

**Anforderungen an aktuelle
Endlagerkonzepte
für unterschiedliche
Wirtsgesteinsformationen**

Abschlussbericht

Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen

Abschlussbericht

Guido Bracke
Thorsten Faß
Eva Hartwig-Thurat
Angelika Krischer
Ludger Lambers
Jürgen Larue
Stephan Uhlmann
Torben Weyand

August 2017

Auf beiliegender CD-ROM:

- GRS - 471
- Anhang 1 – 8

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende F&E-Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) unter dem Kennzeichen 3616E03200 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Deskriptoren

Endlagerkonzepte, Einlagerungskonzepte, Grundanforderungen, Kristallin, Rückholbarkeit, Rückholungskonzepte, Salz, Ton, Tonstein, verschiedene Wirtsgesteine

Kurzfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden aus betrieblicher Sicht für unterschiedliche Endlagerkonzepte für in Deutschland potenziell in Frage kommende Wirtsgesteine Grundanforderungen an Endlagerkonzepte und sicherheitstechnische Anforderungen an eine Rückholbarkeit eingelagerter radioaktiver Abfälle erarbeitet und dargestellt. Hierfür wurden bestehende internationale und nationale Endlagerkonzepte in den Wirtsgesteinen Ton/Tonstein, Granit und Salz ausgewertet. Basierend auf dem international anerkannten Stand von W&T wurden die jeweiligen Grundanforderungen (z. B. bzgl. Entwicklungsstand, Abfallart, Betriebszeit, Einlagerungstechnik, thermischer Auslegung, Behälterkonzepten und Rückholbarkeit, etc.) ausgewertet und dargestellt und, wo möglich, mit den derzeit in Deutschland vorhanden regulatorischen Anforderungen verglichen. Die sicherheitstechnischen Zusammenhänge zwischen dem Einlagerungs- und einem möglichen Rückholungsbetrieb wurden dargestellt und bewertet. Basierend auf diesen Auswertungen wurden – aus betrieblicher Sicht – grundlegende sicherheitstechnische Anforderungen an die verschiedenen Endlagerkonzepte abgeleitet und dargestellt. Hiermit wurden notwendige Grundlagen für einen Vergleich von Endlagerstandorten aus technisch-wissenschaftlicher Sicht unter Berücksichtigung einer möglichen Rückholbarkeit während der Betriebszeit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle geschaffen.

Die betrachteten nationalen und internationalen Endlagerkonzepte unterscheiden sich sowohl in Bezug auf die Wahl des Wirtsgesteins, der Einlagerungskonzepte als auch der Behälterkonzepte und evtl. Rückholungskonzepte. Die benötigten Zeiträume von mehreren Jahrzehnten von Beginn der Einlagerung bis zum Verschluss des Endlagers (Betriebsphase), bzw. bis zu einer eventuellen Rückholung oder Bergung müssen für die Behälterintegrität und Handhabbarkeit der Behälter eingeplant werden, sowie die für deren Handhabung verfügbare Technik.

Endlagerbehälter für radioaktive Abfälle haben verschiedene Funktionen zu erfüllen. Unterschiedliche Wechselwirkungen dieser Funktionen sind für das Design und die sicherheitstechnische Auslegung zu betrachten. In der Betriebsphase sind besonders Strahlenschutzaspekte, Störfallsicherheit und Arbeitssicherheit zu betrachten. Das Inventar der Behälter bestimmt zum einen die Wärmeleistung und kann zum anderen durch die radioaktive Strahlung das Behältermaterial und damit dessen Eigenschaften beeinflussen. Dies ist bei der Auslegung des Behälters gegen Störfälle zu beachten, damit die Sicherheitsfunktion „Rückhaltung der radioaktiven Stoffe“ erhalten bleibt.

Die Integrität bzw. die Handhabbarkeit der Einlagerungsbehälter ist wesentlich für die technische Umsetzung der Einlagerung oder auch für eine eventuelle Rückholung der Abfallgebinde. Das Einlagerungskonzept und das Wirtsgestein sind die Randbedingungen für die Entwicklung von technischen Lösungen zur Handhabung der Behälter. So limitiert beispielsweise der Zugang zum Endlagerbergwerk (Schacht / Rampe) das Gewicht und die Größe der Behälter. Dies wirkt sich unmittelbar auf die Menge der radioaktiven Abfälle aus, die in einen Behälter eingebracht werden können.

Neben der Langzeitbeständigkeit von Behältersystemen (Langzeitsicherheit) und der Handhabbarkeit für eine ggf. spätere Bergungsoption oder auch Rückholungsoption, stehen in der Betriebsphase des Endlagers (Einlagerungsbetrieb und optionaler Rückholungsbetrieb) zusätzliche weitere Anforderungen an die Behälter im Vordergrund, die sich u. a. auf die Einhaltung von Dosisleistungsgrenzwerten, die Kritikalitätssicherheit und Freisetzungsgrenzwerte beziehen. Endlagerspezifische Anforderungen ergeben sich in Hinblick auf die zulässige Wärmeleistung, Behälterabmessungen und Behältermassen sowie die Berücksichtigung von potentiellen Störfällen. Das Behälterdesign muss sowohl in der Betriebsphase als auch ggf. bei einer möglichen Rückholung die Handhabbarkeit, den Schutz des Personals, die Abschirmung (ggf. in Verbindung mit einem Transferbehälter) und Aktivitätsrückhaltung und die mechanische Integrität bei dynamischer Belastung sicherstellen.

Die Zeiträume, für die eine Rückholung der radioaktiven Abfälle gewährleistet sein soll, unterscheiden sich international z. T. deutlich. Einige Konzepte sehen eine Rückholbarkeitsoption nur bis zum Verschluss des Endlagers vor, andere betrachten darüber hinaus deutlich längere Zeiträume.

Gemeinsam ist allen betrachteten Endlagerkonzepten, dass eine Rückholbarkeit für die technische Konzeption eines Endlagers auslegungsbestimmend ist. Dies umfasst nicht nur den Ausbau von Strecken und Einlagerungsfeldern (Streckenausbau, Größe des Endlagers, Anzahl der Einlagerungsstrecken/Bohrlöcher etc.), sondern auch die Konzeption der Endlagerbehälter selber (Lebensdauer, Handhabbarkeit, Abschirmung etc.). Für eine Entscheidung über eine mögliche Rückholung ist im Endlager ein Monitoring durchzuführen. Die Option der Rückholbarkeit in der Betriebsphase des Endlagers umfasst die Einlagerungs-, Überwachungs- und Verschlussphase und kann ggf. 100 Jahre und mehr reichen. In dieser Zeit müssen technische Konzepte zum Monitoring und zur Rückholung installiert sein bzw. bereitgehalten werden.

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung.....	I
1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.2	Durchführung des Vorhabens	2
1.3	Wissenschaftlich-technische Einzelziele	3
2	Ergebnisse	5
2.1	AP 1: Ableitung von Grundanforderungen an Endlagerkonzepte in Salz, Ton/Tonstein und Granit	5
2.1.1	Analyse und Darstellung bestehender Endlagerkonzepte	5
2.1.2	Grundanforderungen an die Endlager- und Behälterkonzepte	34
2.2	AP 2: Ableitung von sicherheitstechnischen Anforderungen an die Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle aus betrieblicher Sicht	45
2.2.1	Auswertung internationaler Rückholungskonzepte.....	47
2.2.2	Sicherheitstechnische Zusammenhänge zwischen Einlagerungs- und Rückholungsbetrieb	53
2.2.3	Ableitung von sicherheitstechnischen Anforderungen an die Rückholbarkeit aus betrieblicher Sicht	55
3	Zusammenfassung	60
4	Abkürzungsverzeichnis.....	61
5	Abbildungsverzeichnis.....	63
6	Tabellenverzeichnis.....	64
7	Literaturverzeichnis.....	65

Anhänge (auf beiliegender CD)

Anhang 1: Endlagerkonzept im Tonstein (Schweiz) /WEY 17/

Anhang 2: Endlagerkonzept im Tonstein (Frankreich) /KRI 17/

Anhang 3: Endlagerkonzept im Ton (Belgien) /UHL 17a/

Anhang 4: Endlagerkonzept im Kristallin (Schweden) /FAß 17/

Anhang 5: Endlagerkonzept im Salzgestein (Deutschland) /LAR 17/

Anhang 6: Deutsche Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Ton und Kristallin /UHL 17b/

Anhang 7: Endlagerkonzept einer tiefen Bohrlochlagerung (Deutschland) /BRA 17a/

Anhang 8: Ableitung von sicherheitstechnischen Anforderungen an die Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle aus betrieblicher Sicht /HAR 17/

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Die Bundesrepublik plant auf der Grundlage eines Standortauswahlgesetzes ein Auswahlverfahren für Endlagerstandorte für vorwiegend wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle durchzuführen. Eine Vorfestlegung auf mögliche Wirtsgesteinsformationen erfolgt nicht. Die vergleichende Bewertung von Endlagerstandorten kann sich dabei nicht allein auf die geologischen Verhältnisse stützen, sondern muss neben den in Frage kommenden Abfällen auch wirtsgesteinsspezifische Endlagerkonzepte mit einbeziehen.

Vor diesem Hintergrund ist es erforderlich, die aus technisch-wissenschaftlicher Sicht notwendigen Grundlagen für einen Vergleich von Endlagerstandorten zu schaffen. Unter Berücksichtigung der endzulagernden Abfälle und des derzeitigen Standes von Wissenschaft und Technik sollen insbesondere die Anforderungen an Einlagerungs- und Rückholungskonzepte für Endlagerkonzepte in verschiedenen Wirtsgesteinsformationen abgeleitet werden. Diese Endlagerkonzepte können dann in einem weiteren Schritt auf ihre Wirkung auf die Langzeitsicherheit geprüft werden. Hierbei müssten dann auch die Anforderungen an Verschlusskonzepte sowie an technische Barrieren tiefgehend untersucht und betrachtet werden.

Durch die Durchführung der vorgesehenen Arbeiten wird die erforderliche unabhängige Fachkompetenz der GRS für die Begleitung des Standortauswahlverfahrens ausgebaut. Diese Fachkompetenz ist im Interesse der Allgemeinheit notwendig, um die Ergebnisse eines Standortauswahlverfahrens unabhängig anhand wissenschaftlicher Kriterien bewerten zu können.

Mit dem Forschungsvorhaben entwickelt die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, basierend auf international anerkannten Anforderungen, den Stand von Wissenschaft und Technik bezüglich der Entwicklung von Endlagerkonzepten in unterschiedlichen, in Deutschland in Frage kommenden Wirtsgesteinen weiter. Hierbei werden:

- Grundanforderungen an Endlagerkonzepte in Salz, Tonstein und ggf. Granit,
- sicherheitstechnische Anforderungen an eine Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle aus betrieblicher Sicht

unter Berücksichtigung des internationalen Standes von Wissenschaft und Technik sowie von aktuellen nationalen und internationalen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erforscht, erarbeitet und dargestellt.

1.2 Durchführung des Vorhabens

Zur Durchführung des Vorhabens wurden zwei Hauptarbeitspunkte definiert, die sich an den Themenschwerpunkten orientierten:

AP 1: Ableitung von Grundanforderungen an Endlagerkonzepte in Salz, Ton/Tonstein und Granit

AP 2: Ableitung von sicherheitstechnischen Anforderungen an die Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle aus betrieblicher Sicht

Zu jedem Arbeitspunkt wurden ein oder mehrere detaillierte Berichte erstellt (Anhänge 01 bis 08). Die Ergebnisse werden im Hauptteil dieses Abschlussberichtes zusammengefasst und in den Anhängen 01 bis 08 ausführlicher dargestellt. In AP 1 sind hierbei die Anhänge 01 bis 07 erstellt wurden; in AP 2 der Anhang 08. In AP 1 ist die Aufarbeitung des jeweiligen endlagerkonzeptspezifischen Standes von Wissenschaft und Technik detailliert in den zugehörigen Berichten dargestellt ebenso wie Konzeptbezogenen Grundanforderungen. Die daraus abgeleiteten Grundanforderungen für die jeweiligen Endlagerkonzepte sind im vorliegenden Abschlussbericht dargestellt:

Die Anhänge befassen sich mit den folgenden Themen:

- Anhang 01: Endlagerkonzept im Tonstein (Schweiz) /WEY 17/
- Anhang 02: Endlagerkonzept im Tonstein (Frankreich) /KRI 17/
- Anhang 03: Endlagerkonzept im Ton (Belgien) /UHL 17a/
- Anhang 04: Endlagerkonzept im Kristallin (Schweden) /FAß 17/
- Anhang 05: Endlagerkonzept im Salzgestein (Deutschland) /LAR 17/
- Anhang 06: Deutsche Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Ton und Kristallin /UHL 17b/
- Anhang 07: Endlagerkonzept einer tiefen Bohrlochlagerung (Deutschland) /BRA 17a/
- Anhang 08: Ableitung von sicherheitstechnischen Anforderungen an die Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle aus betrieblicher Sicht /HAR 17/

Der Arbeitsfortschritt im Vorhaben wurde während der Vorhabenslaufzeit dem Auftraggeber regelmäßig in Projektgesprächen (Dezember 2016, März 2017 und Juli 2017) präsentiert.

1.3 Wissenschaftlich-technische Einzelziele

Die Ziele des ersten Arbeitspunktes (AP 1) waren:

- Feststellung des internationalen Standes von W&T bei Endlagerkonzepten in Salz, Ton/Tonstein und Granit.
 - Systematische Aufarbeitung des für die Bearbeitung des Vorhabens relevanten Stands von Wissenschaft und Technik. Auswertung und Darstellung der Endlagerkonzepte der z. T. weit fortgeschrittenen Projekte in der Schweiz, Frankreich und Belgien (Ton/Tonstein), in Schweden und Finnland (Granit) und Deutschland und den USA (Salz).
- Ableitung von Grundanforderungen an die Endlager- und Behälterkonzepte.
 - Ableitung und Darstellung der, basierend auf den oben erarbeiteten Ergebnissen, bestehenden Grundanforderungen an die Endlager- und Behälterkonzepte für die unterschiedlichen Wirtsgesteine. Schwerpunkte sind hierbei u. a. die Barrierekonzepte, die Sicherheitskonzepte sowie die verschiedenen Einlagerungskonzepte. In einem weiteren Arbeitsschritt werden auch die Auswirkungen auf die abgeleiteten Grundanforderungen betrachtet, die bei einer Endlagerung unterschiedlicher Abfallarten (wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und vernachlässigbar wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle, bzw. schwach- und/oder mittelaktive radioaktive Abfälle und hochradioaktive Abfälle) im selben Endlager (Co-Disposal) bestehen. Die Grundanforderungen an Endlager und Behälterkonzepte für Endlager bei Co-Disposal in allen betrachteten Wirtsgesteinen werden ebenfalls abgeleitet.

Die Ziele des zweiten Arbeitspunktes (AP 2) waren:

- Auswertung internationaler Rückholungskonzepte (Stand von W&T)
 - Auswertung des internationalen Standes von W&T in Bezug auf Rückholungskonzepte. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage des sicherheitstechnischen Einflusses der Rückholung auf das Endlagerkonzept.

