkten Endlagerung von abgebrannten HTR-Brennelementen in CASTOR THTR/AVR Transport- und Lagerbehältern, Abschlussbericht, JÜL-3734, Jülich, 1999
- /FZKA 1999/ Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für nukleare Entsorgungstechnik: Corrosion Evaluation of Metallic Materials for Long-Lived HLW/Spent Fuel Disposal Containers, FZKA 6285, Karlsruhe, 1999
- /FZKA 2001/ Arbeitskreis "HAW-Produkte", Stellungnahme Nr. 4, Abstand zwischen Zentraltemperatur eines HAW-Glasproduktes und der Transformations-temperatur T_g , 1990; in: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für nukleare Entsorgung, Endlagerrelevante Eigenschaften von hochradioaktiven Abfallprodukten, Charakterisierung und Bewertung, Empfehlungen des Arbeitskreises HAW-Produkte, FZKA 6651, Karlsruhe, 2001
- /FZKA 2003/ Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für nukleare Entsorgung: Long-Term Performance of Candidate Materials for HLW/Spent Fuel Disposal Containers, 2. Annual Progress Report (11/2001-10/2002), FZKA 6809, Karlsruhe, 2003
- /GRS 2011a/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzepts, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Bericht zum Arbeitspaket 4, GRS-271, Braunschweig, 2011
- /GRS 2011b/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Endlagerkonzepte, Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Köln, 2011
- /GRS 2011c/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Microbial Processes for Longterm Performance of Radioactive Waste Repositories in Clays, GRS-291, Braunschweig, 2011

- /GRS 2012a/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Sicherheits- und Nachweiskonzept, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Bericht zum Arbeitspaket 4, GRS-277, Braunschweig, 2012
- /GRS 2012b/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Endlagerauslegung und Optimierung, Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-281, Köln, 2012
- /GRS 2014/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, Sicherheitskonzept und Nachweisstrategie, GRS-338, Braunschweig, 2014
- /IAEA 1997/ Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA, 24 December 1997
- /IAEA 2011a/ IAEA SAFETY STANDARDS SERIES No. SSR-5, DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE, SPECIFIC SAFETY REQUIREMENTS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA, 2011
- /IAEA 2011b/ IAEA SAFETY STANDARDS SERIES No. SSG-14 GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITIES FOR RADIOACTIVE WASTE, SPECIFIC SAFETY GUIDE, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA, 2011
- /ICRP 2013/ Radiological protection in geological disposal of long-lived solid radioactive waste. ICRP Publication 122. Ann. ICRP 42(3)
- /KDRS 2016/ Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Kommissionsdrucksache 268, 2016
- /KfK 1990/ Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Corrosion Testing of Selected Packaging Materials for Disposal of High-Level Waste Glass in Rock Salt Formations, KfK 4723, Karlsruhe, 1990
- /KfK 1992/ Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Corrosion Studies on Selected Packaging Materials for Disposal of Heat-Generating Radioactive Wastes in Rock-Salt Formations, KfK 5011, Karlsruhe, 1992
- /KfK 1993/ Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, General Corrosion and Stress Corrosion Cracking Studies on Carbon Steels for Application in Nuclear Waste Disposal Containers, KfK 5166, Karlsruhe, 1993
- /KfK 1994/ Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Materialverhalten unter Bestrahlung, KfK 5043, Karlsruhe, 1994

/KIT 2017/	Bernhard Kienzler, F&E-Arbeiten zur Korrosion von Endlager-Behälterwerkstoffen im INE, KIT-SR-7729, Karlsruhe, 2017
/Kremer 2017/	E.P. Kremer, Durability of the Canadian Used Fuel Container, IHLRWM 2017, Charlotte, NC, 2017
/KTA 1988/	Kerntechnischer Ausschuss, Sicherheitstechnische Regel des KTA, Reaktorsicherheitsbehälter aus Stahl, Teil 1: Werkstoffe und Erzeugnisformen, KTA 3401.1, Fassung September 1988
/KTA 2012/	Kerntechnischer Ausschuss, Sicherheitstechnische Regel des KTA, Lastanschlagspunkte an Lasten in Kernkraftwerken, KTA 3905, Fassung 2012-11
/NAGRA 2003/	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Canister Options for the Disposal of Spent Fuel, Technical Report 02-11, Wettingen, 2003
/NAGRA 2008/	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Corrosion of carbon steel under anaerobic conditions in a repository for SF and HLW in Opalinus Clay, Technical Report 08-12, Wettingen, 2008
/NAGRA 2009/	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), A Review of the Possible Effects of Hydrogen on Lifetime of Carbon Steel Nuclear Waste Canisters, Technical Report 09-04, Wettingen, 2009
/NWMO 2015/	Nuclear Waste Management Organization (NWMO), Thermal Modelling of a Mark II Container, NWMO-TR-2015-06, 2015
/NWMO 2016/	Nuclear Waste Management Organization (NWMO), Sixth Case Study: Reference Data and Codes, NWMO-TR-2016-10, 2016
/POSIVA 2012/	POSIVA OY, Canister Design 2012, POSIVA 2012-13, Eurajoki, 2013
/POSIVA 2018/	POSIVA OY, Mechanical design analysis for the canister. Posiva SKB Report 04, POSIVA Oy und SKB, Eurajoki und Stockholm, 2018
/RSK 2005/	Reaktor-Sicherheitskommission (RSK), Gase im Endlager, RSK-Stellungnahme, 2005
/RSK 2006/	Reaktor-Sicherheitskommission (RSK), Strahlenschäden im Steinsalz, RSK-Stellungnahme, 2006

- /SIEMAG 2016/ SIEMAG TECBERG GmbH, Vorstudie zur Entwurfsplanung einer Rückholungsvorrichtung für Endlagerbehälter, 2016, unveröffentlicht
- /SKB 2005/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Probabilistic analysis of canister inserts for spent nuclear fuel, TR-05-19, 2005
- /SKB 2006/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main Report of the SR-Can project, TR-06-09, 2006
- /SKB 2010a/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Design, production and initial state of the canister, TR-10-14, 2010
- /SKB 2010b/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Design analysis report for the canister, TR-10-28, 2010
- /SKB 2010c/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Corrosion calculations report for the safety assessment SR Site, TR 10-66, 2010
- /SKB 2019/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Supplementary Information on canister integrity issues, TR-19-15, 2019
- /SMAILOS 2004/ E. Smailos, Longterm Performance of candidate Materials for HLW/ spent fuel disposal containers, 5th EURATOM FRAMEWORK PRO-GRAMME 1998-2002, CONTAINER CORROSION, 2000-2004, Final Report, 2004
- /Spykman 2018/ G. Spykman, Dry Storage of spent nuclear fuel and high active waste in Germany – Current situation and technical aspects on inventories integrity for a prolonged storage time, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 50, Issue 2, P.313-317, 2018
- /StandAG 2017/ Standortauswahlgesetz vom 05. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. S.2808) geändert worden ist
- /StrlSchG 2017/ Strahlenschutzgesetz vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), das durch Artikel 2 des Gesetzes vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966) geändert worden ist
- /StrlSchV 2018/ Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S.2034, 2036)
- /UNECE 2016/ United Nations Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee, ADR – European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road, Volume 1, New York und Genf, 2016

- /WENRA 2014/ Radioactive Waste Disposal Facilities Safety Reference Levels, WENRA Report, 22 December 2014
- /WHG 2017/ Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. Juli 2017 (BGBl. I S. 2771) geändert worden ist

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Zusammenstellung der grundlegenden Anforderungen und Funktionen eines Endlagerbehälters	10
Tabelle 2-2:	Behälterspezifische Nutzungsphasen des Endlagerbehälters nach den Sicherheitsanforderungen /BMU 2010/ und /BMU 2020/	12
Tabelle 2-3:	Behälterspezifische Nutzungsphasen des Endlagerbehälters nach der ESK Empfehlung /ESK 2017/	12
Tabelle 2-4:	Überblick zur zeitlichen Abhängigkeit der grundlegenden Behälteranforderungen	17
Tabelle 3-1:	Klassifikation relevanter Einwirkungen auf Endlagerbehälter	21
Tabelle 3-2:	Klassifizierung von Einwirkungen während verschiedener Nutzungsphasen	23
Tabelle 4-1:	Übersicht der grundlegenden Behälteranforderungen für die Endlagerung im Wirtsgestein Steinsalz	41
Tabelle 4-2:	Übersicht der grundlegenden Behälteranforderungen für die Endlagerung im Wirtsgestein Tonstein	50
Tabelle 4-3:	Übersicht der grundlegenden Behälteranforderungen für die Endlagerung im Wirtsgestein Kristallin beim modifizierten KBS-3-Konzept	58
Tabelle 4-4:	Übersicht der grundlegenden Behälteranforderungen für die Endlagerung im Wirtsgestein Kristallin für das Konzept des multiplen ewG	61
Tabelle 4-5:	Übersicht der grundlegenden Behälteranforderungen für die Endlagerung im Wirtsgestein Kristallin für das Konzept des überlagernden ewG	66
Tabelle 5-1:	Abtragsraten Innenbehälter POLLUX in verschiedenen Angriffsmitteln /FZJÜL 1999/	77
Tabelle 5-2:	Abtragsraten Außenbehälter POLLUX® in verschiedenen Angriffsmitteln /FZJÜL 1999/	78
Tabelle 5-3:	Tabellarische Übersicht: Statisch-Mechanische Einwirkungen bei der Streckenlagerung im Steinsalz	79
Tabelle 5-4:	Tabellarische Übersicht: Statisch-Mechanische Einwirkungen bei der Streckenlagerung im Steinsalz (Fortsetzung)	80
Tabelle 5-5:	Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen bei der Streckenlagerung im Steinsalz	81
Tabelle 5-6:	Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen bei der Streckenlagerung im Steinsalz (Fortsetzung)	82