- Darstellung der Zusammenhänge zwischen Einlagerungs- und Rückholungsbetrieb
 - Analyse und Darstellung der Zusammenhänge zwischen Einlagerungsbetrieb und Rückholungsbetrieb. Untersuchung der sicherheitstechnischen Einflüsse verschiedener Endlagerkonzepte in Bezug auf die Endlagersystemkomponenten, z. B. Schacht-/ Streckenausbau, Wetterführung, Abfalltransportsystem, Behälterkonzepte und technische Barrieren sowie Monitoring & Surveillance Systeme wissenschaftlich zu untersuchen. Es soll untersucht werden, welche gegenseitigen Beeinflussungen existieren, die bei Endlagerkonzeptionen mit Rückholoption zu berücksichtigen sind.

- Ableitung von sicherheitstechnischen Anforderungen aus betrieblicher Sicht
 - Ableitung von sicherheitstechnischen Anforderungen an die Rückholbarkeit von radioaktiven Abfällen aus betrieblicher Sicht in allen zuvor betrachteten Endlagerkonzepten, basierend auf den Ergebnissen aus den vorhergehenden Arbeiten in AP 2.

2 Ergebnisse

2.1 AP 1: Ableitung von Grundanforderungen an Endlagerkonzepte in Salz, Ton/Tonstein und Granit

2.1.1 Analyse und Darstellung bestehender Endlagerkonzepte

In AP 1 wurden HAW-Endlagerkonzepte ausgewählter Länder ausgewertet und beschrieben. Ausgewertet wurden hierbei Endlagerkonzepte für eine geologische Endlagerung. Ergänzt wurden diese Auswertungen dabei um ein Konzept für eine tiefe Bohrlochlagerung, die von der Kommission zur Lagerung hochradioaktiver Abfälle in /KOM 16/ als Endlager-Option „zur Beobachtung“ aufgeführt ist. Tab. 2.1 gibt das Ergebnis dieser Auswertungen in Form einer systematischen Gegenüberstellung der ausgewerteten Endlagerkonzepte wieder. Eine ausführliche Darstellung der jeweiligen ausgewerteten Endlagerkonzepte findet sich, samt der Quellenangaben, in den Anhängen 01 bis 07.

Bei der vergleichenden Darstellung der deutschen Endlagerkonzepte in verschiedenen Wirtsgesteinen ist zu beachten, dass die Informationen zu den jeweiligen Konzepten aus Projekten stammen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt wurden. Das deutsche Konzept für Salz beruht überwiegend auf der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) /FIS 13/. Das deutsche Konzept für Ton basiert auf den Projekten ERATO /PÖH 10/, GEIST /AME 04a/ und ANSICHT /JOB 15/. Das deutsche Konzept für Kristallin beruht zum großen Teil auf dem Gutachten /DBE 16/ und dem Projekt CHRISTA /JOB 16/. Diese verschiedenen Projekte wurden mit unterschiedlichem Tiefgang durchgeführt. In der VSG wurde für das Wirtsgestein Salz beispielsweise eine umfassende (vorläufige) Sicherheitsanalyse durchgeführt. Im Gegensatz dazu wurde im Projekt CHRISTA für das Wirtsgestein Granit bisher nur ein Entwurf für das Sicherheitskonzept für die Nachverschlussphase erstellt. Dabei wurden keine Endlagerzugänge, Standorte, Bewetterungstechniken, Rückholbarkeit, Monitoring oder Kammerquerschnitte betrachtet. Ein Konzept zur tiefen Bohrlochlagerung wurde in Deutschland erstmals 2016 ernsthaft diskutiert /BRA 16/. Die verschiedenen Konzepte sind also auf unterschiedlichen Entwicklungsständen und damit nicht ohne weiteres direkt miteinander vergleichbar.

Eine Anzahl von Ländern beabsichtigt ein Co-Disposal von radioaktiven Abfällen, d. h. die Einlagerung von HAW und LAW/MAW Abfällen in einem gemeinsamen Endlagerbergwerk. Betrachtet wurden die Konzepte für Belgien, Deutschland, Frankreich und die Schweiz.

Tab. 1 stellt die Ergebnisse dieser Auswertung in Form einer Übersicht dar. Detaillierte Informationen sind den entsprechenden Anhängen zu entnehmen. Die Tabelle ist in zwölf Themenblöcke (I – XII) gegliedert. Sie enthalten Informationen zu Abfällen, Standort, Betriebszeit, Co-Disposal Konzepten, Zugängen, Einlagerungsfeldern, Einlagerungstechnik, thermischer Auslegung, Bewetterung, Behälterkonzepten, Verfüll- und Verschlusskonzepten, Rückholbarkeit und Monitoring. Die Punkte Rückholbarkeit und Monitoring sind explizit im AP 2 (Kapitel 2.2) behandelt und werden ausführlich in Anhang 08 diskutiert.

Belgien, Frankreich und die Schweiz planen Endlagerkonzepte für die Wirtsgesteine Ton (Boom Clay, Belgien) bzw. Tonstein (Schweiz, Frankreich), Finnland und Schweden für Kristallin. Finnland und Schweden nutzen aufgrund der geologischen Gegebenheiten das gleiche Wirtsgestein. Die beiden skandinavischen Länder haben deshalb ein gemeinsames Endlagerkonzept, das sog. KBS-3-Konzept, entwickelt. Stellvertretend für beide Länder wird in diesem Bericht das schwedische Endlagerkonzept herangezogen. Deutschland hat ausgereifte Konzepte für das Wirtsgestein Salz. Für Deutschland empfiehlt die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe /KOM 16/ eine ergebnisoffene Standortsuche in allen drei verfügbaren Wirtsgesteinen (Salz, Tonstein, Kristallin). Daher wurden für Deutschland zusätzlich Konzepte für Tonstein und Kristallin mit aufgenommen (Tab. 2.1; Anhang 06). Weiterhin wurden Informationen zum Konzept einer tiefen Bohrlochlagerung als abweichendes Endlagerkonzept zur Endlagerung in einem Endlagerbergwerk aufgenommen (Tab. 2.1; Anhang 07).

Die unterschiedlichen nationalen Endlagerkonzepte variieren in den geplanten Betriebsphasen um mehrere Zehner Jahre, wobei unterschiedliche Ansätze und Unterteilungen für die Phase des Einlagerungsbetriebs und ggf. noch eine folgende Beobachtungsphase mit Offenhaltung des Endlagers geplant werden. Die Entsorgungsprogramme bezüglich der Suche und Errichtung für Endlager für HAW-Abfälle sind in den Ländern unterschiedlich weit fortgeschritten. Manche befinden sich in einem frühen Konzeptstadium (Belgien) bzw. am Anfang der Standortsuche ohne Festlegung auf das Wirtsgestein (Deutschland), andere wie Schweden, die Schweiz und Frankreich sind in ihren Programmen weit fortgeschritten oder befinden sich bereits in der

Errichtungsphase (Finnland). In den betrachteten Ländern, die ein Co-Disposal von radioaktiven Abfällen, d. h. die Einlagerung von HAW und LAW/MAW Abfällen in einem gemeinsamen Endlagerbergwerk beabsichtigen, differieren die Konzepte, angefangen von der gemeinsamen Nutzung übertägiger und untertägiger Infrastruktur, bis hin zur fast völligen Trennung der Infrastruktur und der Einlagerungsfelder. Bei den Endlagerzugängen gibt es Variationen der Art (Rampen und Schächten) und der Anzahl der Zugänge. Die Einlagerungskonzepte reichen von horizontaler Streckenlagerung über horizontale Bohrlochlagerung bis zu vertikaler Bohrlochlagerung mit z. T. erheblichen Unterschieden in Länge und Durchmesser der Bohrlöcher. Gemeinsam ist den betrachteten Länderkonzepten, dass geologische Endlager in neu aufzufahrenden Bergwerken geplant und z. T. schon umgesetzt werden.

Die Wahl des Wirtsgesteins hat unmittelbare Rückwirkungen auf die Planung des technischen Endlagerkonzepts. Insbesondere betrifft dies den Grad der Ausbaue von Einlagerungsstrecken, Kammern und Bohrlöchern, so wie zu verwendende Behälter, Anforderungen an die Bewetterung, Auslegungstemperaturen und die spätere Verfüllung der Strecken. Die festzulegenden Grenztemperaturen für verschiedene Wirtsgesteine erfordern entsprechend der Endlagerteufe spezifisch angepasste Behälter-, Einlagerungs- und Bewetterungskonzepte.

Tab. 2.1 Vergleich der ausgewerteten Endlager-Konzepte

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie)
I. Allgemeine Informationen					Auf Basis des VSG-Konzepts			
Abfallkategorien	HAW: Kokillen (verglaste Abfälle) Abgebrannte BE (DWR) Abgebrannte MOX BE (DWR) MAW: 200 l Fässer CSD-C CSD-B	Hochradioaktiver Abfall Mittelradioaktiver langlebiger Abfall	Hochaktiver Abfall (HAA), beinhaltet abgebrannte BE und verglaste Abfälle Langlebige mittelaktive Abfälle (LMA)	Abgebrannte BE (DWR) Abgebrannte BE (SWR) Abgebrannte MOX BE (SWR) (geringe Mengen)	Bestrahlte BE aus DWR und SWR (BE und MOX-Elemente); Bestrahlte BE aus Forschungsreaktoren (z. B. AVR); Verglaste Abfälle (HAW Kokillen) Nicht wärmeentwickelnder MAW; Urantails	Bestrahlte BE aus DWR und SWR (BE und MOX-Elemente); Bestrahlte BE aus Forschungsreaktoren (z. B. AVR); Verglaste Abfälle (HAW Kokillen)	Bestrahlte BE aus DWR und SWR (BE und MOX-Elemente); Bestrahlte BE aus Forschungsreaktoren (z. B. AVR); Verglaste Abfälle (HAW Kokillen)	Bestrahlte BE aus DWR und SWR (BE und MOX-Elemente); Bestrahlte BE aus Forschungsreaktoren (z. B. AVR); Verglaste Abfälle (HAW Kokillen)
Für Endlagerkonzept berücksichtigtes Abfallvolumen	HAW ohne Aufarbeitung: 4.500 m ³ (HAW mit Aufarbeitung: 600 m ³) MAW ohne Aufarbeitung: 10.430 m ³ (MAW mit Aufarbeitung: 11.100 m ³)	10.000 m ³ HAW 75.000 m ³ MAW	Ca. 400 m ³ verglaste Abfälle Ca. 9.000 m ³ BE	Ca. 6.000 Behälter Ca. 12.000 t	34.630 BE (UO ₂ , MOX, DWR, SWR) Ca. 8.000 HAW-Kokillen Brennstoff aus Forschungsreaktoren ca. 2.000 m ³ Urantails 35.000 m ³			34.630 BE (UO ₂ , MOX, DWR, SWR) Ca. 8.000 HAW-Kokillen Brennstoff aus Forschungsreaktoren ca. 2.000 m ³

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie)
Flächenbedarf (untertage)	3,6 km ² (1,8 km ² bei Wiederaufnahme der Wiederaufarbeitung der Abfälle)	Ca. 15 km ²	Ca. 2 km ²	Ca. 3 - 4 km ² untertäglich	1,1 km ² für Bohrlochlagerung; 2,1 km ² bei Streckenlagerung	3,79 + 0,96 km ² für Bohrlochlagerung; 6,92 km ² bei Streckenlagerung	3,56 km ²	Ca. 0,25 km ²
Betriebsdauer	100 Jahre	Mind. 100 Jahre	15 Jahre Einlagerungsbetrieb bei einer Einlagerung von 200 Endlagerbehältern pro Jahr, zusätzlich ca. 50 Jahre Offenhaltung (Beobachtungsphase)	50 - 60 Jahre	40 Jahre Einlagerungsbetrieb		30 Jahre Einlagerungsbetrieb	10 - 30 Jahre (Erstellung und Einlagerungsbetrieb)
II. Standort								
Standort	Offen Auswahlprozess nicht gestartet	Bure Zwischen Department Meuse und Haute Marne (östliche Region des Pariser Beckens) seit 1998	Standortauswahl bis 2031 aus drei Standortgebieten: Zürich Nordost, Jura Ost, Nördlich Lägern	Forsmark (seit 2010) Seit 1993 Machbarkeitsstudien (von 1993 - 2000) in 8 Gemeinden 2009: systematischer Standortvergleich ergibt Forsmark als Standort, der die besten Aussichten hat, die Anforderungen an die LZS zu erfüllen.	Offen Seit 2013 Neustart der Endlagerstandortsuche. Referenzstandort im Projekt: Gorleben.	Offen Seit 2013 Neustart der Endlagerstandortsuche. Referenzstandorte im Projekt: in nord- und süddeutschen Regionen	Offen Seit 2013 Neustart der Endlagerstandortsuche. Kein Referenzstandort im Projekt.	Offen Derzeit nicht im Auswahlprozess

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie)
Erkundungsphasen	Auswahlprozess in Phasen vorgesehen	Seit 2000 untertägige Erkundung Ca. 2020 Baubeginn	Obertägig bis 2031 Untertägig bis 2048	Seit 2002 Standortuntersuchungen in Forsmark (Gemeinde Östhammar) und Laxemar/Simpevarp (Gemeinde Oskarshamn)	Die Standortauswahl soll in verschiedenen Stufen erfolgen.			Derzeit nicht im Auswahlprozess
Wirtsgestein	Ton (Boom Clay, Ypresian Clay)	Tongestein (Callovo-Oxfordian)	Opalinuston	Kristallin, Metagranit (sveko-karelisch)	Salz	Tonstein	Kristallin	Kristallin und hangendes Gestein
Teufe	200 - 600 m	525 m	500 - 700 m	450 - 470 m	870 m (Standort Gorleben, nach VSG)	300 - 800 m	600 m	1500 bis 3500 m
III. Co-Disposal Konzept	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja			Nein
Gemeinsame Nutzung ober-tägiger Anlagen	Ja		Ja		Ja			Nein
Gemeinsame Nutzung der Untertage-transportanlagen	Gemeinsame Nutzung der Schachtförderanlage	Gemeinsame Nutzung der Rampe	Gemeinsame Nutzung der Rampe für den Gebindetransport		Gemeinsame Nutzung der Schachtförderanlage Teilweise gemeinsame Nutzung von Transportmitteln Spezielle Plateauwagen für MAW Transport			Nicht zutreffend

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie)
Gemeinsame Nutzung untertägiger Anlagen	Gemeinsame Nutzung des Füllorts Getrennte Einlagerungsbereiche	Gemeinsame Nutzung des Füllorts Nutzung der gleichen Transportfahrzeuge Getrennte Einlagerungsbereiche und unterschiedliche Einlagerungstechniken	Gemeinsame Nutzung des Füllorts Gemeinsame Nutzung von Infrastrukturbereichen („Zentralbereich“) Getrennte Einlagerungsfelder für HAA/LMA (Minimale Distanz ca. 650 m)		Gemeinsame Nutzung des Füllortes und der Elektro-Lokomotive Getrennte Einlagerungsbereiche Spezielle Platteauwagen und Anschlagmittel für MAW Transport			Nicht zutreffend
IV. Zugänge (Nutzung ab Einlagerungsbeginn)								