Tabelle 5-7:	Tabellarische Übersicht: Thermische Einwirkungen bei der Streckenlagerung im Steinsalz	83
Tabelle 5-8:	Tabellarische Übersicht Materialversprödung durch Strahlung bei der Streckenlagerung im Steinsalz	83
Tabelle 5-9:	Tabellarische Übersicht: Zersetzung von Organika bei der Streckenlagerung im Steinsalz	84
Tabelle 5-10:	Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Wasserstoff bei der Streckenlagerung im Steinsalz	84
Tabelle 5-11:	Tabellarische Übersicht: Korrosion bei der Streckenlagerung im Steinsalz	85
Tabelle 5-12:	Tabellarische Übersicht: Korrosion bei der Streckenlagerung im Steinsalz (Fortsetzung)	86
Tabelle 5-13:	Tabellarische Übersicht: Korrosion bei der Streckenlagerung im Steinsalz (Fortsetzung)	87
Tabelle 5-14:	Tabellarische Übersicht: Korrosion bei der Streckenlagerung im Steinsalz (Fortsetzung)	88
Tabelle 5-15:	Tabellarische Übersicht: Statisch-Mechanische Einwirkungen bei der vertikalen Bohrlochlagerung im Steinsalz	93
Tabelle 5-16:	Tabellarische Übersicht; Statisch-Mechanische Einwirkungen bei der Bohrlochlagerung im Steinsalz (Fortsetzung)	94
Tabelle 5-17:	Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen bei der Bohrlochlagerung im Steinsalz	95
Tabelle 5-18:	Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen bei vertikaler Bohrlochlagerung im Steinsalz (Fortsetzung)	96
Tabelle 5-19:	Tabellarische Übersicht: Thermische Einwirkungen bei vertikaler Bohrlochlagerung im Steinsalz	96
Tabelle 5-20:	Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Strahlung bei vertikaler Bohrlochlagerung im Steinsalz	97
Tabelle 5-21:	Tabellarische Übersicht: Zersetzung von Organika bei vertikaler Bohrlochlagerung im Steinsalz	97
Tabelle 5-22:	Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Wasserstoff bei vertikaler Bohrlochlagerung im Steinsalz	98
Tabelle 5-23:	Tabellarische Übersicht: Korrosion bei vertikaler Bohrlochlagerung im Steinsalz	99
Tabelle 5-24:	Tabellarische Übersicht: Korrosion bei vertikaler Bohrlochlagerung im Steinsalz (Fortsetzung)	100
Tabelle 5-25:	Tabellarische Übersicht: Statisch-Mechanische Einwirkungen bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern	105

Tabelle 5-26:	Tabellarische Übersicht: Statisch-Mechanische Einwirkungen bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (Fortsetzung)	106
Tabelle 5-27:	Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern	107
Tabelle 5-28:	Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (Fortsetzung)	108
Tabelle 5-29:	Tabellarische Übersicht: Thermische Einwirkungen bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern	109
Tabelle 5-30:	Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Strahlung bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern	109
Tabelle 5-31:	Tabellarische Übersicht: Zersetzung von Organika bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern	110
Tabelle 5-32:	Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Wasserstoff bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern	110
Tabelle 5-33:	Tabellarische Übersicht: Korrosion bei der direkten Endlagerung von Transport und Lagerbehältern	111
Tabelle 5-34:	Tabellarische Übersicht: Korrosion bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (Fortsetzung)	112
Tabelle 5-35:	Tabellarische Übersicht: Korrosion bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (Fortsetzung)	113
Tabelle 5-36:	Tabellarische Übersicht: Korrosion bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (Fortsetzung)	114
Tabelle 5-37:	Tabellarische Übersicht: Statisch-Mechanische Einwirkungen bei der Streckenlagerung im Tonstein	121
Tabelle 5-38:	Tabellarisch Übersicht: Statisch-Mechanische Einwirkungen bei der Streckenlagerung im Tonstein (Fortsetzung)	122
Tabelle 5-39:	Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen bei der Streckenlagerung im Tonstein	123
Tabelle 5-40:	Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen bei der Streckenlagerung in Tonstein (Fortsetzung)	124
Tabelle 5-41:	Tabellarische Übersicht: Thermische Einwirkungen bei der Streckenlagerung in Tonstein	125
Tabelle 5-42:	Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Strahlung bei der Streckenlagerung in Tonstein	125

Tabelle 5-43:	Tabellarische Übersicht: Zersetzung von Organika bei der Streckenlagerung in Tonstein	126
Tabelle 5-44:	Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Wasserstoff bei der Streckenlagerung in Tonstein	126
Tabelle 5-45:	Tabellarische Übersicht: Korrosion bei der Streckenlagerung im Tonstein	127
Tabelle 5-46:	Tabellarische Übersicht: Korrosion bei der Streckenlagerung im Tonstein (Fortsetzung)	128
Tabelle 5-47:	Tabellarische Übersicht: Statisch-Mechanische Lasten bei der Bohrlochlagerung in Tonstein	132
Tabelle 5-48:	Tabellarische Übersicht: Statisch-Mechanische Lasten bei der Bohrlochlagerung in Tonstein (Fortsetzung)	133
Tabelle 5-49:	Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Lasten bei der Bohrlochlagerung in Tonstein	134
Tabelle 5-50:	Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen bei Bohrlochlagerung in Tonstein (Fortsetzung)	135
Tabelle 5-51:	Tabellarische Übersicht: Thermische Einwirkungen bei Bohrlochlagerung in Tonstein	135
Tabelle 5-52:	Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Strahlung bei Bohrlochlagerung in Tonstein	136
Tabelle 5-53:	Tabellarische Übersicht: Zersetzung von Organika bei Bohrlochlagerung in Tonstein	136
Tabelle 5-54:	Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Wasserstoff bei Bohrlochlagerung in Tonstein	137
Tabelle 5-55:	Tabellarische Übersicht: Korrosion bei Bohrlochlagerung in Tonstein	138
Tabelle 5-56:	Tabellarische Übersicht: Korrosion bei Bohrlochlagerung in Tonstein (Fortsetzung)	139
Tabelle 5-57:	Abtragsraten für Kupferwerkstoffe bei verschiedenen Chloridgehalten nach /SMAILOS 2004/	143
Tabelle 5-58:	Tabellarische Übersicht: Statisch-Mechanische Einwirkungen beim modifizierten KBS-3-Konzept	145
Tabelle 5-59:	Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen beim modifizierten KBS-3-Konzept	146
Tabelle 5-60:	Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen beim modifizierten KBS-3-Konzept (Fortsetzung)	147
Tabelle 5-61:	Tabellarische Übersicht: Thermische Einwirkungen beim modifizierten KBS-3-Konzept	147

Tabelle 5-62:	Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Strahlung beim modifizierten KBS-3-Konzept	148
Tabelle 5-63:	Tabellarische Übersicht: Zersetzung von Organika beim modifizierten KBS-3-Konzept	148
Tabelle 5-64:	Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Wasserstoff beim modifizierten KBS-3-Konzept	149
Tabelle 5-65:	Tabellarische Übersicht: Korrosion beim modifizierten KBS-3-Konzept	150
Tabelle 5-66:	Tabellarische Übersicht: Korrosion für das modifizierte KBS-3-Konzept (Fortsetzung)	151
Tabelle 5-67:	Tabellarische Übersicht: Korrosion beim modifizierten KBS-3-Konzept (Fortsetzung)	152
Tabelle 5-68:	Tabellarische Übersicht: Korrosion beim modifizierten KBS-3-Konzept (Fortsetzung)	153
Tabelle 5-69:	Tabellarische Übersicht: Statisch-Mechanische Einwirkungen beim multiplen ewG Konzept	157
Tabelle 5-70:	Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen beim multiplen ewG Konzept	158
Tabelle 5-71:	Tabellarische Übersicht: Thermische Einwirkungen beim multiplen ewG Konzept	159
Tabelle 5-72:	Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Strahlung beim multiplen ewG Konzept	159
Tabelle 5-73:	Tabellarische Übersicht: Zersetzung von Organika beim multiplen ewG Konzept	159
Tabelle 5-74:	Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Wasserstoff beim multiplen ewG Konzept	160
Tabelle 5-75:	Tabellarische Übersicht: Korrosion beim multiplen ewG Konzept	161
Tabelle 5-76:	Tabellarische Übersicht: Korrosion beim multiplen ewG Konzept (Fortsetzung)	162
Tabelle 5-77:	Tabellarische Übersicht: Statisch-Mechanische Lasten beim überlagernden wG Konzept	166
Tabelle 5-78:	Tabellarische Übersicht: Statisch-Mechanische Einwirkungen beim überlagernden ewG Konzept (Fortsetzung)	167
Tabelle 5-79:	Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen beim überlagernden ewG Konzept	168
Tabelle 5-80:	Tabellarische Übersicht: Dynamisch-Mechanische Einwirkungen beim überlagernden ewG Konzept (Fortsetzung)	169

Tabelle 5-81:	Tabellarische Übersicht: Thermische Einwirkungen beim überlagernden ewG Konzept	170
Tabelle 5-82:	Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Strahlung beim überlagernden ewG Konzept	170
Tabelle 5-83:	Tabellarische Übersicht: Zersetzung von Organika beim überlagernden ewG Konzept	170
Tabelle 5-84:	Tabellarische Übersicht: Materialversprödung durch Wasserstoff beim überlagernden ewG Konzept	171
Tabelle 5-85:	Tabellarische Übersicht: Korrosion beim überlagernden ewG Konzept	172
Tabelle 5-86:	Tabellarische Übersicht: Korrosion beim überlagernden ewG Konzept (Fortsetzung)	173

Anhang A: Auszüge aus internationalen Regelwerken

Nachfolgend sind grundlegende Anforderungen aus internationalen Regelwerken auszugsweise zusammengestellt.

Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management /IAEA 1997/

CHAPTER 2 SAFETY OF SPENT FUEL MANAGEMENT

ARTICLE 4. GENERAL SAFETY REQUIREMENTS

Each Contracting Party shall take the appropriate steps to ensure that at all stages of spent fuel management, individuals, society and the environment are adequately protected against radiological hazards.

In so doing, each Contracting Party shall take the appropriate steps to:

- (i) ensure that criticality and removal of residual heat generated during spent fuel management are adequately addressed;*

....

- (iv) provide for effective protection of individuals, society and the environment, by applying at the national level suitable protective methods as approved by the regulatory body, in the framework of its national legislation which has due regard to internationally endorsed criteria and standards;*
- (v) take into account the biological, chemical and other hazards that may be associated with spent fuel management;*
- (vi) strive to avoid actions that impose reasonably predictable impacts on future generations greater than those permitted for the current generation;*
- (vii) aim to avoid imposing undue burdens on future generations.*

ARTICLE 7. DESIGN AND CONSTRUCTION OF FACILITIES

Each Contracting Party shall take the appropriate steps to ensure that:

- (i) the design and construction of a spent fuel management facility provide for suitable measures to limit possible radiological impacts on individuals, society and the environment, including those from discharges or uncontrolled releases;*

CHAPTER 3 SAFETY OF RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT

ARTICLE 11. GENERAL SAFETY REQUIREMENTS

Each Contracting Party shall take the appropriate steps to ensure that at all stages of radioactive waste management individuals, society and the environment are adequately protected against radiological and other hazards.

In so doing, each Contracting Party shall take the appropriate steps to:

- (i) ensure that criticality and removal of residual heat generated during radioactive waste management are adequately addressed;*

...

- (iv) provide for effective protection of individuals, society and the environment, by applying at the national level suitable protective methods as approved by the*

- regulatory body, in the framework of its national legislation which has due regard to internationally endorsed criteria and standards;*
- (v) *take into account the biological, chemical and other hazards that may be associated with radioactive waste management;*
 - (vi) *strive to avoid actions that impose reasonably predictable impacts on future generations greater than those permitted for the current generation;*
 - (vii) *aim to avoid imposing undue burdens on future generations.*

ARTICLE 14. DESIGN AND CONSTRUCTION OF FACILITIES

Each Contracting Party shall take the appropriate steps to ensure that:

- (i) *the design and construction of a radioactive waste management facility provide for suitable measures to limit possible radiological impacts on individuals, society and the environment, including those from discharges or uncontrolled releases;*

RICHTLINIE 2009/71/EURATOM DES RATES vom 25. Juni 2009 über einen Gemeinschaftsrahmen für die nukleare Sicherheit kerntechnischer Anlagen /EURATOM 2009/

Artikel 8b Umsetzung des Ziels der nuklearen Sicherheit für kerntechnische Anlagen

- (1) *Im Hinblick auf die Verwirklichung des in Artikel 8a genannten Ziels der nuklearen Sicherheit stellen die Mitgliedstaaten sicher, dass der nationale Rahmen vorschreibt, dass das gestaffelte Sicherheitskonzept, sofern es anwendbar ist, mit dem Ziel angewandt wird, zu gewährleisten, dass*
 - a) *die Auswirkungen extremer externer natürlicher und durch den Menschen verursachter unbeabsichtigter Gefahren auf ein Mindestmaß beschränkt werden;*
 - b) *anomaler Betrieb und Fehlfunktionen vermieden werden;*
 - c) *anomaler Betrieb beherrscht wird und Fehlfunktionen entdeckt werden;*
 - d) *Auslegungsstörfälle beherrscht werden;*
 - e) *schwere Unfälle unter Kontrolle gebracht werden, einschließlich der Verhinderung des Fortschreitens des Unfallablaufs und der Abmilderung der Auswirkungen schwerer Unfälle;*

IAEA SAFETY STANDARDS SERIES No. SSR-5, DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE SPECIFIC SAFETY REQUIREMENTS Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.

2.8. In radiation safety terms, the disposal facility is considered to be a source of radiation that is under regulatory control in a planned exposure situation. ...The primary goal is to ensure that radiation doses are as low as reasonably achievable and within the applicable system of dose limitation.

2.9. The optimization of protection (that is, the process of determining measures for protection and safety to make exposures, and the probability and magnitude of potential exposures, "as low as reasonably achievable, economic and social factors being taken into account") is considered in the design of the disposal facility and in the planning of all operations.

2.10. *Relevant considerations in the optimization of measures for protection and safety include: ... the use of remote handling equipment and shielded equipment for waste emplacement, where necessary; the control of the working environment so as to reduce the potential for accidents and their potential consequences; and the minimization of the need for maintenance in supervised areas and controlled areas. Contamination is required to be controlled and prevented to the extent possible.*

2.17. *The primary goal of the disposal of radioactive waste is the protection of people and the environment in the long term, after the disposal facility has been closed. In this period, migration of radionuclides to the accessible biosphere, dispersion of radionuclides into the accessible biosphere and the consequent exposure of people may occur. This is a consequence of the slow degradation of engineered components and the slow transport of radionuclides from the facility by natural processes. Discrete events may lead to an earlier or greater release. Such events could be of either natural or human origin.*

3.3. *Safety in the operation of radioactive waste disposal facilities has to be achieved by means of a variety of engineered and operational controls similar to those used in other facilities in which radioactive material is handled, used, stored or processed. These include the containment and shielding for the radioactive waste and operational control over time of exposure and proximity to the waste. Protection of the public is provided for by preventing or controlling releases from the facility and by controlling access to the site. ...*

3.4. *Safety after closure is achieved by developing a disposal system in which the various components work together to provide and to ensure the required level of safety. This approach offers flexibility to the designer of a disposal facility to adapt the facility's layout and engineered barriers so as to take advantage of the natural characteristics of the site and the barrier potential of the host geology, if applicable. ...*

Requirement 5: Passive means for the safety of the disposal facility

The operator shall evaluate the site and shall design, construct, operate and close the disposal facility in such a way that safety is ensured by passive means to the fullest extent possible and the need for actions to be taken after closure of the facility is minimized.

3.21. *In the operational stage of a disposal facility for radioactive waste, certain active control measures have to be applied. However, where passive features such as the shielding and containment provided by the packaging material can provide safety, then safety has to be ensured by such passive means.*

3.22. *To some extent, the safety of a disposal facility can depend on some future actions such as maintenance work or surveillance. However, this dependence has to be minimized to the extent possible. This is necessary because of the possibility that safety measures that depend on future actions, such as maintenance work or surveillance, will not be taken or will not be continued. The cumulative probability of the failure of such safety measures will gradually increase. ...*

DESIGN CONCEPTS FOR SAFETY

3.32. A disposal facility is designed to contain the radionuclides associated with the radioactive waste and to isolate them from the accessible biosphere. The disposal facility is also designed to retard the dispersion of radionuclides in the geosphere and biosphere and to provide isolation of the waste from aggressive phenomena that could degrade the integrity of the facility. The various elements of the disposal system, including physical components and control procedures, contribute to performing safety functions in different ways over different timescales.

3.33. Requirements are established in this section for ensuring that there is adequate defence in depth, so that safety is not unduly dependent on a single element of the disposal facility, such as the waste package; or a single control measure, such as verification of the inventory of waste packages; or the fulfilment of a single safety function, such as by containment of radionuclides or retardation of migration; or a single administrative procedure, such as a procedure for site access control or for maintenance of the facility.

3.34. Adequate defence in depth has to be ensured by demonstrating that there are multiple safety functions, that the fulfilment of individual safety functions is robust and that the performance of the various physical components of the disposal system and the safety functions they fulfil can be relied upon, as assumed in the safety case and supporting safety assessment. It is the responsibility of the operator to demonstrate fulfilment of the following design requirements to the satisfaction of the regulatory body.