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie)
Rampen		Zwei Rampen (eine nukleare Rampe und eine Service-Rampe)	Eine Rampe für Gebindetransport und für ausziehende Wetter aus der kontrollierten Zone (HAA-Lagerfeld) während der Betriebsphase mittels Unterdruck an der Oberflächenanlage Länge ca. 5 km mit einer Neigung von 12,5 % Breite ca. 7 m, Höhe ca. 6,5 m	Eine Rampe für Gebindetransport Zusätzliche Funktion als zweiter Flucht und Rettungsweg H: 6 m, B: 5,5 m Länge: ca. 4,7 km Gefälle: 1:10 5 Loops, 180° Kurven, 25 m minimaler Kurvenradius Alle 500 m Passiermöglichkeiten Ausziehende Wetter über Rampenventilation	In VSG nicht vorgesehen		Kein eigenes spezifisches Konzept Anlehnung an KBS-3-Konzept (FIN, SWE)	Keine

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie)
Schächte	Zwei Schächte (Transport-schacht und Ab-fallschacht)	Fünf Schächte: Im nuklearen Bereich: 1. Einziehende Wetter und Personal 2. Ausziehende Wetter Im nichtnuklearen Bereich: 1. Einziehende Wetter und Personal 2. Ausziehende Wetter plus Transport von großem Equipment 3. Ausziehende Wetter Rampen/ Schächte mit Betonlinern ausgebaut. Einfügen kompressiblen Materials zw. Betonliner u. anstehendem Gestein im Callovo Oxfordian	Zwei Schächte: (Betriebs- und Lüftung-schacht) 1. Betriebs-schacht: Während Einlagerungsbetrieb Personen- u. Materialtransport und ausziehende Wetter aus dem konventionellen Bereich 2. Lüftung-schacht: Einziehende Wetter und Notausstieg für Personal	Sechs Schächte: Vier zentrale Schächte 1. Schacht: Personentransport 2. Schacht: Materialtransport 3. Schacht: Einziehende Wetter 4. Schacht: Ausziehende Wetter) Zwei periphere Ventilations-schächte (Ausziehende Wetter)	Zwei Schächte für einziehende und ausziehende Wetter, Personen- und Materialtransport erfolgt getrennt vom Gebin-detransport in den Schächten für die Wetter			Bohrungen
V. Einlage-rungsfeld (HAW)								

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie)
Lagerungstyp	Noch nicht entschieden: Horizontale Streckenlagerung von Supercontainern (favorisiert) Horizontale Streckenlagerung, Verwendung von Bentonit Hülse (Sleeve Design) Horizontale Bohrlochlagerung Senkrechte Bohrlochlagerung	Horizontale Streckenlagerung (disposal cells) mit Gefälle von 1 - 2 % zum Eingang hin (Abführung von Wasser)	Horizontale Streckenlagerung 27 Lagerstollen Länge 800 m Durchmesser von 2,5 m	Referenz-Konzept: vertikale Einlagerung in Kurzbohrloch (KBS-3): vertikale Bohrlochlagerung Bohrlochtiefe ca. 8 m Durchmesser ca. 1,8 m Bentonitbuffer	Noch nicht endgültig entschieden. Derzeit scheint horizontale Streckenlagerung favorisiert zu sein. Horizontale Bohrlochlagerung von TLB und vertikale Bohrlochlagerung von BSK auch möglich	Horizontale Streckenlagerung von Supercontainern Vertikale Bohrlochlagerung in BSK-R	Vertikale Bohrlochlagerung BSK-Cu	vertikale Bohrlochlagerung DBC-R
Ausbau der Einlagerungsstrecken/-kammern, Bohrlöcher ggf. auf Basis einer Rückhaltungsoption	Betonkeilblockausbau Streckenboden betonierte Gleise in Transportstrecken Betonauflager für Behälter	Ausbau mit Stahllinern Dicke mind. 25 mm	Felssicherung mit Ankern und Netzen Ausrichtung entlang der maximalen horizontalen Hauptspannung (N-S Richtung mit einer Neigung von ca. 7°) Bentonitauflager für Behälter	Maschendraht Firste und obere 1 m am Stoß Bei Bedarf auch Ankerbau	Streckenlagerung (POLLUX) und horizontale Kurzbohrlöcher (CASTOR TLB). Ausbau nicht erforderlich da RE-Miningkonzept (Behälterfreilegung durch bergbauliche Tätigkeiten) Bohrlochlagerung (Metallliner mit Sandversatz)	Ausbau abhängig von Teufe und Betriebszeit/Offenhaltung: Anker- Spritzbeton-Bauweise Stahlbogenausbau Geschlossener Ausbau (Boden) nicht erforderlich	Ausbau in Kristallin ggf. einzuplanen	Verrohrung / Liner

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie)
Strecken/ Kammern Anzahl			Ca. 27 Einlagerungsstrecken	Raum für ca. 7.800 Einlagerungsbohrlöcher Ca. 1.170 Einlagerungsstrecken	Laut VSG werden ca. 130 Strecken in der POLLUX/CAST OR- Streckenlagerung, 17 im BSK- Bohrlochkonzept (bei ca. 225 Bohrlöchern), und ca. 1.600 Kurzbohrlöcher im horizontalen TLB - Kurzbohrlochkonzept geplant.	Bohrlochlagerung: 171 Einlagerungsstrecken mit je 8 Bohrlöchern für je 5 BSK-R Streckenlagerung: 401 Einlagerungsstrecken für je 17 Supercontainern		mindestens 32 Bohrungen zur Lagerung
Querschnitte	7 - 7,5 m Durchmesser der Hauptbetriebsstrecke 3 - 3,5 m Durchmesser der Einlagerungsstrecken T-Kreuzungen (Stabilitätsgründe)	Innendurchmesser ca. 70 cm	Durchmesser der Einlagerungsstrecken beträgt 2,5 m	Hauptbetriebsstrecken: B: 10 m, H: 7 m Transportstrecken: B: 7 m, H: 6 m Einlagerungsstrecken: B: 4,2 m, H: 4,8 m Rampe: B: 5,5 m, H: 4,8 m	Richtstrecke Nord: max. Breite 7,6 m max. Höhe 3,45 m Richtstrecke Süd: max. Breite 6,8 m max. Höhe 3,8 m Einlagerungsstrecke: max. Breite 3,7 m max. Höhe 5,1 m	Bohrlochlagerung: 15 - 52 m ² Streckenlagerung: 14 - 40 m ²		0,7 m (Einlagerungsbereich) – ca. 2 m

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie)
Längen	400 m lange Einlagerungsstrecken	80 m bis 100 m	Länge der Einlagerungsstollen beträgt 800 m	Max. 300 m lange Einlagerungsstrecken Gesamtlänge aller Einlagerungsstrecken ca. 61 km	Je nach geologischer Gegebenheit unterschiedliche Streckenlängen	400 m lange Einlagerungsstrecken Bohrlochtiefen 30 m	400 m lange Einlagerungsstrecken Bohrlochtiefen 8 m	2.000 m lange Einlagerungsbohrlöcher
Strecken Abstände	120 m für abgebrannte BE 60 m restliche Klasse C Abfälle (HAW) 50 m für Klasse B (MAW) und	Kammerabstände variieren nach Wärmeentwicklung und Anzahl der Endlagergebinde	Ca. 40 m zwischen den einzelnen Einlagerungsstollen (resultierend aus dem maximal zulässigen Temperaturfeld)	Ca. 6 - 7 m Abstand zwischen den Einlagerungsbohrlöchern Ca. 40 m Abstand zwischen den Einlagerungstunneln	Abstände sind abhängig von der Wärmeleistung der Gebinde	Bohrlochabstände 46 m Streckenmitttenabstand 40 m	Bohrlochabstände 4,4 bis 6,0 m Streckenabstände 21 m	50 m als Mindestabstand der Einlagerungsbohrlöcher
VI. Einlagerungstechnik/-system								
Transportverpackung	Nein Keine zusätzliche Verpackung für den Transport	Ja Endlagergebinde werden in abschirmende Behälter zum Transport verpackt (Transportgebinde)	Ja Endlagergebinde werden in abschirmende Behälter zum Transport verpackt (Transportgebinde)	Ja Endlagergebinde werden in abschirmende Behälter zum Transport verpackt (Transportgebinde)	In Abhängigkeit der verwendeten Einlagerungstechnik Vertikale Bohrlochlagerung benötigt eine Transportverpackung	Bohrlochlagerung: ja (Transferbehälter) Streckenlagerung: keine zusätzliche Transportverpackung	ja	Nur übertägig, dann DBC-R

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlagerung - Konzeptstudie)
Transport nach untertage	Schachtförderanlage mit ca. 70 t Nutzlast	Über Rampe mit ca. 12 % Gefälle und ca. 4.200 m Länge, Seilzugtechnik	Über eine Rampe mit einer Neigung von 12,5 % Verwendung einer Zahnradbahn	Über Rampe mit 10 % Gefälle mit Spezialtransportfahrzeug in Transportbehälter	Maximale Nutzlast der Schachtförderanlage 85 t. Eine Erhöhung der Nutzlast der Schachtförderanlage auf bis zu 175 t (TLB) wird diskutiert.	Schachtförderanlage: Nutzlast 65 t (Bohrlochlagerung); 86 t (Supercontainer)		Rig, seilgebunden, Coil-Tubing
Untertägig	E-Lok zieht Transportwagen auf Schienen (Hybridtransportsystem)	Schienengebundener Transport mit Transportfahrzeug zur Einlagerungskammer	Umladung der Endlagerbehälter in der Oberflächenanlage in einen Abschirmbehälter für den internen Transport Im untertägigen Zentralbereich (Umladestation) wird auf einen Adhäsionsbetrieb (gleisgebunden) umgestellt und der Abschirmbehälter entfernt	Umladung der Einlagerungsbehälter aus Transportbehälter in Abschirmbehälter Transport des Abschirmbehälters mit Einlagerungsbehälter mit Einlagerungsfahrzeug	Gleisgebundenes Transportsystem. Für die Traktion ist eine batteriebetriebene Elektrolokomotive vorgesehen.	Schienengebundene, batteriebetriebene E-Lok, Plateauwagen	Gleisgebundene Einlagerungstechnik; Einlagerungstechnik für BSK nach VSG	Rig, seilgebunden, Coil-Tubing

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie)
Einlagerung	Drehplatte für Richtungsänderung vor Einlagerungskammer E-Lok schiebt Transportwagen auf Rädern (Hybridtransportsystem) in Einlagerungskammer	HLW-Shuttle nimmt Transportgebinde auf und setzt es vor „Fassade“ der Einlagerungskammer ab. Andocken des Transportgebindes und Herausnahme des Endlagerpakets Paket wird von „pusher robot“ in die Kammer geschoben Einbringen von Abstandshaltern zwischen einzelnen Gebinden	Einlagerung in horizontalen Einlagerungsstollen. Untertage im Zentralbereich Entnahme der Endlagerbehälter aus dem internen Transportbehälter, Umladung auf einen Einlagerungstrolley mit Bentonitauflager (Hydraulikwagen, ferngesteuert). Schienengebundene Einlagerung in die Einlagerungsstollen mittels Grubenlok oder Portalwagen (Konzeptstadium)	Einlagerung in vertikale Bohrlöcher mit spezieller Einlagerungsmaschine	Horizontale Lagerung: Das Gebinde wird mit einem Portalhubwagen in die Lagerposition gehoben. Bei der vertikalen Bohrlochlagerung erfolgt die Absenkung mit Hilfe einer Einlagerungsvorrichtung. Bei der horizontalen Bohrlochlagerung wird eine Drehscheibe und Einschubvorrichtung benötigt.	Temporär ortsfestes Hubportal und verlorener Einlagerungswagen (Streckenlagerung) Temporär ortsfeste Einlagerungsvorrichtung (Bohrlochlagerung)	Temporär ortsfeste Einlagerungsvorrichtung	Rig
VII. Thermische Auslegung								
Grenztemperatur Behälteroberfläche	100 °C (für die Pufferzone im Supercontainer)		140°C (10 Jahre nach Einlagerung erreicht)	< 100 °C (Bentonit-Buffer) Max. 1.700 W / Behälter	200 °C		100 °C	>>100 °C

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie)
Grenztemperatur Verfüllmaterial	100 °C		125 °C in der äußeren Hälfte des Bentonitbuffers	< 100 °C	Keine definierte Grenztemperatur am Übergang Verfüllmaterial / Wirtsgestein. Die Temperatur am Übergang Verfüllmaterial / Wirtsgestein stellt sich aufgrund physikalischer Verhältnisse ein.	100 °C	100 °C	>>100 °C
Grenztemperatur am Wirtsgestein		90 °C	100 °C	< 100°C	Siehe Grenztemperatur Verfüllmaterial.	100 °C	100 °C	>>100 °C
Lufttemperatur			Ca. 38 °C im Endlagerbergwerk aufgrund des geothermischen Gradienten		Max. Trockentemperatur von 52 °C oder max. Feuchtemperatur von 27 °C	Max. 30 °C Effektivtemperatur Sonderfälle 32 °C	Max. 30 °C Effektivtemperatur Sonderfälle 32 °C	Nicht zutreffend, da mannloser Betrieb
Strecken								
VIII. Bewetterung		Zwei Bewetterungssysteme Eins für den Nuklearbetrieb und eins für den parallel laufenden Errichtungsbetrieb	Zwei Bewetterungssysteme für ausziehende Wetter (kontrollierte Zone und konventioneller Bereich)					Nicht zutreffend, da mannloser Betrieb
Einziehende Wetter		Zwei Schächte	Lüftungsschacht	Ein Schacht	Schacht für einziehende Wetter	Schacht für einziehende Wetter (Förderschacht)		Nicht zutreffend, da mannloser Betrieb

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie)
Ausziehende Wetter		Drei Schächte Über beide Rampen wird direkt Frischluft von den Schächten kommend abgeführt.	Rampe (kontrollierte Zone aus HAA-Hauptlager), Betriebsschacht (konventioneller Bereich)	Über 3 Schächte (Einer im Zentrerteil, zwei peripher) und über Rampe	Schacht für ausziehende Wetter	Schacht für ausziehende Wetter (Gebindetransportschacht, Lutten geführt)		Nicht zutreffend, da mannloser Betrieb
Grubengebäude			Lüftungstunnel für die Frischluftzufuhr in die Betriebstunnel. Abluft durch Betriebstunnel Sonderbewetterung im HAA-Hauptlager und LMA-Lagerstollen (Filtersystem) Die Einlagerungstunnel werden nach Befüllung verfüllt. Keine weitere Bewetterung notwendig.	Grubengebäude soll weitgehend ohne Luttenführung auskommen. Wetterrichtung generell vom Einlagerungsbereich in Construction Zone möglich, nicht umgekehrt. Einlagerungstunnel („Sackgassen“) werden temporär (Einlagerungszeitraum) mit kleineren Lüftern bewettert. Die Einlagerungstunnel werden nach Befüllung verfüllt. Keine weitere Bewetterung notwendig.	Richtstrecken, Querschläge und Einlagerungskammern werden bewettert.	Gebindetransport und Haufwerktransportstrecken haben beide getrennte Frischwetter. Es gibt eine gemeinsame Abwetterstrecke. Einlagerungstrecken werden sonderbewettert.		Nicht zutreffend, da mannloser Betrieb
IX. Behälterkonzept (HAW)								