Requirement 7: Multiple safety functions

The host environment shall be selected, the engineered barriers of the disposal facility shall be designed and the facility shall be operated to ensure that safety is provided by means of multiple safety functions. Containment and isolation of the waste shall be provided by means of a number of physical barriers of the disposal system. The performance of these physical barriers shall be achieved by means of diverse physical and chemical processes together with various operational controls. The capability of the individual barriers and controls together with that of the overall disposal system to perform as assumed in the safety case shall be demonstrated. The overall performance of the disposal system shall not be unduly dependent on a single safety function.

3.35. The engineered and physical barriers that make up the disposal system are physical entities, such as the waste form, the packaging, the backfill, and the host environment and geological formation. A safety function may be provided by means of a physical or chemical property or process that contributes to containment and isolation, such as: impermeability to water; limited corrosion, dissolution, leach rate and solubility; retention of radionuclides; and retardation of radionuclide migration.

Requirement 8: Containment of radioactive waste

The engineered barriers, including the waste form and packaging, shall be designed, and the host environment shall be selected, so as to provide containment of the radionuclides associated with the waste. Containment shall be provided until radioactive decay has significantly reduced the hazard posed by the waste. In addition, in the case of heat generating waste,

containment shall be provided while the waste is still producing heat energy in amounts that could adversely affect the performance of the disposal system.

3.39. The containment of radioactive waste implies designing the disposal facility to avoid or minimize the release of radionuclides. Releases of small amounts of gaseous radionuclides and of small fractions of other highly mobile species from some types of radioactive waste may be inevitable. Such releases, nevertheless, have to be demonstrated to be acceptable by means of safety assessment. The containment may be provided by the characteristics of the waste form and the packaging and by the characteristics of other engineered components of the disposal system and the host environment and geological formation.

3.40. The containment of the radionuclides in the waste form and the packaging over a defined period has to ensure that the majority of shorter lived radionuclides decay in situ. For low level waste, such periods would be of the order of several hundred years; for high level waste the period would be several thousands of years. For high level waste, it also has to be ensured that any migration of radionuclides outside the disposal system would occur only after the heat produced by radioactive decay has substantially decreased.

IAEA SAFETY STANDARDS SERIES No. SSG-14 GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITIES FOR RADIOACTIVE WASTE, SPECIFIC SAFETY GUIDE /IAEA 2011b/

4.7. The objective of geological disposal of radioactive waste is to provide containment and isolation of the radionuclides in the waste from the biosphere. There is no universally accepted method of distinguishing between the safeties characteristics of a geological disposal system that contribute to containment and those that contribute to isolation. Although it is not critical to separate safety characteristics into either containment or isolation, and they are not necessarily mutually exclusive, for the purposes of clarity, in this Safety Guide the following descriptions for containment and isolation will be assumed:

(a) The containment characteristics of a geological disposal system include those processes and features of the disposal facility and host geological formation that are aimed at ensuring that radionuclides remain within the disposal area of the facility.

(b) The isolation characteristics of a geological disposal system include those processes and features of the host rock that ensure radionuclides remain within the geosphere, physically separated from the wider biosphere, (i.e. characteristics that isolate waste from humans) or which migrate to the biosphere only in quantities that are not radiologically significant.

Requirement 8 of SSR-5: Containment of radioactive waste

The engineered barriers, including the waste form and packaging, shall be designed, and the host environment shall be selected, so as to provide containment of the radionuclides associated with the waste. Containment shall be provided until radioactive decay has significantly reduced the hazard posed by the waste. In addition, in the case of heat generating waste, containment shall be provided while the waste is still producing heat energy in amounts that could adversely affect the performance of the disposal system.

Requirement 7 of SSR-5: Multiple safety functions

The host environment shall be selected, the engineered barriers of the disposal facility shall be designed and the facility shall be operated to ensure that safety is provided by means of multiple safety functions. Containment and isolation of the waste shall be provided by means of a number of physical barriers of the disposal system. The performance of these physical barriers is achieved by means of diverse physical and chemical processes together with various operational controls. The capability of the individual barriers and controls together with that of the overall disposal system to perform as assumed in the safety case shall be demonstrated. The overall performance of the disposal system shall not be unduly dependent on a single safety function.

Requirement 5 of SSR-5: Passive means for the safety of the disposal facility

The operator shall evaluate the site and shall design, construct, operate and close the disposal facility in such a way that safety is ensured by passive means to the fullest extent possible and the need for actions to be taken after closure of the facility is minimized.

ICRP PUBLICATION 122: Radiological Protection in Geological Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste /ICRP 2013/

4.4. Protection in the operational phase

(49) Waste emplacement activities are subject to the same principles of dose limitations and the requirement to optimise below constraints as those in any nuclear facility. Both occupational and public exposures are expected from the transportation, handling, and disposal activities, and thus are planned exposures including potential exposures from deviations from the normal operations. The possibility also exists for incidents due to low-probability/high-consequence-initiating events, some of which may lead to an emergency situation. Operations would be expected to be optimised consistent with the Commission's 2007 Recommendations. The annual dose limit for workers of 20 mSv/year averaged over a 5-year period, is applied with the requirement of optimising protection below dose constraints. The recommended dose constraint for the public is 0.3 mSv/year for each source.

(50) For a typical disposal facility, the safety assessment would suggest that significant releases are unlikely during the emplacement period and the period of time during which a competently sited, operated, and sealed disposal facility is being actively observed and monitored. Therefore, some exposures would be categorised as part of the potential exposure subset of planned exposures, due to accidents, and the rest would be categorised as normal exposures.

4.5. Protection in the post operational phase

(54) The expected evolution of a geological disposal facility in the distant future should not require active involvement to mitigate the consequences, as this is counter to the principle of avoiding an undue burden on future generations. Therefore, the Commission continues to support its recommendations in Publication 103 (ICRP, 2007) that either a dose constraint of 0.3 mSv/year (for the expected evolution scenario) or an annual risk constraint of $1 \cdot 10^{-5}$ be used for potential exposures from the emplaced waste. ...

(90) A key technical principle for developing disposal systems and assessing their safety is the concept of defence in depth, which provides for successive passive safety measures, enhancing the confidence that the disposal system is robust and has an adequate margin of safety. The defence in depth concept as applied to disposal systems imposes that safety is provided by means of the various components of the system contributing to fulfilling the main safety functions in different ways over different time scales. The performance of the various components contributing to fulfilling the main safety functions has to be achieved by diverse physical and chemical processes, such that the overall performance of the system will not be unduly dependent on a single component or function. The main safety objective of the siting (selecting the natural barrier system and its environment) and designing (developing the manmade barrier system, taking due account of the site characteristics) of a disposal system is to ensure that postclosure safety will be provided by means of multiple safety functions, and that even if a component or safety feature does not perform fully as expected, a sufficient margin of safety will remain.

WENRA Report: Radioactive Waste Disposal Facilities Safety Reference Levels /WENRA 2014/

DI-22:

The licensee shall design, construct, operate and decommission a disposal facility, ensure closure and, as appropriate, carry out post-closure surveillance so as to fulfil the objective of protecting people and the environment according to applicable radiological protection criteria, including the ALARA principle. A graded approach shall be adopted proportionate to the hazard presented by the waste.

DI-23:

The licensee shall ensure that safety is provided by means of multiple safety functions, including use of multiple barriers and controls. The performance of these barriers shall be achieved by diverse physical and chemical means. The overall performance of the disposal system shall not be unduly dependent on any single safety function according to the defence in depth principle.

DI-24:

The licensee shall ensure that safety will be achieved entirely by passive means, after closure of the facility and after any subsequent period of active institutional control.

DI-26:

The licensee shall design, construct, operate, decommission and close the disposal facility in order to establish a disposal system which provides containment and isolation of the waste for a period of time suited to its radiological hazards.

DI-27:

The licensee shall ensure that the disposal system provides isolation and containment during normal evolution and shall establish to a high level of confidence that the disposal system can be relied on to provide isolation and containment over the timescales necessary.

DI-34:

The licensee shall design the disposal facility to establish a disposal system which provides operational and post-closure safety. The licensee shall take into account the characteristics of the wastes to be disposed of (e.g.: radioactivity, heat and gas generation), the feasibility of the technical options and the characteristics of the selected site.

DI-35:

The licensee shall establish a design basis for the facility taking into account normal operational conditions, anticipated operational occurrences and possible accidents derived from a relevant set of postulated initiating events (PIEs).

DI-36:

The licensee shall design the disposal facility giving due consideration to both normal evolution of the disposal system after closure and scenarios involving events and processes that might disturb the normal evolution of the disposal system.

DI-38:

The licensee shall design the disposal facility to fulfil the following safety functions during the operational and post-closure phases:

- Control of the exposure of people and the environment;*
- Containment and isolation of radioactive material;*
- Control of sub-criticality, if applicable; If burnup credit is adopted for criticality management, the licensee shall confirm compliance with the limiting minimum burnup level with respect to initial enrichment by administrative and operational controls;*
- Heat or gas removal, if applicable*

DI-42:

The licensee shall design the disposal facility so that the engineered components (including barriers) are, to an adequate extent, physically and chemically compatible with each other, with the waste disposed of and with the host environment.