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie)
Behälterart	Supercontainer	Sechs verschiedene HAW Behälter	Zylindrische Stahlbehälter für BE und Behälter mit Glaskokillen	KBS-3-Referenz Design: Gusseisen Innenbehälter mit dichter Korrosionsbarriere aus Kupfer	Streckenlagerung: POLLUX®-10, POLLUX®-9, CASTOR® THT R/AVR, CASTOR® KNK , CASTOR® MTR 2, CASTOR® V/19, CASTOR® V/52, CASTOR® 440/84, CASTOR® HAW 20/28 CG und TS 28 V, TN 85, CASTOR® HAW 28 M, TGC 36 Bohrlochlagerung: BSK-(3)R	Streckenlagerung: POLLUX®-3 - Supercontainer-konzept Bohrlochlagerung: BSK-(3)R	BSK-Cu	DBC-R

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie)
Maße	Zylinderförmig Länge bis 6,25 m Durchmesser 2,15 m	Zylinderförmig Längen ca. 1 m bis 2,3 m Durchmesser ca. 0,6 m	Zylinderförmige Stahlbehälter für BE: Länge: 4,93 m Durchmesser: 1,05 m Mindestwandstärke: 0,15 m Behälter für Kokillen: Länge: 3,4 m Durchmesser: 0,95 m	Zylinderförmig Länge: ca. 4,855 m Durchmesser: ca. 1,05 m	Pollux® Behälter: Länge 6 m, Durchmesser 1,58 m POLLUX®-9 , POLLUX®-10 Behälter, L=5,5m, D=1,56m,; TLB: D=2, 5m L= ca.5m; BSK- R: L= 5m, D= 0,5m (konisch) Transferbehälter für HAW Kokillen: Länge 5,57 m, Durchmesser 1,3 m BSK-R: Länge 5 m, Durchmesser 0,52 m konisch Behälter für horizontale Bohrlochlagerung: z. B. CASTOR® V/19 : Länge 5,87 m Durchmesser 2,43 m Behälter für MAW Abfälle entsprechend Endlager Konrad Annahmebedingungen	Streckenlagerung: POLLUX®-3-Supercontainer Länge ca. 6,5 m, D (POLLUX®-3)=1,2m Bohrlochlagerung: BSK-R:	BSK-Cu: bis zu 5,04 m lang, Durchmesser: 0,54 m	Zylinderförmig; Länge bis 5 m; Durchmesser bis 55 cm.
Anschlagsvorrichtungen für Handhabung		Aussparungen an der Kopfseite		Aussparungen an Kopf- und Bodenseite	Vier Tragzapfen am Pollux® Behälter BSK-R: Tragpiliz	BSK-3: Tragpiliz	BSK-Cu: Tragepiliz	Aussparungen an der Kopfseite

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie)
Gewicht	Bis zu 60 t CSD-V: 32 t UOX-BE: 47 t - 70 t MOX-BE: 29,5 t	Max. 3,2 t	BE max. 30 t, verglaste Abfälle max. 15 t	Max. 24,7 t für SWR-BE Max. 26,8 t für DWR-BE	Pollux® Behälter max. 65 t Transferbehälter für vertikale Bohrlochlagerung: 52 t Behälter für die horizontale Bohrlochlagerung (z. B. Casstor® V/19): 124 t	Streckenlagerung: 86 t Bohrlochlagerung: BSK-3: 17 t		9 - 16 t (beladen)
Material	Stahl, Beton, Edelstahl	Unlegierter Stahl	Behälter für BE und Glaskokillen aus unbeschichtetem Stahl (Karbonstahl ASTM A516 Grade 70). Ggfls. ist eine Beschichtung/Ummantelung vorgesehen.	Kupfer (> 99,99 %, ca. 50 mm Wandstärke), Stahl (Deckel), Gusseisen, (hierbei im Gusseisen: Eisengehalt > 90 %, Kohlenstoff < 6 %, Silizium < 4 %, Kupfer < 0,05 %)	Sphäroguss (GGG40), Edelstahl, Polyethylen, Graphit, Borsilikatglas	Streckenlagerung: POLLUX®, Sand Bentonit, Stahlblech Bohrlochlagerung: Feinkornbaustahl (Werkstoff 1.6210), Bentonit	Feinkornbaustahl (Werkstoff 1.6210), Kupfer	Stahl (Konzept), andere Materialien denkbar

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie)
Gebindeaufbau	<p>Overpack aus 30 mm unlegiertem Stahl, verschweißt (Ummantelung des Inventars)</p> <p>Pufferzone aus Beton (Zone zw. Overpack und Envelope)</p> <p>Envelope aus 6 mm Edelstahl, verschweißt (Außenhülle des Gebindes)</p>	<p>Ein oder zwei Primärpakete in einem Endlagercontainer</p> <p>Wanddicke 53 mm - 65 mm</p> <p>4 Keramikpads am Container zum Schieben in der Endlagerkammer</p>	<p>Innendesign unterschiedlich für BE aus DWR und SWR</p> <p>4 DWR- oder 9 SWR-BE in einem Endlagerbehälter</p> <p>Für verglaste Abfälle sind zwei HAW-Kokillen pro Endlagerbehälter vorgesehen.</p>	<p>Innendesign unterschiedlich für DWR und SWR BE</p> <p>Innenbehälter aus Gusseisen, Deckel aus Stahl,</p> <p>Ummantelung aus hochreinem (99,99 %) Kupfer, Wandstärke 50 mm (nominal)</p>	<p>Pollux® Behälter aus Feinkornbaustahl (Werkstoff 1.6210), Wandstärke 160 mm, fünf Kammern zur Aufnahme von Brennstäbenbüchsen mit Brennstäben</p> <p>CASTOR® Behälter (TLB) zur Aufnahme von BE aus Forschungsreaktoren, zylindrischer Grundkörper aus Gusseisen mit Kugelgraphit (Werkstoff 0.7040)</p>	<p>Streckenlagerung: POLLUX®, Sand, Bentonit, Stahlblech</p> <p>Bohrlochlagerung: Stahlblech (40 mm), Bentonit</p>	<p>BSK-Cu: Stahlblech (40 mm) mit Kupferummantelung</p>	<p>DBC-R aus 50 mm unlegierter Stahl, verschweißt (Ummantelung der Brennstäbe und Kokillen)</p>

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie)
Behälterstabilität	100 Jahre Handhabbarkeit für Rückholung 500 Jahre für HAW Kokillen 2.000 Jahre für die BE Behälter Radionuklidrückhaltung mind. für „thermische Phase“. Die Thermische Phase ist die Phase, in der die WG-Temperatur über 25°C liegt /PIR 13/. Für verglaste Abfälle beträgt die thermische Phase ca. 70 Jahre. Für abgebrannte BE ca. 2.000 Jahre /PIR 13/.		Muss für mindestens 1.000 Jahre gewährleistet sein: Wandstärke BE: 120 mm Verglaste Abfälle: 140 mm	100.000 Jahre und mehr Anforderung aus dem schwedischen Regelwerk: Gewährleistung der Barrierefunktionen min. 10.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers	Handhabbarkeit der Endlagerbehälter muss nach Endlager Verschluss für Zeitraum von 500 Jahren gewährleistet sein			Handhabbarkeit kann aufgrund der Endlagerungsbedingungen derzeit über 500 Jahre noch nicht garantiert werden
Mechanische Auslegung	Für Handhabung, Handhabungsunfälle (Absturz), Rückholung		Für Handhabung Maximale horizontale Hauptspannung 29 MPa, minimale horizontale Hauptspannung 22 MPa, vertikale Spannung 22 MPa, hydrostatischer Druck 9 MPa, Quelldruck des Bentonit 4 MPa	Isostatischer Druck: 45 MPa 5 cm shear movement at velocity of 1 m/s bei $T_{min} = 0 \text{ °C}$	Für Handhabung, Handhabungsunfälle (Absturz)			Handhabung, Lastaufbau, Gebirgsdruck, Temperatur

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie)
Thermische Auslegung	Ausgelegt für min. 250 W/m Wärmeleistung des Inventars		Entsprechend ISO 15156 Ca. 0,05 W/mm/K	Max. 1.700 W	Muss die aufgrund des radioaktiven Zerfalls entstandene Wärme abführen können.		100 °C	Ja
Wärmeleitfähigkeit			Entsprechend Auslegung (< 120 °C an Behälteroberfläche)	Entsprechend Auslegung < 100 °C an Behälteroberfläche	Entsprechend Auslegung		15 W/kg/K	
Abschirm Eigenschaften	25 µSv/h in 1 m Abstand		< 2 mSv/h bei Kontakt mit der Behälteroberfläche	< 1 Gy/h an Behälteroberfläche	Bis auf BSK alle selbstabschirmend	Supercontainer: selbstabschirmend; BSK-3: Nicht selbstabschirmend → Transferbehälter	Nicht selbstabschirmend → Transferbehälter	Nicht selbstabschirmend; Bohrspülung
Korrosionseigenschaften	Keine Punktkorrosion Gleichmäßige Korrosionseigenschaften für lange Zeiträume		Korrosionsrate muss geringer sein als 10 µm pro Jahr < 1000 mSv/h an der Behälteroberfläche zur Beschränkung der strahleninduzierten Korrosion	Die Dicke des Kupfermantels (5 cm) soll für den Bewertungszeitraum von 1 Mio. Jahre für das Referenzszenarium eine ausreichende Korrosionsbarriere darstellen. Nach 100.000 Jahren keine Durchdringung des Kupfermantels durch Korrosion.				Korrosionsstabil während Einlagerung bis zum Bohrlochverschluss

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie)
X. Verfüll- und Verschlusskonzepte								
Einlagerungsstrecken	<p>Zeitnahe Verfüllung mit Versatzmaterial abschnittsweise alle 30 m (Tonbasis bzw. Zementversatz)</p> <p>Jede Einlagerungsstrecke wird mit einem 25 m Verschlussbauwerk verschlossen</p>	<p>Keine Hohlraumverfüllung zw. Gebinde und Kammerwand</p> <p>Kammerverschluss mit Pfropf</p> <p>Strecke ab Pfropf wird mit Tonmaterial versetzt</p>	<p>Vollständige Verfüllung der Einlagerungsstrecken mit Bentonitgranulat mittels Verfüllwagen mit Spiralförderer</p> <p>Versiegelung der Einlagerungsstrecken mit Betonpropfen</p>	<p>„Backfill“, Bentonitblöcke</p> <p>Am Übergang zur Betriebsstrecke: mehrschichtiges Abdichtungsbauwerk (Beton)</p>	<p>Nach Einbringen eines Behälters wird der entsprechende Abschnitt mit Salzgruß verfüllt.</p>	<p>Verfüllung mit Haufwerk aus der Streckenauf-fahrung</p>	<p>Versatz mit Bentonit</p>	<p>Bohrlochverfüllung mit verschiedenen Materialien</p>
Betriebsstrecken	<p>Verfüllung mit Sand-/Tongemisch (zeitnah)</p>	<p>Zugangsgalerien erhalten Versiegelungen an bestimmten Punkten in den untertägigen Strukturen</p>	<p>Teilweise Verfüllung (Umladebereiche, Abzweiger, manche Betriebstunnel) bis Ende der Beobachtungsphase</p> <p>Verfüllung mit Bentonit</p>	<p>Kompaktiertes Gesteinsmaterial oder vorkompaktierte Tonkomponenten</p>	<p>Je nach Fortschritt der Einlagerung werden nicht mehr benötigte Querschläge und Richtstrecken mit Salzgruß versetzt.</p>	<p>Verfüllung mit Haufwerk aus der Streckenauf-fahrung</p>	<p>Versatz mit Bentonitgemisch bzw. Ton</p>	<p>Bohrlochverfüllung mit verschiedenen Materialien</p>

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie)
Verschlussbauwerke	Zwei Verschlussbauwerke hintereinander angeordnet Wasserdichte Ausführung	Zwei Begrenzungen aus Beton, dazwischen Verfüllung mit quellfähigem Ton und Entfernung des Liners (Rampen und Schächte)	Betonpropfen zur Abdichtung zwischen Einlagerungs- und Betriebsstrecken (sog. Zwischensiegel) Für die Rampen und Schachtversiegelung werden u. a. Dichtelemente aus Bentonitgranulat und eine Bentonit/Sand-Mischung verwendet.	Mehrschichtige Abdichtungsbauwerke (Beton) dichten Einlagerungsstrecke zur Betriebsstrecke ab Haben keine (ausgewiesene) Barrierefunktion Schachtabdichtung soll im oberen Teil des Schachtes unbeabsichtigtes Eindringen verhindern.	An ausgewählten Stellen werden Verschlussbauwerke erstellt. Dies betrifft den Einlagerungsbereich und den Schacht.	Bohrlochverschluss mit Bentonit und Sand Streckenverschluss: mit Bentonit und Sand Schachtverschluss: mit Bentonit und Sand	Konzept: Bentonitversatz, Filterschicht, Widerlager, Ringraumdichtung Bentonit, Asphaltabdichtung, Ton-/Bentonitgemisch	Bohrlochverschlüsse mit Salz, Ton, Asphalt möglich
XI. Rückholbarkeit	Gesetzlich gefordert	Gesetzlich gefordert	Gesetzlich gefordert		Gesetzlich gefordert			Gesetzlich gefordert
Gesetzlicher Rahmen	Rückholbarkeit soll berücksichtigt werden	Planning Act 2006-739, 28. Juni 2006 Forderung reversibler Endlagerung in tiefen geologischen Formationen	Eine Rückholoption ist im Kernenergiegesetz bis zum allfälligen Verschluss vorgeschrieben. Die Rückholung muss ohne großen Aufwand möglich sein und es sind Vorkehrungen zur Erleichterung zu treffen ohne die passiven Sicherheitsbarrieren zu beeinträchtigen.	Kein regulatorisches Gebot. Maßnahmen, durch die möglicherweise das Barriersystem geschwächt werden könnte (Monitoring, Gewährleistung von Rückholbarkeit, Zugangserleichterung), sind mit Behörde abzustimmen	Im Standortauswahlgesetz verankert			Alternative Option, Standortauswahlgesetz

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie)
Zeitraum	Innerhalb der Betriebsphase (100 Jahre ab Einlagerungsbeginn) bis Verfüllung der Hauptstrecken	Mind. 100 Jahre während der Betriebsphase	Bis Ende der Betriebsphase inkl. Beobachtungsphase (ca. 65 Jahre)		Bis Ende Betriebsphase zu gewährleisten (ca. 40 Jahre Einlagerungsbetrieb + Beobachtungsphase)			Jeweils ab Fertigstellung eines Bohrlochs bis zu dessen Verschluss nach Einlagerung: ca. 3 Jahre / Bohrloch
Rückholkonzept	Keine Beeinträchtigung von Betrieb und Langzeitsicherheit Reversible Einlagerungsschritte		Vor Inbetriebnahme ist die Rückholtechnik und deren Funktionstüchtigkeit nachzuweisen. Zur Entscheidungsfindung wird das Endlager in einem Pilotlager überwacht. Rückholungskonzept wird ab 2022 vorgelegt.	Rückholungskonzept nicht gefordert. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Behälterstandzeit jedoch möglich. Machbarkeit durch Praxis-Versuch bestätigt	Technische Machbarkeit ist für Genehmigung nachzuweisen Reversible Einlagerungsschritte			Nur für den Einlagerungszeitraum bis Verschluss sinnvoll; danach schwer bis unmöglich