DI-45:

The licensee shall incorporate passive safety features for operational safety into the design of the disposal facility as far as reasonably practicable.

DI-46:

The licensee shall design the equipment of the disposal facility to take account of radiation protection aspects, ease of maintenance and inspection, and minimization of the probability and consequences of anticipated operational occurrences and, as far as practicable, possible accidents during handling.

Anhang B: Auszüge aus nationalen Regelwerken

Nachfolgend sind grundlegende Anforderungen aus nationalen Regelwerken auszugsweise zusammengestellt.

Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren – Atomgesetz /AtG 2017/

§ 9 Bearbeitung, Verarbeitung und sonstige Verwendung von Kernbrennstoffen außerhalb genehmigungspflichtiger Anlagen

- (1) Wer Kernbrennstoffe außerhalb von Anlagen der in § 7 bezeichneten Art bearbeitet, verarbeitet oder sonst verwendet, bedarf der Genehmigung. Einer Genehmigung bedarf ferner, wer von dem in der Genehmigungsurkunde festgelegten Verfahren für die Bearbeitung, Verarbeitung oder sonstige Verwendung wesentlich abweicht oder die in der Genehmigungsurkunde bezeichnete Betriebsstätte oder deren Lage wesentlich verändert.*
- (2) Die Genehmigung darf nur erteilt werden, wenn*
 - 3. die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Verwendung der Kernbrennstoffe getroffen ist,*
 - 4. die erforderliche Vorsorge für die Erfüllung gesetzlicher Schadensersatzverpflichtungen getroffen ist,*
 - 5. der erforderliche Schutz gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter gewährleistet ist,*
 - 6. überwiegende öffentliche Interessen, insbesondere im Hinblick auf die Reinhaltung des Wassers, der Luft und des Bodens, der Wahl des Ortes der Verwendung von Kernbrennstoffen nicht entgegenstehen.*

Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung – Strahlenschutzgesetz – StrlSchG /StrlSchG 2017/

§ 8 Vermeidung unnötiger Exposition und Dosisreduzierung

- (1) Wer eine Tätigkeit plant, ausübt oder ausüben lässt, ist verpflichtet, jede unnötige Exposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt zu vermeiden.*
- (2) Wer eine Tätigkeit plant, ausübt oder ausüben lässt, ist verpflichtet, jede Exposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt auch unterhalb der Grenzwerte so gering wie möglich zu halten. Hierzu hat er unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls*
 - 1. bei Tätigkeiten nach § 4 Absatz 1 Satz 1 Nummer 1 bis 7 und 9 (Nr. 6. "die Errichtung, der Betrieb und die Stilllegung von Anlagen des Bundes zur Sicherstellung und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle nach § 9b des Atomgesetzes") den Stand von Wissenschaft und Technik zu beachten.*

§ 9 Dosisbegrenzung

Wer eine Tätigkeit plant, ausübt oder ausüben lässt, ist verpflichtet, dafür zu sorgen, dass die Dosisgrenzwerte nicht überschritten werden, die in diesem Gesetz und in den aufgrund dieses Gesetzes erlassenen Rechtsverordnungen festgelegt sind.

§ 77 Grenzwert für die Berufslebensdosis

Der Grenzwert für die Summe der in allen Kalenderjahren ermittelten effektiven Dosen beruflich exponierter Personen beträgt 400 Millisievert. Die zuständige Behörde kann im Benehmen mit einem ermächtigten Arzt eine zusätzliche berufliche Exposition zulassen, wenn diese nicht mehr als 10 Millisievert effektive Dosis im Kalenderjahr beträgt und die beruflich exponierte Person einwilligt. Die Einwilligung ist schriftlich zu erteilen.

§ 78 Grenzwerte für beruflich exponierte Personen

(1) Der Grenzwert der effektiven Dosis beträgt für beruflich exponierte Personen 20 Millisievert im Kalenderjahr. Die zuständige Behörde kann im Einzelfall für ein einzelnes Jahr eine effektive Dosis von 50 Millisievert zulassen, wobei in fünf aufeinander folgenden Jahren insgesamt 100 Millisievert nicht überschritten werden dürfen.

(2) Der Grenzwert der Organ-Äquivalentdosis beträgt für beruflich exponierte Personen

1. für die Augenlinse 20 Millisievert im Kalenderjahr,
2. für die Haut, gemittelt über jede beliebige Hautfläche von einem Quadratzentimeter, unabhängig von der exponierten Fläche, (lokale Hautdosis) 500 Millisievert im Kalenderjahr und für die Hände, die Unterarme, die Füße und die Knöchel jeweils 500 Millisievert im Kalenderjahr. Für die Organ-Äquivalentdosis der Augenlinse gilt Absatz 1 Satz 2 entsprechend.

Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) /StandAG 2017/

§ 1 Zweck des Gesetzes

(4) An dem auszuwählenden Standort soll die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen in einem für diese Zwecke errichteten Endlagerbergwerk mit dem Ziel des endgültigen Verschlusses erfolgen. Die Möglichkeit einer Rückholbarkeit für die Dauer der Betriebsphase des Endlagers und die Möglichkeit einer Bergung für 500 Jahre nach dem geplanten Verschluss des Endlagers sind vorzusehen.

§ 23 Mindestanforderungen

(4) Ist in einem Gebiet absehbar, dass kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann, es sich aber für ein wesentlich auf technischen oder geotechnischen Barrieren beruhendes Endlagersystem eignet, muss anstelle der Mindestanforderung nach Absatz 5 Nummer 1 der Nachweis geführt werden, dass die technischen und geotechnischen Barrieren den sicheren Einschluss der Radionuklide für eine Million Jahre gewährleisten können. Der Nachweis ist spätestens in der Begründung für den Vorschlag nach § 18 Absatz 3 zu führen. Die Mindestanforderungen nach Absatz 5 Nummer 2 bis 5 sind in diesem Fall auf den Einlagerungsbereich entsprechend anzuwenden. Absatz 3 gilt entsprechend.

§ 26 Sicherheitsanforderungen

(1) Sicherheitsanforderungen sind die Anforderungen, denen die Errichtung, der Betrieb und die Stilllegung einer nach § 9b Absatz 1a des Atomgesetzes genehmigungsbedürftigen Anlage zur Gewährleistung der nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderlichen Vorsorge gegen Schäden genügen müssen und die damit das bei der Endlagerung zu erreichende Schutzniveau festlegen. Sie bilden die wesentliche Grundlage für die nach den §§ 14, 16 und

18 im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nach § 27 durchzuführende Bewertung, ob an einem Standort in Verbindung mit dem vorgesehenen Endlagerkonzept der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle erwartet werden kann.

(2) Für die Sicherheitsanforderungen sind insbesondere folgende Schutzziele und allgemeine Sicherheitsprinzipien verbindlich:

1. Die radioaktiven und sonstigen Schadstoffe in den Abfällen sind in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich oder nach Maßgabe von § 23 Absatz 1 in Verbindung mit Absatz 4 bei wesentlich auf technischen und geotechnischen Barrieren beruhenden Endlagerkonzepten innerhalb dieser Barrieren mit dem Ziel zu konzentrieren und einzuschließen, diese Stoffe von der Biosphäre fernzuhalten. Für einen Zeitraum von einer Million Jahren muss im Hinblick auf den Schutz des Menschen und, soweit es um den langfristigen Schutz der menschlichen Gesundheit geht, der Umwelt sichergestellt werden, dass Expositionen aufgrund von Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem Endlager geringfügig im Vergleich zur natürlichen Strahlenexposition sind.
2. Es ist zu gewährleisten, dass die Auswirkungen der Endlagerung auf Mensch und Umwelt im Ausland nicht größer sind als im Inland zulässig.
3. Es ist zu gewährleisten, dass für die eingelagerten Abfälle die Möglichkeit der Rückholung während der Betriebsphase besteht und dass für einen Zeitraum von 500 Jahren nach dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers ausreichende Vorkehrungen für eine mögliche Bergung der Abfälle vorgesehen werden.
4. Das Endlager ist so zu errichten und zu betreiben, dass für den zuverlässigen langfristigen Einschluss der radioaktiven Abfälle in der Nachverschlussphase keine Eingriffe oder Wartungsarbeiten erforderlich werden.

(3) Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit wird ermächtigt, durch Rechtsverordnung auf Grundlage der Sicherheitsprinzipien nach Absatz 2 Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung festzulegen. Soweit erforderlich, sind wirtsgesteinsabhängige Anforderungen für jedes der nach § 23 Absatz 1 zu betrachtenden Wirtsgesteine festzulegen. Die festzulegenden Anforderungen umfassen insbesondere:

1. Anforderungen an den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlung;
2. Anforderungen an die Rückholbarkeit und zur Ermöglichung einer Bergung;
3. Anforderungen zum Sicherheitskonzept des Endlagers für die Betriebs- und die Nachverschlussphase einschließlich dessen schrittweiser Optimierung.

§ 27 Vorläufige Sicherheitsuntersuchungen

(4) Solange die maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt worden sind, wird aus Vorsorgegründen von einer Grenztemperatur von 100 Grad Celsius an der Außenfläche der Behälter ausgegangen.

Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG) /WHG 2017/

§ 48 Reinhaltung des Grundwassers

- (1) Eine Erlaubnis für das Einbringen und Einleiten von Stoffen in das Grundwasser darf nur erteilt werden, wenn eine nachteilige Veränderung der Wasserbeschaffenheit nicht zu besorgen ist. Durch Rechtsverordnung nach § 23 Absatz 1 Nummer 3 kann auch

festgelegt werden, unter welchen Voraussetzungen die Anforderung nach Satz 1, insbesondere im Hinblick auf die Begrenzung des Eintrags von Schadstoffen, als erfüllt gilt. Die Verordnung bedarf der Zustimmung des Bundestages. Die Zustimmung gilt als erteilt, wenn der Bundestag nicht innerhalb von drei Sitzungswochen nach Eingang der Vorlage der Bundesregierung die Zustimmung verweigert hat.

- (2) Stoffe dürfen nur so gelagert oder abgelagert werden, dass eine nachteilige Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit nicht zu besorgen ist. Das Gleiche gilt für das Befördern von Flüssigkeiten und Gasen durch Rohrleitungen. Absatz 1 Satz 2 bis 4 gilt entsprechend.*

Bundesberggesetz /BbergG 2017/

§ 55 Zulassung des Betriebsplanes

(1) Die Zulassung eines Betriebsplanes im Sinne des § 52 ist zu erteilen, wenn

...

3. die erforderliche Vorsorge gegen Gefahren für Leben, Gesundheit und zum Schutz von Sachgütern, Beschäftigter und Dritter im Betrieb, insbesondere durch die den allgemein anerkannten Regeln der Sicherheitstechnik entsprechenden Maßnahmen, sowie dafür getroffen ist, dass die für die Errichtung und Durchführung eines Betriebes auf Grund dieses Gesetzes erlassenen oder geltenden Vorschriften und die sonstigen Arbeitsschutzvorschriften eingehalten werden,

Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 2010/

3. Zweckbestimmung und allgemeine Schutzziele

Diese Endlagerung verfolgt zwei wesentliche allgemeine Schutzziele:

3.1 Dauerhafter Schutz von Mensch und Umwelt vor der ionisierenden Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle

3.2 Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen

4. Sicherheitsprinzipien

4.1 Die radioaktiven und sonstigen Schadstoffe in den Abfällen müssen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich konzentriert und eingeschlossen und damit möglichst lange von der Biosphäre ferngehalten werden.

4.2 Die Endlagerung muss sicherstellen, dass Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem Endlager langfristig die aus der natürlichen Strahlenexposition resultierenden Risiken nur sehr wenig erhöhen.

Zur Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen sind folgende Sicherheitsprinzipien zu beachten:

4.6 Das Endlager ist so zu errichten und so zu betreiben, dass für den zuverlässigen langfristigen Einschluss der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich in der Nachverschlussphase keine Eingriffe oder Wartungsarbeiten erforderlich werden.

7.2.3 Nachweis der Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems: Die langfristige Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems muss auf der Basis theoretischer Überlegungen prognostiziert und dargelegt werden. Falls technische Barrieren im Hinblick auf die Langzeitsicherheit bedeutsame Sicherheitsfunktionen übernehmen und besonderen Anforderungen unterliegen und hierfür keine anerkannten Regeln der Technik vorliegen, muss deren Herstellung, Errichtung und Funktion grundsätzlich erprobt sein. Diese Erprobung muss eine nach Stand von Wissenschaft und Technik durchgeführte Qualitätssicherung beinhalten. Diese Erprobung kann entfallen, falls die Robustheit dieser Bauwerke, d. h. ihre Unempfindlichkeit gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen, anderweitig nachgewiesen werden kann oder falls Sicherheitsreserven in einem Umfang bestehen, die den Verzicht auf eine Erprobung erlauben.

7.2.4 Ausschluss von Kritikalität: Es ist zu zeigen, dass sich selbst erhaltende Kettenreaktionen sowohl bei wahrscheinlichen wie auch bei weniger wahrscheinlichen Entwicklungen ausgeschlossen sind.

8. Endlagerauslegung

8.1 Für die Sicherheit des Endlagers in der Betriebsphase einschließlich Stilllegung ist die Zuverlässigkeit und Robustheit von Sicherheitsfunktionen innerhalb des Endlagers in Anlehnung an das kerntechnische Regelwerk für vergleichbare Funktionen in anderen kerntechnischen Anlagen nachzuweisen. Für die Betriebsphase sind darüber hinaus in vier Sicherheitsebenen gestaffelte Maßnahmen zu planen, wie dies analog auch für Kernkraftwerke gilt. Durch die Zuordnung dieser vier Ebenen zu Anlagenzuständen und durch die Festlegung der für diese Anlagenzustände zu ergreifenden oder vorgesehenen Schutzmaßnahmen ist ein Konzept in der Tiefe gestaffelter Abwehrmaßnahmen (defence in depth) zu realisieren.

Folgende vier Sicherheitsebenen sind zu betrachten:

Normalbetrieb - Maßnahmen verhindern Eintreten von Betriebsstörungen Anomaler Betrieb - Maßnahmen verhindern Eintreten von Auslegungsstörfällen Auslegungsstörfälle - Maßnahmen beherrschen Auslegungsstörfälle Auslegungsüberschreitende - Maßnahmen verringern die Eintrittswahrscheinlichkeit oder Störfälle/Ereignisse vermindern Umgebungsauswirkungen.

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

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

8.6 Abfallbehälter müssen unter Berücksichtigung der darin verpackten Abfallprodukte und des sie umgebenden Versatzes folgende Sicherheitsfunktionen erfüllen:

Für die wahrscheinlichen Entwicklungen muss eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole zu beachten.

In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein.

8.7 Das Einschlussvermögen des Endlagers muss auf verschiedenen Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen beruhen. Mit Blick auf die Zuverlässigkeit des Einschlusses ist das Zusammenspiel dieser Barrieren in ihrer Redundanz und Diversität zu optimieren. Dabei sind das Gefährdungspotenzial der Abfälle und die unterschiedliche Wirkung der Barrieren in den verschiedenen Zeitbereichen zu berücksichtigen. Die Sicherheit des Endlagers nach seiner Stilllegung ist demnach durch ein robustes, gestaffeltes Barrierensystem sicherzustellen, das seine Funktionen passiv und wartungsfrei erfüllt und das seine Funktionstüchtigkeit selbst für den Fall in ausreichendem Maße beibehält, falls einzelne Barrieren nicht ihre volle Wirkung entfalten.

Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle /BMU 2020/

Artikel 1: Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung – EndLSiAnfV)

§ 4 Sicherer Einschluss der radioaktiven Abfälle

(1) Die einzulagernden radioaktiven Abfälle sind im Endlagersystem mit dem Ziel zu konzentrieren und sicher einzuschließen, die darin enthaltenen Radionuklide mindestens im Bewertungszeitraum von der Biosphäre fernzuhalten.

(2) Das vorgesehene Endlagersystem hat den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle passiv und wartungsfrei durch ein robustes, gestaffeltes System verschiedener Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen zu gewährleisten.

(3) Die wesentlichen Barrieren beim sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle sind

- 1. ein oder mehrere einschlusswirksame Gebirgsbereiche oder*
- 2. im Fall des Wirtsgesteins Kristallingestein, sofern kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann, für die jeweilige geologische Umgebung geeignete technische und geotechnische Barrieren.*

(4) Der sichere Einschluss muss innerhalb der wesentlichen Barrieren nach Absatz 3 so erfolgen, dass die Radionuklide aus den radioaktiven Abfällen weitestgehend am Ort ihrer ursprünglichen Einlagerung verbleiben.

(5) Für die zu erwartenden Entwicklungen ist zu prüfen und darzustellen, dass im Bewertungszeitraum

- 1. insgesamt höchstens ein Anteil von 10^{-4} und*
- 2. jährlich höchstens ein Anteil von 10^{-9}*

sowohl der Masse als auch der Anzahl der Atome aller ursprünglich eingelagerten Radionuklide aus dem Bereich der wesentlichen Barrieren ausgetragen wird. In diesen Anteilen sind

auch radioaktive Zerfallsprodukte der ursprünglich eingelagerten Radionuklide zu berücksichtigen.

(6) Für die abweichenden Entwicklungen ist zu prüfen und darzustellen, dass das Endlager-system im Bewertungszeitraum seine Funktion nach den Absätzen 1 bis 4 beibehält.

§ 5 Integrität und Robustheit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs als wesentlicher Barriere

(1) Im Fall des § 4 Absatz 3 Nummer 1 ist für die zu erwartenden Entwicklungen im Bewertungszeitraum die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches zu prüfen und darzustellen und seine Robustheit zu begründen. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich ist unter Berücksichtigung der zu erwartenden Entwicklungen räumlich eindeutig zu definieren. Es ist zu prüfen und darzustellen, dass die für den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle relevanten Eigenschaften der technischen und geotechnischen Barrieren mindestens in dem Zeitraum erhalten bleiben, in dem diese Barrieren nach dem Sicherheitskonzept erforderlich sind.