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie)
Rückholtechnik	Möglichst Nutzung der Einlagerungstechnik	Möglichst Nutzung der Einlagerungstechnik Aber z. B. Puller Roboter statt Pusher Roboter in HLW-Einlagerungskammern	Unterschieden wird zwischen „einfacher“ (unverfüllte Bereiche) und „normaler“ Rückholung (verfüllte Bereiche). Arbeitsschritte: Entfernen der Versiegelung, Entfernen und Aufladen der Bentonitverfüllung, Lösen und Aufladen der Endlagerbehälter, Entfernen und Aufladen der Bentonitauf-lager. Entwicklung eines eigenen Rückholfahrzeu-ges inkl. Bagger-, Bohr-, Rückhol- und Felssiche-rungsmodul	Generelle technische Machbarkeit nachgewiesen durch Versuch Nach Streckverschluss: Entfernung Streckenabdichtung (Plug), dann Entfernung der Streckenverfüllung (Backfill). Bentonit-Buffer wird mit Salzwasser (Salzgehalt 5-10 Gew.-%) aufgelöst und abgepumpt. Anschließend Behälterrückholung mit Einlagerungstechnik	Möglichst Nutzung der Einlagerungstechnik	Möglichst Nutzung der Einlagerungstechnik		Umkehrung der Einlagerung
Zugang	Wiederauffahrung der Einlagerungsstrecken		Wiederauffahrung vorhandener Betriebs- und Einlagerungsstrecken	Wiederauffahrung vorhandener Strecken	Neuauffahrung bzw. Wiederauffahrung von Strecken	Wiederauffahrung der Einlagerungsstrecken		Wiederaufwältigen der Bohrung

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie)
Thermische Anforderung (Arbeitsbedingungen)			Arbeitsbedingungen durch normale Bewetterung möglich	Max. 65 °C einige 100 Jahre nach Streckenverfüllung. Arbeitsbedingungen in Strecken kann durch normale Bewetterung hergestellt werden	Die Vorgabe für Arbeitsbedingung für Bergleute verlangt, dass eine Trockentemperatur von 52 °C oder Feuchttemperatur von 27 °C nicht überschritten werden darf.	30 °C	30 °C	Nicht zutreffend, da mannlose Einlagerung
Bewetterung			Arbeitsbedingungen durch normale Bewetterung möglich	Arbeitsbedingungen in Strecken können durch normale Bewetterung hergestellt werden	Bewetterungsstrecken für Rückholung parallel zu Rückholungsstrecken Längere Bewetterung vor Rückholung zur Abkühlung			Nicht zutreffend, da mannlose Einlagerung
XII. Monitoring	Gesetzlich nicht gefordert aber wird geplant	Ja						

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie)
Monitoring-Konzept		<p>Passiv sicheres System ohne Erfordernis von Monitoring</p> <p>Erste ILW-LL-Kammern mit sehr vielen Instrumenten, frühe Versiegelung einer Kammer, Beobachtung dieses geschlossenen Systems</p> <p>HLW-Kammern: Witness-Kammern mit vielen Instrumenten</p> <p>Current-Kammern: weniger Instrumente</p> <p>Standardkammern: nur Instrumente für Betriebssicherheit</p> <p>Opferkammern: Öffnung nach Jahrzehnten zur Bestimmung von Korrosionsgeschwindigkeiten</p>	<p>Monitoring ist im Kernenergiegesetz gefordert.</p> <p>Die Überwachung erfolgt in einem Pilotlager, das die gleichen Lagereigenschaften aufweist wie das Hauptlager, aber räumlich separiert im Bergwerk errichtet wird. Rückschlüsse sollen auf das Hauptlager übertragbar sein.</p> <p>Ferner erfolgt durch ein festzulegendes Überwachungsprogramm eine Umweltüberwachung der Radioaktivität von Quell- und Grundwässern, Böden und der Atmosphäre.</p>	<p>Monitoring nach Verschluss kein regulatorisches Gebot.</p> <p>Monitoring ist geplant für die Betriebszeit des Endlagers. Mit dem Verschluss werden vorhandene Monitoring Systeme zurückgebaut.</p> <p>Ziele des Monitorings: Einfluss auf Geo- und Biosphäre bestimmen</p> <p>Verifizierung, dass die <i>design premises</i> eingehalten werden (Bestätigung <i>initial state</i>).</p>	<p>Monitoring-Konzepte werden derzeit diskutiert.</p>	<p>Monitoring-Konzepte werden derzeit diskutiert.</p>		<p>Nach Verschluss durch Monitoring-Bohrungen möglich</p>

	Belgien (Ton)	Frankreich (Tongestein)	Schweiz (Opalinuston)	Schweden (Kristallin)	Deutschland (Salz)	Deutschland (Tonstein)	Deutschland (Kristallin)	Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie)
Parameter		Bisher nur Übersicht möglicher Parametermessungen. Noch keine Auswahl getroffen (2013)	Wasserzusammensetzung, petrophysikalische Parameter, Geometrie der Hohlräume	Geowissenschaftliche und ökologische Parameter. Baseline Study und Monitoring der Veränderungen durch Bau und Betrieb des Endlagers (Geo- und Biosphäre).			Wasserdruck, Grundwasserstand oder elektrische Leitfähigkeit	Zu bestimmen
Instrumentierung		Verschieden stark instrumentierte Kammern						Zu bestimmen
Zeitraum			Bis Ende der Beobachtungsphase, d. h. Verschluss des vollständigen Endlagers	Bis zum Verschluss des Endlagers				Wählbar

2.1.2 **Grundanforderungen an die Endlager- und Behälterkonzepte**

Die betrachteten nationalen und internationalen Endlagerkonzepte unterscheiden sich sowohl in Bezug auf die Wahl des Wirtsgesteins (Ton/Tonstein, Granit, Salz), der Einlagerungskonzepte (Streckenlagerung, Bohrlochlagerung), als auch der Behälterkonzepte (Ausmaße, Gewicht, Materialien, Integritätszeitraum). Die benötigten Zeiträume von mehreren Jahrzehnten von Beginn der Einlagerung bis zum Verschluss des Endlagers (Betriebsphase), bzw. bis zu einer eventuellen Rückholung oder Bergung (s. Kapitel 2.2), müssen für die Behälterintegrität und Handhabbarkeit der Behälter eingeplant werden, sowie die für deren Handhabung verfügbare Technik.

Endlagerbehälter für radioaktive Abfälle haben verschiedene Funktionen zu erfüllen. Unterschiedliche Wechselwirkungen dieser Funktionen sind für das Design und die sicherheitstechnische Auslegung zu betrachten. Die Behälter stellen im Konzept des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle die erste wesentliche technische Barriere zur Rückhaltung der Radionuklide dar (passive Sicherheit). In der Betriebsphase (Einlagerungsbetrieb, eventueller Rückholungsbetrieb) sind zudem Strahlenschutzaspekte und die Arbeitssicherheit zu betrachten.

Das Inventar der Behälter (Abfallmenge und Abfallart) bestimmt zum einen die Wärmeleistung und kann zum anderen durch die radioaktive Strahlung das Behältermaterial und damit dessen Eigenschaften beeinflussen. Dies ist bei der Auslegung des Behälters für den Störfall (mechanische, thermische Einwirkungen, Behälterintegrität) zu beachten, damit die Sicherheitsfunktion „Rückhaltung der radioaktiven Stoffe“ erhalten bleibt.

Die Integrität bzw. die Handhabbarkeit der Einlagerungsbehälter ist wesentlich für die technische Umsetzung der Einlagerung oder auch für eine eventuelle Rückholung der Abfallgebinde (s. Kapitel 2.2). Das Einlagerungskonzept (Streckenlagerung, Bohrlochlagerung) und das Wirtsgestein sind Randbedingungen für die Entwicklung von technischen Lösungen zur Handhabung der Behälter. So limitiert beispielsweise der Zugang zum Endlagerbergwerk (Schacht oder Rampe) das Gewicht und die Größe der Behälter. Dies wirkt sich unmittelbar auf die Menge der radioaktiven Abfälle aus, die in einen Behälter eingebracht werden können.

Neben der Langzeitbeständigkeit von Behältersystemen (Langzeitsicherheit) und der Handhabbarkeit für eine ggf. spätere Bergungsoption oder auch Rückholungsoption, stehen in der Betriebsphase des Endlagers (Einlagerungsbetrieb und optionaler Rückholungsbetrieb) zusätzliche weitere Anforderungen an die Behälter im Vordergrund. Nach /SCH 16/ gibt es allgemeine Anforderungen, die sich auf die Einhaltung von Dosisleistungsgrenzwerten, die Kritikalitätssicherheit und Freisetzungsgrenzwerte beziehen. Endlagerspezifische Anforderungen ergeben sich in Hinblick auf die zulässige Wärmeleistung, Behälterabmessungen und Behältermassen sowie die Berücksichtigung von potentiellen Störfällen. Das Behälterdesign muss sowohl in der Betriebsphase als auch ggf. bei einer möglichen Rückholung die Handhabbarkeit, den Schutz des Personals, die Abschirmung (ggf. in Verbindung mit einem Transferbehälter) und Aktivitätsrückhaltung und die mechanische Integrität bei dynamischer Belastung sicherstellen.

2.1.2.1 Tonstein/Ton

Das Wirtsgestein Tonstein/Ton wird aufgrund seiner Barriereigenschaften als günstig für die Langzeitisolation von radioaktiven Abfällen angesehen. Diese Eigenschaften sind vor allem eine geringe hydraulische Durchlässigkeit, niedrige Porosität, Dominanz von diffusiven Transportprozessen, plastisches Verhalten, gute Puffer- und Sorptionseigenschaften und reduzierende Bedingungen /BOL 11a/. Eine der wesentlichen Grundanforderungen an Endlager in tonigen Wirtsgesteinen ist es daher, diese für die Endlagerung vorteilhaften Eigenschaften nicht zu kompromittieren.

Im Wirtsgestein Tonstein stellen sich aufgrund der Gesteinseigenschaften, z. B. der Plastizität und der im Vergleich zu Salzgestein und Kristallin geringeren Festigkeit aus bau- und geotechnischen Stabilitätsgründen besondere Anforderungen z. B. an den Ausbau der Strecken. Aufgrund der geringeren Standfestigkeit müssen verstärkte Maßnahmen für den Ausbau getroffen werden. Zum Beispiel werden die Einlagerungsstrecken anhand des geomechanischen Spannungsfeldes orientiert, d. h. entlang der maximalen horizontalen Hauptspannung ausgerichtet (Anhänge 01, 02, 03). Hierdurch wird der Querschnitt der Einlagerungsstrecken am geringsten beansprucht und geringere Felsicherungsmaßnahmen können ausreichend sein (z. B. Verankerung mit Draht- und Armierungsnetzen im Schweizer Konzept). Im französischen Endlagerkonzept (Anhang 02) ist ein Komplettausbau der untertägigen Strecken und Kammern vorgesehen. Die Einlagerungskammern für die HAW-Abfälle (horizontale Bohrlöcher) werden dabei mit einem Stahl liner ausgebaut. Ein Grund hierfür liegt u. a. in den Stabi-

litätseigenschaften des Wirtsgesteins und der langen vorgesehenen Betriebszeit von > 100 Jahren; ein weiterer in der Anforderung der Rückholbarkeit der eingelagerten radioaktiven Abfälle (s. Kapitel 2.2). Die eingebrachten Ausbau- und Endlagermaterialien müssen aufgrund möglicher korrosiver Wirkungen zudem bei der Bewertung der Barriereintegrität berücksichtigt werden /BOL 11a/.

Bei den betrachteten Endlager-Konzepten im Tonstein (Schweiz, Frankreich) sind als Zugangsbauwerke Kombinationen aus Rampen- und Schachtbauwerken vorgesehen. Im belgischen Endlager-Konzept (nicht-verfestigter Ton) wird derzeit ausschließlich mit Schachtbauwerken geplant. Die Art und Auslegung der Zugangsbauwerke resultiert aus einer während der Planungsphase stattfindenden Optimierung von betrieblichen, baulichen und sicherheitstechnischen Aspekten. Der Ausbau der Zugangsbauwerke ist hierbei nicht nur vom Wirtsgestein abhängig, sondern auch von den zu durchstoßenden überliegenden geologischen Schichten (Deckgebirge). Insbesondere die Auslegung von Drainagen zur Wasserführung im Gestein ist abhängig von den geologischen und hydrogeologischen Eigenschaften.

Das Bewetterungskonzept muss den Feuchtigkeitsgehalt in der Luft in der untertägigen Anlage regulieren. Der zusätzliche Feuchtigkeitseintrag in das tonreiche Wirtsgestein durch z. B. einziehendes Wetter darf nicht unzulässig hoch sein.

Bei Endlager-Konzepten im Tonstein (z. B. Schweiz, Anhang 01) sieht das Barrierekonzept als Anforderung vor, dass die Behälter die Einschlusswirksamkeit der radioaktiven Abfälle für mindestens 1.000 Jahre gewährleisten müssen um eine ausreichende Zeitdauer bis zur vollständigen Quellung des umgebenden Bentonits zu gewährleisten. Hierzu müssen die Behälter so ausgelegt werden, dass diese gegenüber der zu erwartenden isostatischen Belastung und Scherbewegungen beständig sind. Diese mechanischen Beanspruchungen resultieren u. a. aus der Auflast des Gebirges und dem bei der Aufsättigung des Bentonits entstehenden Quelldruck. Ferner darf es bei dem zu erwartenden geochemischen Milieu keine flächenhafte Korrosion oder Lochfraß geben sowie unzulässige thermische Beanspruchungen, die durch die eingelagerten wärmeentwickelnden Abfälle entstehen, welche die Einschlusswirksamkeit gefährden. Die Auslegungs-Anforderung an die Wärmeleitfähigkeit der Behälter und damit an die maximale Behälteroberflächentemperatur liegt beim Schweizer Endlager-Konzept bei einer Temperatur 140 °C bis 160 °C und einer Maximaltemperatur von etwa 70 °C bis 95°C an der Grenze zwischen Bentonit und Wirtsgestein. Im französischen Konzept darf eine Temperatur von 90 °C im Wirtsgestein nicht überschritten werden.

2.1.2.2 Kristallin

Kern des Sicherheitskonzepts des betrachteten KBS-3 Endlagerdesigns in kristallinem Wirtsgestein (Anhang 04) ist ein Mehr-Barrieren Konzept. Hierbei wird der Kernbrennstoff von mehreren Sicherheitsbarrieren umgeben, angefangen bei der Brennstoffhülle über die Einkapselung in einen Kupferbehälter, der Einbringung von Bentonit zum Schutz des Behälters vor dem Zutritt von korrosiven Flüssigkeiten (Wasser) und der Einlagerung in einem Endlagersystem in ca. 500 m Tiefe in granitischem Gestein.

Für die Festigkeit des Gebirges sind v. a. die Trennflächen in den konturnahen Bereichen der Strecken bestimmend. Ein Ausbau wird nach /STA 15/ nur in besonders stark geklüfteten Abschnitten notwendig. Das Gebirge bildet einen Gebirgstragring aus und ist dadurch selbst tragend. Da das Wirtsgestein keine „selbsteilenden“ Eigenschaften wie Salz oder Ton besitzt, die radioaktiven Abfälle zeitnah zu umschließen, wird eine technische Barriere „Versatz“ wie bei Einlagerung in Ton/Tonstein benötigt.

Grundlegende regulatorische Anforderungen an das Sicherheitskonzept des KBS-3 Endlagerkonzeptes basieren daher auf einem System gestaffelter Barrieren. Hierbei muss das Versagen einer Barriere durch die Sicherheitsfunktionen der anderen Barrieren so weit wie möglich aufgefangen werden (Defense-in-Depth-Prinzip).