(2) Hinsichtlich der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches ist zu prüfen und darzustellen, dass (...)

2. durch die Temperaturentwicklung die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht erheblich beeinträchtigt wird und

3. die möglichen Änderungen der chemischen Verhältnisse im Einlagerungsbereich, insbesondere auf Grund der in das Endlagerbergwerk eingebrachten Materialien, die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches nicht erheblich beeinträchtigen. (...)

(4) Die für die Langzeitsicherheit erforderlichen Eigenschaften von technischen oder geotechnischen Barrieren sind im Sicherheitskonzept zu spezifizieren. Es ist zu prüfen und darzustellen, dass die Herstellung und Errichtung der Barrieren nach diesen Spezifikationen in der erforderlichen Anzahl qualitätsgesichert möglich ist. Die vorgesehene Qualitätssicherung muss dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Die Herstellung, Errichtung und Funktion dieser Barrieren muss erfolgreich erprobt sein, soweit ihre Robustheit nicht anderweitig nachgewiesen werden kann und keine Sicherheitsreserven in einem Umfang bestehen, die den Verzicht auf eine Erprobung erlauben.

§ 6 Integrität und Robustheit der technischen und geotechnischen Barrieren als wesentliche Barrieren

(1) Im Fall des § 4 Absatz 3 Nummer 2 ist für die zu erwartenden Entwicklungen im Bewertungszeitraum die Integrität des Systems der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren zu prüfen und darzustellen und seine Robustheit zu begründen. Die für den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle relevanten Eigenschaften der weiteren Barrieren des Endlagersystems und insbesondere des Gebirges im Einlagerungsbereich sind zu spezifizieren. Es ist zu prüfen und darzustellen, dass diese Eigenschaften mindestens in dem Zeitraum erhalten bleiben, in dem sie nach dem Sicherheitskonzept erforderlich sind.

(2) Hinsichtlich der Integrität des Systems der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren ist zu prüfen und darzustellen, dass die Sicherheitsfunktionen der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren nicht erheblich beeinträchtigt werden durch

1. die im Einlagerungsbereich möglicherweise ablaufenden hydraulischen, chemischen und physikalischen Prozesse, insbesondere Korrosion und Erosion,

2. im umgebenden Gebirge auftretende Spannungen, Drücke und mögliche Gebirgsbewegungen und

3. die Temperaturentwicklung.

(3) Bei der Prüfung und Darstellung sind die geologische und hydrogeologische Umgebung, die Eigenschaften der weiteren Barrieren des Endlagersystems sowie die Eigenschaften der einzulagernden Abfälle zu berücksichtigen.

(4) Die für die Langzeitsicherheit erforderlichen Eigenschaften der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren sind im Sicherheitskonzept zu spezifizieren. Es ist zu prüfen und darzustellen, dass die Herstellung und Errichtung der Barrieren nach diesen Spezifikationen in der erforderlichen Anzahl qualitätsgesichert möglich sind. Die vorgesehene Qualitätssicherung muss dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Die Herstellung und Errichtung der Barrieren muss unter realistischen Bedingungen erfolgreich erprobt sein. Ihre Funktion unter diesen Bedingungen ist zu prüfen und darzustellen.

§ 7 Dosiswerte im Bewertungszeitraum

(1) Es ist zu prüfen und darzustellen, dass Expositionen auf Grund von Austragungen von Radionukliden aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen geringfügig im Vergleich zur natürlichen Strahlenexposition sind. Hierzu ist darzustellen, in welchem Gebiet zusätzliche Strahlenexpositionen auftreten können. Es ist als Indikator die zusätzliche jährliche effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung abzuschätzen, die während des Bewertungszeitraums durch Austragungen von Radionukliden aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen auftreten kann. Bei der Abschätzung sind die Lebensbedingungen zum Zeitpunkt der Antragstellung für den gesamten Bewertungszeitraum zu unterstellen.

(2) Die Abschätzung ist sowohl für die zu erwartenden Entwicklungen als auch für die abweichenden Entwicklungen vorzunehmen. Expositionen auf Grund von Austragungen von Radionukliden aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen sind geringfügig im Sinne von Absatz 1 Satz 1, wenn

1. für die zu erwartenden Entwicklungen die abgeschätzte zusätzliche effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung höchstens im Bereich von 10 Mikrosievert pro Kalenderjahr liegt und

2. für die abweichenden Entwicklungen die abgeschätzte zusätzliche effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung 100 Mikrosievert pro Kalenderjahr nicht überschreitet.

§ 8 Ausschluss sich selbst tragender Kettenreaktionen

(1) Es ist zu prüfen und darzustellen, dass sich selbst tragende Kettenreaktionen während des Betriebs und der Stilllegung des Endlagers sowie für die zu erwartenden und die abweichenden Entwicklungen im Bewertungszeitraum ausgeschlossen sind.

(2) Um eine sich selbst tragende Kettenreaktion ausschließen zu können, muss der berechnete Neutronenmultiplikationsfaktor kleiner sein als

1. 0,95 im Zeitraum von 500 Jahren nach dem geplanten Verschluss des Endlagers und

2. 0,98 während des übrigen Bewertungszeitraumes.

Die Berechnung erfolgt nach der Anlage.

§ 10 Sicherheitskonzept

(...)

(5) Das Sicherheitskonzept muss eine Darstellung aller vorgesehenen Barrieren des Endlagersystems, insbesondere der wesentlichen Barrieren nach § 4 Absatz 3, ihrer jeweiligen Sicherheitsfunktionen und ihres Zusammenwirkens, enthalten. Die Darstellung muss auch ein Verschlusskonzept zur Abdichtung von Hohlräumen, die mit radioaktiven Abfällen beladen worden sind, umfassen. Es ist darzulegen, dass die Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen unempfindlich sind und dass das Verhalten der Barrieren gut prognostizierbar ist.

(6) Das Sicherheitskonzept hat im Übrigen zu enthalten:

- 1. einen Ablaufplan für die Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung des Endlagers, der darlegt, wie die Sicherheit des Endlagers nach § 17 sichergestellt werden kann und wie die radioaktiven Abfälle in einem sicheren Zustand gehalten werden können,*
- 2. eine Darstellung der Maßnahmen, mit denen die Rückholbarkeit der eingelagerten radioaktiven Abfälle nach § 13 bis zum Beginn der Stilllegung gewährleistet wird, und*
- 3. eine Darstellung der Vorkehrungen, die zur Ermöglichung einer Bergung der eingelagerten radioaktiven Abfälle nach § 14 getroffen werden.*

(7) Im Sicherheitskonzept zu berücksichtigen sind Maßnahmen, die bis zum Abschluss der Stilllegung erforderlich sind

- 1. zur Gewährleistung des erforderlichen Schutzes des Endlagers vor Störmaßnahmen und sonstigen Einwirkungen Dritter und*
- 2. zur Überwachung von Kernmaterial.*

§ 11 Auslegung des Endlagers

(1) Die technische Auslegung des Endlagers ist aus dem Sicherheitskonzept abzuleiten und zu optimieren. Sie hat insbesondere Folgendes zu umfassen:

1. die Definition der wesentlichen Barrieren nach § 4 Absatz 3 unter Berücksichtigung der Endlagergebäude, der Einlagerungstechnik und der Einlagerungsgeometrie, dabei

a) im Falle des § 4 Absatz 3 Nummer 1 Lage und Abmessungen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder

b) im Falle des § 4 Absatz 3 Nummer 2 Spezifikationen der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren,

2. die Definition der weiteren Barrieren des Endlagersystems unter Berücksichtigung der Endlagergebäude, der Einlagerungstechnik und der Einlagerungsgeometrie

3. die Positionierung und technische Ausführung aller untertägigen Hohlräume, insbesondere der für die Einlagerung von Endlagergebäuden bestimmten Bereiche, sowie aller Tageszugänge,

4. die Spezifikation der Einbauten und Geräte, die der Handhabung von Endlagergebäuden dienen,

5. die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Endlagergebinde sowie die Vorgaben für die Behandlung der darin enthaltenen Abfälle nach § 3 Absatz 1 Satz 2 der Atomrechtlichen Entsorgungsverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2172) in der jeweils geltenden Fassung,

6. das Einlagerungskonzept, insbesondere Anordnung sowie Handhabung und Kontrolle der Endlagergebinde,

7. die Maßnahmen zur Gewährleistung der Rückholbarkeit bereits eingelagerter Endlagergebinde und

8. die Stilllegungsmaßnahmen einschließlich der Verschlussmaßnahmen. (...)

(5) Für alle vorgesehenen technischen Komponenten des Endlagers sind die Bedingungen für einen sicheren Betrieb zu dokumentieren, zu begründen und bei der Auslegung des Endlagers zu berücksichtigen.

§ 12 Optimierung des Endlagersystems

(1) Das Sicherheitskonzept und die technische Auslegung des Endlagers sind unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls und unter Beachtung der Ausgewogenheit der Maßnahmen zur Erreichung folgender Ziele zu optimieren:

1. die Langzeitsicherheit des Endlagers, insbesondere Qualität des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle und Robustheit des Endlagersystems sowie

2. die Betriebssicherheit des Endlagers.

(2) Die Optimierung ist abgeschlossen, wenn eine weitere Verbesserung der Sicherheit nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand erreicht werden kann.

(3) Bei der Optimierung des Endlagers sind neben den zu erwartenden und den abweichenden Entwicklungen nach § 3 Absatz 3 und 4 auch die hypothetischen Entwicklungen und Entwicklungen auf der Grundlage zukünftiger menschlicher Aktivitäten nach § 3 Absatz 6 und 7 zu berücksichtigen. Es ist sicherzustellen, dass Maßnahmen zur Optimierung des Endlagersystems, die aus abweichenden Entwicklungen abgeleitet werden, die Sicherheit des Endlagers für die zu erwartenden Entwicklungen nicht erheblich beeinträchtigen. Maßnahmen, die aus hypothetischen Entwicklungen abgeleitet werden, dürfen die Sicherheit des Endlagers für die zu erwartenden und für die abweichenden Entwicklungen nicht erheblich beeinträchtigen. Die Optimierung zur Verringerung möglicher Auswirkungen von zukünftigen menschlichen Aktivitäten auf das Endlagersystem ist nachrangig durchzuführen.

(4) Im Rahmen der periodischen Sicherheitsüberprüfungen nach § 9h Nummer 1 des Atomgesetzes in Verbindung mit § 19a Absatz 3 und 4 des Atomgesetzes ist eine erneute Optimierung auf der Grundlage umfassender Sicherheitsanalysen vorzunehmen. Dabei ist das Sicherheitskonzept des Endlagersystems nach dem Stand von Wissenschaft und Technik grundlegend zu überprüfen und ist eine Untersuchung möglicher Alternativen zum aktuellen Endlagersystem und seinen Komponenten durchzuführen. Aus den Ergebnissen der Überprüfung und der Untersuchung sind mögliche Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit des Endlagers abzuleiten. Erkenntnisse aus der Errichtung, dem Betrieb und der Stilllegung des Endlagers sind zu berücksichtigen.

(5) § 8 des Strahlenschutzgesetzes vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), das zuletzt durch Artikel 11 des Gesetzes vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2510) geändert worden ist, in der jeweils geltenden Fassung bleibt unberührt.

§ 13 Rückholbarkeit eingelagerter Endlagergebäude

(1) Endlagergebäude, die in das Endlager eingelagert wurden, müssen bis zum Beginn der Stilllegung des Endlagers rückholbar sein.

(2) Die Rückholung ist so zu planen, dass der dafür voraussichtlich erforderliche technische und zeitliche Aufwand den der Einlagerung nicht unverhältnismäßig übersteigt. Die für eine Rückholung erforderlichen technischen Einrichtungen sind während des Betriebes vorzuhalten.

(3) Maßnahmen, die der Gewährleistung der Rückholbarkeit dienen, dürfen die Langzeitsicherheit des Endlagers nicht gefährden.

§ 14 Ermöglichung einer Bergung eingelagerter Endlagergebäude

(1) Es sind ausreichende Vorkehrungen dafür zu treffen, dass eine Bergung der eingelagerten Endlagergebäude während der Stilllegung und für einen Zeitraum von 500 Jahren nach dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers möglich ist.

(2) Die Vorkehrungen sind ausreichend, wenn

1. für die zu erwartenden Entwicklungen des Endlagersystems die eingelagerten Endlagergebäude für einen Zeitraum von 500 Jahren nach dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers

a) individuell aufgefunden und identifiziert werden können,

b) mechanisch so stabil sind, dass eine Handhabung ganzer Endlagergebäude möglich ist, und

c) bei ihrer Handhabung keine Freisetzung von radioaktiven Aerosolen erwarten lassen und

2. eine umfassende Dokumentation angelegt wird über

a) das aufgefahrene Endlagerbergwerk einschließlich seiner Stilllegung,

b) sämtliche eingelagerten Endlagergebäude einschließlich ihrer jeweiligen Beladung und Position im Endlagerbergwerk und

c) die zu erwartenden und die abweichenden Entwicklungen des Endlagersystems.

Die Dokumentation muss an mindestens zwei räumlich und organisatorisch voneinander getrennten Stellen möglichst langfristig verfügbar und lesbar gehalten werden.

(3) Maßnahmen, die der Ermöglichung einer Bergung dienen, dürfen die Langzeitsicherheit des Endlagers nicht gefährden.

§ 15 Errichtung des Endlagers

(...)

(2) Zur Errichtung des Endlagers zählen insbesondere (...)

4. die Installation und Erprobung aller technischen Einrichtungen, die für die Handhabung und Einlagerung von Endlagergebünden erforderlich sind, und

5. die Erprobung aller technischen Einrichtungen, die für eine mögliche Rückholung von eingelagerten Endlagergebünden erforderlich sind. (...)

§ 16 Probetrieb des Endlagers

(1) Vor der erstmaligen Annahme von radioaktiven Abfällen zum Zweck der Endlagerung muss der Betrieb des Endlagers erfolgreich erprobt worden sein.

(2) Bei der Erprobung des Betriebs (...)

2. muss die Handhabung und Einlagerung von Endlagergebinden ohne radioaktive Beladung durchgeführt werden,

3. muss die Funktionsfähigkeit aller technischen Einrichtungen, die für eine mögliche Rückholung von eingelagerten Endlagergebinden erforderlich sind, sichergestellt werden und (...)

§ 17 Sicherheit während der Errichtung, des Betriebs und der Stilllegung des Endlagers; Anlagenzustände

(1) Die für die Sicherheit des Endlagers relevanten Anlagenzustände während der Errichtung, des Betriebs und der Stilllegung sind systematisch zu ermitteln, zu beschreiben und einzuordnen als

1. Normalbetrieb,

2. anomaler Betrieb,

3. Auslegungsstörfälle oder

4. auslegungsüberschreitende Unfälle und Ereignisse.

(2) Für diese Anlagenzustände sind entsprechend gestaffelte Abwehr- und Schutzmaßnahmen als Teil des Sicherheitskonzeptes zu entwickeln und umzusetzen.

(3) In dem Sicherheitskonzept sind

1. für den Normalbetrieb Maßnahmen vorzusehen, die den bestimmungsgemäßen Betrieb des Endlagers gewährleisten und das Eintreten anderer Anlagenzustände vermeiden,

2. für den anomalen Betrieb Maßnahmen vorzusehen, die das Eintreten von Störfällen verhindern und das Endlager in den Normalbetrieb zurückführen,

3. für Auslegungsstörfälle Maßnahmen entsprechend § 104 Absatz 1 Satz 1 und 2 der Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036) in der jeweils geltenden Fassung vorzusehen, die den Störfall beherrschen und das Endlager in einen sichereren Anlagenzustand zurückführen,

4. für auslegungsüberschreitende Unfälle und Ereignisse Maßnahmen vorzusehen, die die Auswirkungen des Ereignisses auf die Umgebung soweit wie möglich begrenzen.

(4) Die Maßnahmen dürfen die Langzeitsicherheit des Endlagersystems nicht erheblich und nicht mehr als unvermeidlich beeinträchtigen.

§ 18 Einlagerung von radioaktiven Abfällen

(1) Es dürfen nur solche Endlagergebinde in das Endlagerbergwerk eingebracht werden, deren Endlagerfähigkeit nach § 3 Absatz 1 Satz 2 der Atomrechtlichen Entsorgungsverordnung festgestellt worden ist.

(2) Der für die Einlagerung von radioaktiven Abfällen genutzte Bereich des Endlagerbergwerkes ist auf das notwendige Maß zu beschränken. Dieser Bereich ist jeweils zügig aufzufahren, zu beladen, zu verfüllen und gemäß dem Verschlusskonzept gegen das restliche Endlagerbergwerk zu verschließen.

(3) Die Handhabung von Endlagergebinden ist von den bergmännischen Arbeiten im Endlagerbergwerk und sonstigen baulichen Arbeiten auf dem Gelände des Endlagers zu trennen.

(4) Während des Betriebs muss gewährleistet sein, dass jederzeit die personellen Voraussetzungen für eine eventuell notwendige Teilumsetzung des Stilllegungskonzeptes, die das Endlager in einen passiv sicheren Zustand versetzt, bestehen. Die dazu erforderlichen technischen Einrichtungen sind vorzuhalten.

§ 19 Stilllegung des Endlagers

(1) Nach Abschluss der Einlagerung von radioaktiven Abfällen ist das Endlager so stillzulegen, dass das Endlagersystem den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle nach § 4 während des Bewertungszeitraumes passiv und wartungsfrei gewährleistet. (...)

BGE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55
31224 Peine – Germany
T + 49 5171 43-1520
F + 49 5171 43-1506
info@bge-technology.de
www.bge-technology.de