Bei Endlagerkonzepten in kristallinen Gesteinen stellen also aufgrund der Tatsache, dass kristallines Wirtsgestein eher in geringem Maße zur Einschlusswirksamkeit des Endlagersystems beiträgt, technische Barrieren die Hauptbarriere dar. Insbesondere den Behältern wird eine primäre Sicherheitsfunktion zugeordnet (s. Anhang 04). Die Anforderungen an die Behälterstabilität sind daher, dass diese solange wie möglich intakt bleiben und die in den Abfällen enthaltenen Radionuklide wirksam von der Biosphäre isolieren. Hierzu dürfen weder die Korrosion, die isostatische Belastung oder der Einfluss von Scherkräften unzulässig hoch sein. Bentonit als weitere Barriere in den Einlagerungsbohrlöchern umgibt die Behälter und hat die Aufgabe, den Endlagerbehälter vor Wasserzutritt zu schützen, ungünstige Bedingungen für sulfatreduzierende Bakterien zur Limitierung einer Sulfid-Korrosion der Behälter zu schaffen, den Endlagerbehälter in seiner Lage zu halten und (erdbebenbedingte) Scherbewegungen vom Behälter abzufedern. Der Quelldruck des Bentonits darf nicht zu einer unzulässigen isostatischen Belastung des Behälters führen.

Bezüglich der Behälterkorrosion ist die regulatorische Anforderung (Schweden) an das skandinavische KBS-3 Konzept (Anhang 04), dass die Barrierefunktionen mindestens 10.000 Jahre gewährleistet sind (/SSM 08/, Anhang 04). Der Betreiber SKB zeigt in seinem Sicherheitsnachweis /SKB 11/, dass im Referenzszenarium für den Ausleungszeitraum von 1 Mio. Jahre eine ausreichende Korrosionsbarriere gegeben ist. In seinem Sicherheitsnachweis zeigt SKB zudem, dass bei pessimistischen Annahmen bzgl. der Erosion des Buffers, der Behälterkorrosion und dem Radionuklidtransport das radiologische Risiko um zwei Größenordnungen niedriger ist bezogen auf das regulatorisch maximal zulässige Risiko einer radiologischen Freisetzung von 10^{-6} für den Zeitraum von 100.000 Jahren nach Verschluss des Endlagers /SKB 11/. Die Behälter müssen zudem einem isostatischen Druck von 45 MPa und einer Scherbewegung von 5 cm (bei 1 m/s und 0 °C) standhalten können.

Die Behälter müssen sowohl Radionuklide als auch Alpha-/Beta-Strahlung zurückhalten können. Gamma- und Neutronenstrahlung wird von den Behältern teilweise zurückgehalten, daher ist während des Transports und der Handhabung während des Einlagerungsbetriebes eine zusätzliche Strahlenschutzabschirmung notwendig. Neben der Strahlung, die aufgrund von betriebssicherheitlichen Anforderungen im schwedischen KBS-3 Konzept eine Dosisleistung von 1 Gy/h an der Behälteroberfläche nicht überschreiten darf, wird über die Behälter Wärme, welche beim Zerfall der Radionuklide entsteht, an die umgebende technische Barriere Bentonit und das umgebende Wirtsgestein abgegeben. Diese Wärme kann sich auf das Behältermaterial als auch auf die Eigenschaften des Bentonits sowie die gebirgsmechanischen Eigenschaften des umgebenden Wirtsgesteins auswirken und darf diese nicht ungünstig verändern. Die Auslegungs-Anforderung liegt für Granit im KBS-3 Konzept bei einer Temperatur < 100 °C an der Behälteroberfläche.

Bezogen auf das Einlagerungskonzept sollen die Auffahrung der Einlagerungsbereiche und der Einlagerungsvorgang nicht parallel ablaufen, sondern sind administrativ voneinander getrennt. Einlagerungsstrecken, in denen die Einlagerung abgeschlossen ist, werden mit Bentonit verfüllt und verschlossen, so dass immer nur Teile der Einlagerungsbereiche zur gleichen Zeit geöffnet sind. Um Kollisionen oder andere Unfälle oder Vorkommnisse mit Endlagerbehältern während des Einlagerungsbetriebes zu vermeiden, dürfen sich jeweils maximal drei Behälter gleichzeitig im untertägigen Handhabungsprozess befinden. Im Transportprozess nach unter Tage befindet sich jeweils ein Behälter, ein Behälter befindet sich in der Übergabehalle unter Tage und ein Behälter

befindet sich im Einlagerungsprozess (Anhang 04). Weitere (maximal zehn) Behälter befinden sich in einem obertägigen Pufferlager, so dass sich insgesamt maximal 13 Behälter handhabbar auf der gesamten Anlage befinden dürfen. Das radioaktive Inventar dieser dreizehn Behälter ist daher auch das maximale Inventar, das gleichzeitig während der Betriebsphase gehandhabt werden darf.

Bezüglich des Sicherheitsmanagements besteht die Anforderung, dass sämtliche Handlungen mittels eines klar dokumentierten Sicherheitsmanagementsystems auf aktuellem Stand geregelt, kontrolliert, bewertet und ggf. weiterentwickelt werden. Dies betrifft unter anderem die Schulung und das Verantwortungsbewusstsein des Personals, eine klare Ausweisung der Verantwortlichkeiten, Vorhandensein ausreichender Ressourcen für sicherheitsgerichtete Maßnahmen sowie routinemäßige Sicherheitsüberprüfungen der Anlage. Nach Inbetriebnahme ist die Anlagensicherheit im Rahmen eines jährlich zu überprüfenden Sicherheitsprogramms ständig zu analysieren und zu bewerten. Ziel ist es, auf der Basis von Betriebserfahrungen die Anlagensicherheit durch technische und administrative Maßnahmen kontinuierlich zu verbessern.

2.1.2.3 Salz

Steinsalz in steiler Lagerung als Wirtsgestein für hochaktive radioaktive Abfälle wurde in Deutschland seit nahezu 40 Jahren intensiv untersucht (s. Anhang 05). In einer Reihe von Forschungsarbeiten wurden entsprechende Endlagerdesigns für diese Option entwickelt und ihre Machbarkeit und Sicherheit bewertet. Die neuesten Arbeiten zum Endlagerdesign im Forschungsprogramm KOMTESSA /BOL 17/ basieren auf Arbeiten im Rahmen des Forschungsvorhabens „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben „VSG“ (u. a. /FIS 13/). Im Forschungsvorhaben VSG wurde für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle auf Basis der Kenntnisse von konzeptionellen Einzeluntersuchungen /BOL 11b/, /BOL 12/ und /PEI 12/ ein Endlagerdesign für einen konkreten Standort im Salz (Salzstock Gorleben) entwickelt, der den derzeitigen Stand von W & T bei der Endlagerung im Wirtsgestein Salz in steiler Lagerung widerspiegelt. Beim Sicherheits- und Nachweiskonzept der VSG wurden hierbei die sicherheitstechnischen Vorgaben der deutschen Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 10/ zugrunde gelegt /FIS 13/.

Das Wirtsgestein Steinsalz wird aufgrund seiner geringen Durchlässigkeit, seinen Kriechigenschaften, der hohen Wärmeleitfähigkeit und den gebirgsmechanischen Eigenschaften als günstig für die Einlagerung von radioaktiven Abfällen angesehen (u. a.

/BOL 11a/). Die Hauptbarriereigenschaften werden im Steinsalz dem Wirtsgestein selber zugeschrieben. Das viskoelastoplastische Materialverhalten von Salzgestein und Salzgrus führt letztendlich zu einem vollständigen Einschluss der Endlagerbehälter /BOL 14a/. Die Geschwindigkeit der Salzgruskompaktion hängt dabei u. a. vom Feuchtegehalt im Salzgrus und der Umgebungstemperatur ab. Sollen die Endlagerbehälter nach Verschluss des Endlagers eine Barrierefunktion behalten (z. B. weil die Option der Rückholbarkeit/Bergbarkeit besteht, s. Kap. 2.2) müssen sie aufgrund des festen Einschlusses durch das aufkonvergierte Steinsalz mechanisch auf den herrschenden Gebirgsdruck ausgelegt sein /BOL 11a/.

Im Sicherheits- und Nachweiskonzept der VSG /MÖN 12/ wurden die bestehenden deutschen Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ in Form von überwiegend qualitativen Zielsetzungen und Maßnahmen auf einen konkreten Standort (Gorleben) präzisiert. Auf dem Sicherheits- und Nachweiskonzeptes basiert die entsprechende Entwicklung eines konkreten Endlagerkonzeptes auf Basis standortspezifischer Befunde in Gorleben. Das Sicherheits- und Nachweiskonzept beinhaltet auch alternative Einlagerungskonzepten von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfallgebinden vom Typ POLLUX/CASTOR in horizontalen Strecken, oder von Transport- und Lagerbehältern (TLB, Typ CASTOR) in horizontalen Bohrlöchern sowie von Brennstabkokillen (BSK) in vertikalen Bohrlöchern, jeweils in Kombination mit einem optionalen Co-Disposal von Abfallgebinden mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in horizontalen Einlagerungskammern. Ausgehend von den Leitgedanken, die auf Basis der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ die sichere und langfristige Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle gewährleisten sollen, wurde ein Sicherheitskonzept abgeleitet und strategische planerische und technische Maßnahmen für die Entwicklung des Endlagerkonzeptes und für die Auslegung des Endlagerbergwerks abgeleitet. U. a. wurden hierzu Anforderungen an diese Maßnahmen formuliert. Für das Nachweiskonzept wurden erforderliche Einzelnachweise identifiziert und die Bewertungsmaßstäbe aufgestellt. Die Reflektion der Anforderungen aus dem Sicherheits- und Nachweiskonzeptes auf die Ergebnisse der konzeptionellen Einzeluntersuchungen und den anschließenden Sicherheitsanalysen in /KOC 12/ und /LAR 13/ der VSG erfolgte in einer Synthese in /FIS 13/.

Ausgehend von den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ wurden im Sicherheits- und Nachweiskonzept der VSG /FIS 13/ drei Grundanforderungen für die Endlagerung im Steinsalz definiert:

- A) Die eingelagerten Abfallgebände sollen schnell und möglichst dicht vom Salzgestein im Verbund mit den geotechnischen Barrieren eingeschlossen werden (Einschlussgedanke).
- B) Der ausgewiesene einschlusswirksame Gebirgsbereich¹ bleibt im Nachweiszeitraum erhalten und seine Barrierefunktion (geologische Barriere und geotechnische Barrieren) wird weder durch interne noch durch externe Vorgänge und Prozesse beeinträchtigt (Integritätsgedanke/Wartungsfreiheit).
- C) Eine Kritikalität muss in jeder Phase der Endlagerentwicklung ausgeschlossen werden (Kritikalitätsausschluss).

Ferner ergibt sich aus /BMU 10/ die Grundanforderung an Abfallbehälter, dass diese „für alle wahrscheinlichen Entwicklungen über einen Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagerbergwerks bei einer eventuellen Bergung handhabbar sein müssen, wobei es zu keiner Freisetzung von Aerosolen aus dem Behälterinneren kommen darf“ /FIS 13/.

Gegenüber anderen Wirtsgesteinstypen zeichnet sich Steinsalz durch eine geringere Temperaturempfindlichkeit aus /BOL 11a/. Die Gesteinseigenschaften, insbesondere das Kriechvermögen ermöglichen zudem einen Verzicht auf Bentonit sowohl als die Gebinde umgebendes Abdichtungsmaterial als auch als Abdichtungs- und Verfüllmaterial für die untertägig aufgefahrenen Hohlräume /BOL 11a/. Durch die Möglichkeit des Verzichtes auf tonmineralhaltige technischen Barrieren entfallen hier die z. T. strikten Temperaturanforderungen, die sich aus den tonmineralhaltigen Barrieren in Ton/Tonstein und kristallinen Wirtsgesteinen ergeben (Tab. 2.1, Anhang 01, 02, 04), so dass die Anforderungen an die Endlagerbehälter eine deutlich höhere Grenztemperatur an der Behälteroberfläche (bis zu 200 °C) zulassen (s. Anhang 05).

Durch die relativ hohe Standsicherheit im steil lagernden Steinsalz sind die Anforderungen technischer Ausbaumaßnahmen geringer als bei tonhaltigen Wirtsgesteinen und vergleichbar mit denen im Kristallin. Spezielle technische Ausbaumaßnahmen sind in der Regel nicht notwendig /BOL 11a/.

¹ Nach der Definition des Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AKEnd) /AKE 02/.

Für Steinsalz in flacher Lagerung, sog. stratiforme Salze, gelten bezüglich der Wirtsgesteinseigenschaften prinzipiell vergleichbare Anforderungen. Jedoch sind nach /BOL 11a/ flach lagernde Salzvorkommen „oft durch Wechsellagerungen von Steinsalzschieben mit anhydritisch-karbonatischen, Kalisalz oder tonigen Gesteinsschichten gekennzeichnet“. Sie entsprechen daher oft nicht den Anforderungen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Durch die durch den Wechsel von geologischen Schichtgliedern bedingte vertikale Heterogenität in der mineralogischen Zusammensetzung und dem Vorhandensein von lateral ausgedehnten Trennflächen im Wirtsgestein sind die Anforderungen an den untertägigen Ausbau der Strecken und Kammern relativ hoch. Im weltweit bisher einzigen Endlager für, allerdings nicht wärmeentwickelnde, radioaktive Abfälle in einer flach lagernden Salzformation, der US amerikanischen Waste Isolation Pilot Plant (WIPP), müssen aus Gründen der Standfestigkeit und dem betrieblichen Arbeitsschutz die aufgefahrenen Hohlräume daher durch aufwendige Firstsicherungsmaßnahmen und regelmäßiges Nachschneiden der Strecken und Kammern gegen Löserfälle gesichert werden /TYR 16/. Kann diesen Sicherungsmaßnahmen nicht nachgekommen werden, besteht die Gefahr, dass ganze Bereiche des Endlagers aufgegeben werden müssen, weil deren Standsicherheit nicht mehr gegeben ist /TYR 16/. In der WIPP beträgt die Konvergenzrate des flach lagernden Steinsalzes 5-13 cm/a /TYR 16/. Im Vergleich dazu kann etwa für den Salzstock Gorleben anhand der Referenzkonvergenzrate von $0,01 \text{ a}^{-1}$ /LAR 13/ unter Annahme eines Streckendurchmessers von 5 m eine Konvergenzrate von ca. 1-2 cm/a abgeleitet werden.

In der WIPP werden keine wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle eingelagert. Damit kann das Endlagerdesign der WIPP auch nicht mit den anderen Endlagerkonzepten in diesem Bericht verglichen werden. Da insbesondere in der WIPP keine Brennelemente oder sonstige hochaktive radioaktive Abfälle aus der Nutzung der Kernenergie zur Stromgewinnung endgelagert werden², können auch die Behälter- und Barrierekonzepte nicht miteinander verglichen werden.

2.1.2.4 Co-Disposal

Als Co-Disposal bezeichnet man die Endlagerung unterschiedlicher Abfallarten am selben Standort. Für die Betriebsphase sind die räumliche Nähe bzw. räumliche Tren-

² In der WIPP werden TRU-Abfälle aus dem US amerikanischen Atomwaffenprogramm (*National Defense Program*) endgelagert.

nung von Einlagerungsfeldern und ggf. die gemeinsame Nutzung von Schächten/Rampen und unterirdischer Infrastruktur zu betrachten. Bei Sicherheitsbetrachtungen für die Nachbetriebsphase (Langzeitsicherheit), müssen die Einflussparameter und Prozesse betrachtet werden, die zu einer möglichen wechselseitigen Beeinflussung unterschiedlicher Abfallbestandteile und zu einer möglichen zusätzlichen Radionuklidfreisetzung führen können, insbesondere hier die Einflüsse von schwach- und mittelaktiven radioaktiven Abfälle auf die hochaktiven radioaktiven Abfälle /ESK 16/. Die Entsorgungskommission der Bundesrepublik Deutschland (ESK) hat sich in einem Diskussionspapier /ESK 16/ mit dieser Thematik beschäftigt und kommt zu dem Schluss, dass ein Co-Disposal zu einer Verringerung in der Robustheit der Nachweisführung in der Sicherheitsanalyse führt und damit grundsätzlich sicherheitstechnisch und nachweistechisch nicht vorteilhaft ist /ESK 16/. Diese Defizite können demnach nur ausgeschlossen bzw. vollständig umgangen werden durch eine komplette Isolierung der verschiedenen Abfallarten in getrennten Einlagerungsbereichen voneinander, wobei unter Isolierung hier in erster Linie der Ausschluss von chemischen und fluiddynamischen Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Abfallarten verstanden wird /ESK 16/.

Auch für die Betriebsphase geht die ESK bei einem Co-Disposal von einer Erhöhung der Komplexität aus. Hiermit möglicherweise verbundene erhöhte Gefahren von Betriebsstörungen, Störfällen und Unfällen könnten durch eine vollständige Trennung der Abfallführung (z. B. durch Bau zweier Bergwerke mit eigenen übertägigen Anlagen an einem Standort, getrennten Schachtförderanlagen und separaten Einlagerungsbereichen) minimiert werden /ESK 16/. Auch wären hierdurch unabhängige Planungen und Durchführungen von Verschluss-, Stilllegungs- und ggf. Rückholungsmaßnahmen möglich, was als vorteilhaftes Argument für die anlagentechnische Trennung angeführt wird /ESK 16/.

In der Gesamtbetrachtung kommt die ESK zu dem Schluss, dass sicherheitserhöhende Synergien bei einem Co-Disposal in einem gemeinsamen Endlager nicht oder nur in Ausnahmefällen zu erwarten sind /ESK 16/.

Im schweizerischen Endlagerkonzept im Tonstein (Anhang 01) ist nach dem Sachplan geologische Tiefenlager anstatt der Errichtung von zwei Lagern (je eins für hochaktive radioaktive Abfälle – HAA – und eines für schwach und mittelaktive radioaktive Abfälle – SMA –) auch ein sogenanntes Kombilager (Co-Disposal) möglich, in dem alle Abfallkategorien am selben Standort eingelagert werden /BFE 08/. Bislang erfolgte im Rahmen des Sachplanverfahrens noch keine detaillierte Diskussion der Vor- und Nachteile

eines Kombilagers /ENSI 14/. Als problematisch angesehen werden auch hier beispielsweise Wechselwirkungen, welche durch die Wärmeentwicklung der HAA oder der vielfältigen chemischen Zusammensetzung der SMA (z. B. Gasbildung) entstehen könnten. Vorteile ergeben sich durch genutzte Synergieeffekte wie der gemeinsamen Nutzung der obertägigen Anlage /ZUI 08/. Ferner würden durch die Nutzung derselben Zugangsbauwerke die geologischen Schichten zwischen der untertägigen Anlage und der Biosphäre weniger oft durchbohrt werden und sicherheitstechnische Vorteile entstehen. Die Lagerkammern für HAA und SMA könnten entweder in der gleichen oder in unterschiedlichen Wirtsgesteinen erstellt werden /SCH 08/. Falls ein Kombilager errichtet wird, sollen die Lagerfelder mit den Lagerkammern des HAA-Lagers und des SMA-Lagers räumlich getrennt sein. Es dürfen durch mögliche gegenseitige Wechselwirkungen keine signifikanten Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit bestehen, d. h. aus Sicht der Langzeitsicherheit stellen beide Lagerfelder zwei unabhängige Anlagen dar. Oberirdisch würde sich die Anzahl der Zugänge durch ein Kombilager reduzieren, denkbar ist z. B. ein doppelröhriger langgestreckter Tunnel als Zugangsbauwerk /NAG 16/. Nach aktuellem Planungs- und Wissensstand ist die Bedeutung der zusätzlichen Zugangsstollen und ggfls. Schächte bei geeigneter Auslegung unbedeutend für die Radionuklidfreisetzung in die Biosphäre /JOH 02/, /NAG 10/, /ZUI 94/. Da unzulässige gegenseitige Beeinflussungen der Abfalltypen ausgeschlossen werden müssen, ist die Sicherheit für ein Kombilager gleich zu beurteilen wie für zwei separate Endlager. Lediglich für die Nuklidfreisetzung und die resultierenden Dosen werden die beiden Teillager gesamtheitlich betrachtet /ENSI 14/. Aus technischer Sicht ist für ein Kombilager vor allem das untertägige Platzangebot von Bedeutung, das groß genug sein muss um unzulässige gegenseitige Beeinflussungen ausschließen zu können.

Im französischen Endlagerkonzept (Anhang 02) sollen sowohl hochaktive radioaktive Abfälle (HLW) als auch schwach- und mittelaktive radioaktive Abfälle (ILW-LL) eingelagert werden /AND 16/. Für beide Abfallarten werden räumlich getrennte Einlagerungsfelder aufgeföhren. Für beide Abfallarten wird eine nukleare Rampe als Transportstrecke nach unter Tage genutzt. Über den Betriebslogistikbereich sind die nuklearen Schächte und die Rampen mit der ILW-LL-Einlagerungszone und der HLW-Zone verbunden. Beide Abfallarten werden an der unteren Rampenstation von demselben schienengebundenen elektrisch angetriebenen Transportfahrzeug aufgenommen und bis zum Eingang der Kammerzugänge geföhren. Von dort an werden unterschiedliche Einlagerungstechniken verwendet.

Bei den entwickelten Einlagerungskonzepten für die VSG wurde die Anforderung aus /BMU 10/ nach einer Separierung unterschiedlicher Abfalltypen durch die räumliche Trennung wärmeentwickelnder und vernachlässigbar wärmeentwickelnder Abfälle in verschiedenen, nur über eine Richtstrecke und den Infrastrukturbereich verbundenen Endlagerbereichen, die weitgehende Trennung verschiedener Abfallarten innerhalb der Endlagerbereiche in Einlagerungsfelder sowie die Beladung einer Einlagerungssektion mit jeweils nur einer Abfallart realisiert /FIS 13/ (Anhang 05). In der VSG vorgenommene Integritätsanalysen und radiologische Konsequenzenanalysen lassen keine Zustände erkennen, die schädliche Auswirkungen auf das Einschlussvermögen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs infolge von Interaktion von Abfallarten mit unterschiedlichen physikalischen oder chemischen Eigenschaften zur Folge hätten /FIS 13/. Durch strikte Trennung unterschiedlicher Abfallarten würden sich die Endlagersysteme in ihrem sicherheitsrelevanten Verhalten jedoch deutlich besser prognostizieren lassen, was sich positiv auf die Belastbarkeit (Robustheit) sicherheitsgerichteter Aussagen auswirkt /FIS 13/.

Die skandinavischen KBS-3 Endlagerkonzepte sehen keine gemeinsame Endlagerung von HAW und LAW/MAW Abfällen vor. Grund hierfür ist, dass für LAW/MAW Abfälle bereits Endlager existieren.

2.2 AP 2: Ableitung von sicherheitstechnischen Anforderungen an die Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle aus betrieblicher Sicht

In AP 1 wurden sicherheitstechnische Anforderungen an die Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle aus betrieblicher Sicht abgeleitet. Eine ausführliche Darstellung samt der verwendeten Quellen findet sich in Anhang 08.

Reversibilität beschreibt die Möglichkeit, einzelne Entscheidungs- und Prozessschritte während der Konzeption, Planung, Errichtung und dem Betrieb von Endlagern rückgängig machen zu können und stellt eine grundlegende Strategie bei der Umsetzung von Endlagerprojekten dar /BOL 14b/. Während des Betriebs eines Endlagers steht insbesondere die Rückholbarkeit der Abfallbinde im Fokus, d. h. die Sicherstellung der Abfälle bei erkannten Fehlern und ihre Rückführung z. B. in ein Zwischenlager. Die Rückholbarkeit als prinzipielle Möglichkeit eingelagerte radioaktive Abfälle wieder aus dem Endlager auszulagern ist somit eine mögliche Option der Umsetzung von Reversibilität.

Praktisch alle Staaten, die aktiv an einem eigenen Endlager für radioaktive Abfälle arbeiten, beschäftigen sich in unterschiedlicher Ausprägung mit Fragen zur Rückholbarkeit /KOM 16/. Die Zeiträume, für die eine Rückholung der radioaktiven Abfälle gewährleistet sein soll, unterscheiden sich z. T. deutlich. Einige Konzepte sehen eine Rückholbarkeitsoption nur bis zum Verschluss des Endlagers vor, andere betrachten darüber hinaus deutlich längere Zeiträume /KOM 16/.

Verschiedene Begriffe und Themen stehen in engem Zusammenhang mit Rückholbarkeit (siehe auch Abb. 2.1). Die Abbildung baut auf der „retrievability scale“ (R-scale) der NEA auf /NEA 11/ und gibt einen Überblick zur zeitlichen Einordnung der Endlagerstadien vor dem Hintergrund der Reversibilitätsoption. Sie bezieht sich auf die derzeit in Deutschland diskutierte Strategie eines reversiblen Entsorgungsprogramms auf Basis einer Option zur Rückholbarkeit und Bergung der radioaktiven Abfälle.

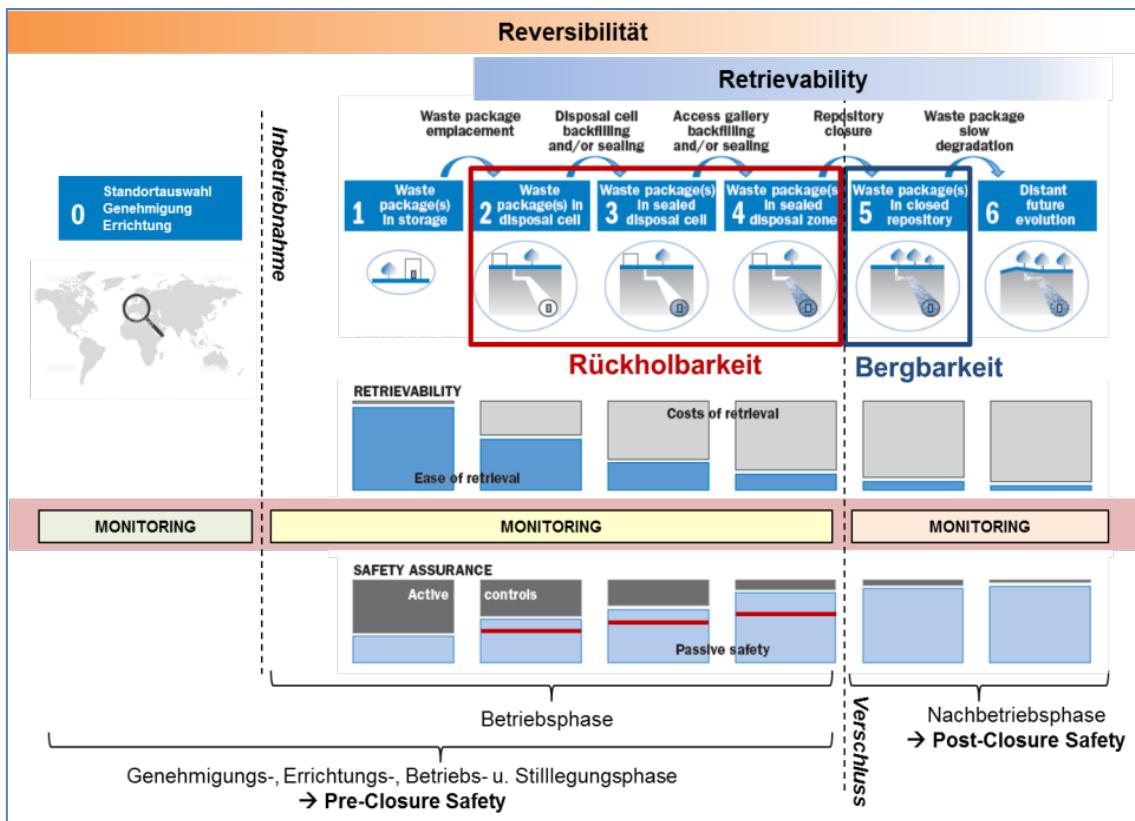


Abb. 2.1 Zeitliche Zuordnung der Begriffe Reversibilität, Rückholbarkeit und Bergbarkeit, verändert nach /NEA 11/, /HER 16/

Das Entsorgungsprogramm für Deutschland beginnt mit einer Phase 0, der Standortauswahl. In dieser Phase muss bereits ein großer Teil der notwendigen Monitoring-

Daten (u. a. radiologische Referenzdaten) erfasst und eine erste Entscheidung zum Endlagerstandort getroffen werden. Die Option der Rückholbarkeit in der Betriebsphase des Endlagers umfasst die Einlagerungs-, Überwachungs- und Verschlussphase und kann ggf. 100 Jahre und mehr reichen. In dieser Zeit müssen technische Konzepte zum Monitoring und zur Rückholung bereitgehalten werden. Entsprechend den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ und den Empfehlungen der Endlagerkommission wird in Deutschland zwischen einer Rückholung und einer Bergung der radioaktiven Abfälle unterschieden. Mit Verschluss der Schächte und Abbau der oberirdischen Gebäude endet die Rückholbarkeitsoption und es beginnt die Nachverschlussphase, bei der nach /BMU 10/ über einen Zeitraum von 500 Jahren eine Bergbarkeit der Abfälle gewährleistet werden muss.

An das Rückholbarkeitskonzept werden u. a. in Bezug auf die technische Machbarkeit und die Behältereigenschaften höhere Anforderungen gestellt als an das Konzept für eine optionale Bergung. Die Rückholbarkeit ist als Option bereits im Endlagerkonzept eingeplant. Bei einer Bergung geht man von einer ungeplanten Situation oder einem Notfall in der Nachverschlussphase des Endlagers aus. Hier muss nur die grundsätzliche Machbarkeit eingeplant werden.

2.2.1 Auswertung internationaler Rückholungskonzepte

Eine Option Rückholbarkeit ist für die technische Konzeption eines Endlagers mit auslegungsbestimmend. In der Tab. 2.1 (siehe Kapitel 2.1.1) sind technische Konzepte und spezifische Endlagerauslegungen mit Bezug zur Rückholbarkeit zusammengestellt, sofern Informationen verfügbar waren. Dies umfasst u. a. die Endlagerbehälter (Lebensdauer, Handhabbarkeit etc.) und den Ausbau von Strecken und Einlagerungsfeldern (Streckenausbau, Größe des Endlagers, Anzahl der Einlagerungstrecken/Bohrlöcher etc.).

Die Auswertung zeigt, dass eine Rückholbarkeitsoption für endgelagerte radioaktive Abfälle international zumeist konzeptionell betrachtet und z. T. auch regulatorisch gefordert wird. Unterschiede bestehen bei der Definition von Reversibilität, Rückholbarkeit und Bergbarkeit. Es gibt keine einheitlichen Forderungen in Hinblick auf die Machbarkeit, die regulatorischen Anforderungen oder die Gründe für die Initiierung einer Rückholung oder für das dazu notwendige Monitoring. Ebenso wie sich die Endlagerkonzepte voneinander unterscheiden, unterscheiden sich die Konzepte zur Rückholung. Dies betrifft die Zeiträume, für die Rückholbarkeit zu gewährleisten ist sowie die

Offenhaltung der Bergwerke (zeitlich und räumlich). Die Rückholungskonzepte sind sowohl endlager- als auch wirtsgesteinsspezifisch. Es bestehen Unterschiede bzgl. des Nachweises der technischen Machbarkeit, die z. B. in Deutschland Genehmigungsveraussetzung ist, als auch bei der Entwicklung von technischen Konzepten für ein betriebsbegleitendes und/oder nachbetriebliches Monitoring-Konzept, welches in einigen Ländern in engem Zusammenhang mit Rückholungskonzepten entwickelt wird.

2.2.1.1 Rückholungskonzepte Ton/Tonstein

Rückholungskonzepte in Ton und Tonstein wurden als Teil der Endlagerkonzepte für Belgien, Frankreich, die Schweiz und für Deutschland des Vorhabens ausgewertet (Tab. 2.1, Anhänge 01-07).

In Belgien wird für ein tiefengeologisches Endlager die Umkehrbarkeit (des Einlagerungsprozesses) und Rückholbarkeit gesetzlich /FED 14/ gefordert aber nicht genauer definiert (Anhang 03). Es sind Vorkehrungen für eine geplante Rückholung in der Betriebszeit (ca. 100 Jahre) zu bedenken /DEP 16/. Alle in den bisherigen Planungen betrachteten Betriebsabläufe des Endlagers müssen reversibel sein. Das betrifft beispielsweise Transportprozesse unter Tage, im Schacht und über Tage sowie alle dazugehörigen Umladevorgänge der Endlagerbehälter über Tage /PIR 13/. Die Maßnahmen zur Ermöglichung der Reversibilität dürfen die betriebliche Sicherheit und die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen /ZIE 08/. Laut /NEA 04/ ist die Rückholbarkeit für den Zeitraum vorgesehen bis die Hauptstrecken des Endlagers verfüllt werden.

In Frankreich und der Schweiz (geplante Endlagerung in Tonstein) wird die Einplanung einer optionalen Rückholung während der Betriebszeit des Endlagers einschließlich einer anschließenden Beobachtungsphase gefordert. In beiden Ländern sehen die Endlager-Konzepte nach der Einlagerung aller Endlagerbehälter eine Offenhaltung der Zugänge zu den Einlagerungsstrecken und aller zusätzlich benötigten Grubenbaue vor. Die Rückholungsstrategie ist hier also die einer teilweisen Offenhaltung (gegenüber der Re-Mining-Strategie im Salz, s. Kapitel 2.2.1.2). Die zeitweise Offenhaltung des Endlagers dient der Überwachung der Entwicklung des Endlagersystems. Die Überwachungsphase endet mit dem Beschluss, das Endlager endgültig zu verschließen. Eine Rückholbarkeit der Endlagerbehälter soll dann immer noch gewährleistet sein. Der dazu nötige Aufwand steigt vom Beginn der Einlagerung bis zum Verschluss deutlich an (Abb. 2.1).

Im schweizerischen Konzept der Endlagerung (Anhang 01) im Opalinuston (Tonstein) wird eine erleichterte Rückholung durch eine zusätzliche Beobachtungsphase über mehrere Dekaden gewährleistet, in der das Hauptlager (Einlagerungsstrecken) zwar verschlossen, aber sämtliche anderen Grubenteile offen gehalten (wie z. B. Zentralbereich und Zugangsbauwerke) werden. Hierdurch wird die Zugänglichkeit untertage gewährleistet und im Bedarfsfall müssen lediglich die Betriebs- und Einlagerungsstrecken neu aufgefahren werden, um an die Endlagerbehälter zu gelangen. Ferner werden in den Einlagerungsstrecken die Schienen nach der Einlagerung belassen, um eine mögliche Rückholung zu erleichtern. Dieses mehrstufige Rückholbarkeitskonzept wurde für ein Endlager im Tonstein für befüllte BE-Behälter entwickelt, die repräsentativ für die verwendeten HAA-Behälter sind. Diese Endlagerbehälter müssen bezüglich ihrer mechanischen und chemischen Beständigkeit so ausgelegt sein, dass eine Rückholung bis zum Ende der Beobachtungsphase ohne großen Aufwand möglich ist.

Im französischen Konzept der Endlagerung (Anhang 02) in Tonstein wurde eine Rückholbarkeitsoption für mindestens 100 Jahre gesetzlich festgelegt. Der Ausbau der Strecken und Kammern, der Schächte und Rampen im Endlagerbergwerk erfolgt i. d. R. mit Beton. Die Zwischenräume zwischen Beton und anstehendem Gestein werden ggfs. einem kompressiblen Material aufgefüllt, welches nur eine geringe Konvergenz des Gesteins zulässt. Die HLW-Kammern erhalten Stahlliner. Nach der Einlagerung findet ein Monitoring der Abfälle statt, und die Zugangsstrecken werden über einen definierten Zeitraum offengehalten. Für die Rückholung ist die erneute Nutzung der Einlagerungstechnik vorgesehen. Die zum Rückholungszeitpunkt bereits errichtete Dichtungen und Dämme zum Verschluss der Einlagerungszellen sollen zunächst mit Hilfe konventioneller Bergbautechnik entfernt werden.

In Deutschland gibt es keine weitreichenden Erfahrungen zum Bergbau in Ton bzw. Tonstein in einer für ein Endlager relevanten Tiefe, da abbauwürdige Tonformationen entweder an der Oberfläche oder oberflächennah ausgebeutet werden /AME 04b/. Die Eigenschaften des Tons /Tonsteins führen dazu, dass die Standfestigkeit und die Notwendigkeit des Ausbaus von Hohlräumen (Strecken, Kammern) eine wesentliche Rolle für das Endlagerkonzept bilden. Für ein Rückholungskonzept von Abfallbehältern aus der Streckenlagerung im Tonstein wurde im FuE-Vorhaben ERATO /PÖH 10/ vorgesehen, die Komponenten und technischen Konzepte des Einlagerungsbetriebs auch im Rückholungsbetrieb zu verwenden. Dabei sollen zunächst die Richtstrecken, Querschläge und Überfahrungsstrecken wieder aufgefahren und ein Kühlsystem zur Abküh-

lung der Einlagerungsstrecken installiert werden. Die Ansätze der Bewetterung lassen sich weitgehend aus der Rückholung von POLLUX®-Behältern aus Salzgestein ableiten. Nach /BOL 14/ steht die Entwicklung des Rückholungskonzeptes hin zur technischen Reife jedoch noch aus.

Im Konzept der Rückholung bei einer Bohrlochlagerung (Anhang 07) werden die als Endlagerbehälter konzipierten rückholbaren Kokillen (BSK-R) aus 27 m tiefen mit perforierten Außenlinern versehenen Bohrlöchern (Aufnahme von 3 BSK-R) entfernt. Der Innenliner sollte für den Zeitraum einer möglichen Rückholung lösungsdicht sein. Die längere Offenstandzeit bei der Bohrlochlagerung in Tonstein, die aus der Herstellung von Bohrlochkeller, Bohrloch und längerer Einlagerungsphase resultiert, stellen zusätzliche Anforderungen an den Ausbau. Der Entnahmeprozess der BSK-R entspricht im Wesentlichen dem aus dem Bohrlochkonzept für Salz /BOL 11b/, wobei das Entfernen des Versatzes (trockene, nicht kohäsive Verfüllung) aufgrund der kürzeren Bohrlöcher weniger aufwendig ist.

Anders als in Deutschland muss in der Schweiz und in Frankreich eine evtl. geforderte Rückholung nur dem Prinzip nach geprüft werden, ein Nachweis, dass die Rückholungskonzepte dem Stand der Technik entsprechen, ist nicht vorgeschrieben /BOL 14b/.

2.2.1.2 Rückholungskonzepte Salz

Die Rückholungskonzepte bauen auf den Endlagerungskonzepten im Steinsalz auf (Anhang 05). In Deutschland wurden die drei verschiedenen Einlagerungskonzepte Streckenlagerung selbstabschirmender POLLUX®-Behälter, Einlagerung von Kokillen (BSK, BSK-3 bzw. neuentwickelte rückholbare Bohrlochkokillen BSK-R) in tiefe vertikale Bohrlöcher und direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) in kurzen horizontalen Bohrlöchern untersucht.

Für einen Rückholprozess aus der Streckenlagerung wurden in der VSG zwei Konzepte zur Rückholung der POLLUX®-Behälter aus der Einlagerungsstrecke konzipiert /BOL 12/. Im „Zugkonzept“ sollen von den wiederaufgefahrenen Querschlägen Rückholungsstrecken durchschlägig und parallel direkt neben den alten Einlagerungsstrecken neu aufgefahrene werden. Schrittweise wird je ein Behälter nach Entfernen des Salzes durch eine noch zu entwickelnde Vorrichtung in die Streckenmitte gezogen und wegtransportiert. Erweist sich dieses Rückholungskonzept, z. B. aus betrieblichen oder

anderen Gründen als nicht umsetzbar, soll die alternative Rückholungstechnologie „vollständige Freilegung“ Anwendung finden. Bei ihr werden zunächst beidseitig des Behälters Rückholungsstrecken aufgefahren, anschließend der verbleibende Pfeiler zwischen beiden Strecken gewonnen und die Behälter schrittweise freigelegt werden. Im entstehenden Streckenprofil liegt der freigelegte Behälter in der Streckenmitte und wird durch eine modifizierte Einlagerungsvorrichtung (modifizierte POLLUX®-Aufnahme) angehoben und wegtransportiert. Für die Rückholoption von eingelagerten BSK-R aus der Bohrlochlagerung werden alle Bohrlöcher schon bei der Einlagerung mit einer Verrohrung ausgestattet, die entsprechend den zu erwartenden gebirgsmechanischen Belastungen dimensioniert ist. Im Rückholprozess selber werden zunächst die Zugangs- und Richtstrecken wiederaufgefahren und der Bohrlochkeller freigelegt. Nach Freilegung der Verrohrung wird diese mit einer Bohrlochschleuse versehen und mit einer Absaugvorrichtung der Versatz innerhalb der Verrohrung unter Strahlenschutzbedingungen bis zur ersten BSK-R entfernt. Ein Greifer wird wie bei der Einlagerung durch die Schleusen des Transferbehälters geführt, umfasst den Pilzkopf der Kockille und zieht diese, ggf. unter „Rütteln“, aus dem Bohrloch. Im Konzept für die Rückholung der TLB aus den horizontalen Kurzbohrlöchern wurde das für den POLLUX®-Behälter vorgesehene "Zugkonzept" verworfen. Nach Auffahrung von Rückholungsstrecken, die senkrecht zu den versetzten Einlagerungsstrecken verlaufen, sollen die TLB nach vollständiger Freilegung durch eine neue Rückholungsmaschine (modifizierte Einlagerungsvorrichtung) angehoben, auf einen Transportwagen übergeben und abtransportiert werden /BOL 14b/. Für verschiedene Rückholungsvarianten ergeben sich annähernd die gleichen wettertechnischen und klimatechnischen Aufgaben.

2.2.1.3 Übertragbarkeit auf kristalline Wirtsgesteine

Die Übertragbarkeit von bereits bestehenden Rückholungskonzepten basiert auf den Auswertungen der Endlagerkonzepte für Kristallin (KBS-3) und ersten Überlegungen zu „Kristallin“-Endlagerkonzepten in Deutschland und dem generischen Grundkonzept zur tiefen Bohrlochlagerung in kristallinem Gestein.

Schweden und Finnland sind weit fortgeschritten im Prozess der Schaffung eines Endlagers für HAW. Aufgrund der in diesen Ländern ausgedehnten Kristallinvorkommen, wurden speziell für dieses Wirtsgestein von beiden Ländern gemeinsam das KBS-3 Endlagerkonzept inklusive passender Behälterkonzepte entwickelt (Anhang 04). In der deutschen Endlagerforschung wurde eine Endlagerung im Kristallin bisher nur nach-

rangig berücksichtigt. Aus diesen Gründen existiert in Deutschland derzeit kein technisches Endlagerkonzept für kristallines Gestein. Konzeptionelle Ansätze für ein Endlager im Kristallin wurden im Forschungsvorhaben GEISHA /PAP 99/, in der Machbarkeitsstudie CHRISTA /JOB 16/ auf Basis des skandinavischen KBS 3-Konzepts aufgestellt bzw. als Konzeptstudie /BRA 17b/ (Anhang 07) zur Lagerung in tiefen Bohrlöchern als Alternative zur Auffahrung eines Bergwerks, diskutiert.

Im KBS-3 Endlagerkonzept im Kristallin ist die Rückholbarkeit wie die Bergbarkeit von Endlagerbehältern aufgrund der konzeptbedingten sicherheitskonzeptionell hohen Anforderungen an die Behälterstabilität und der Standfestigkeit des Kristallingesteins über mehrere Jahrhunderte konzeptimmanent gegeben. Die generelle technische Machbarkeit der Rückholung eines KBS-3 Behälters aus einem vertikalen Bohrloch mit vollständiger Wassersättigung des umgebenden Bentonit - Buffers wurde in einem 7-jährigen 1:1 in-situ Versuch im Äspö Felslabor demonstriert /SKB 15/. Nach den finnischen Überlegungen /KIN 04/ ist in einer Phase vor Verschluss der Bohrlöcher die Rückholung von Kupfer ummantelten Abfallgebinden ohne Probleme möglich, sofern der Bentonit um den Behälter fest gepackt und noch nicht aufgequollen ist. Der Behälter kann leicht mittels eines Transportvehikels aus dem Bohrloch gefördert werden.

Für die Festigkeit des Gebirges sind v. a. die Trennflächen in den konturnahen Bereichen der Strecken bestimmend. Ein Ausbau wird nach /STA 15/ nur in besonders stark geklüfteten Abschnitten notwendig. Das Gebirge bildet einen Gebirgstragring aus und ist dadurch selbst tragend. Da das Wirtsgestein keine kriechfähigen Eigenschaften wie Salz hat, die radioaktiven Abfälle zeitnah zu umschließen, wird eine technische Barriere „Versatz“ wie bei Einlagerung in Ton/Tonstein benötigt. In Bezug auf die Rückholbarkeitsoption der Abfallgebinde ist für eine Wiederauffahrung der versetzten Strecken zu beachten, dass vereinzelt Schwächezonen im Gebirge zu Verbrüchen führen können /BOL 14b/.

In der Phase nach Verschluss der Einlagerungsstrecken muss berücksichtigt werden, dass die Temperatur in den Einlagerungsstrecken durch die Wärmeerzeugung der abgebrannten Brennelemente erhöht sein kann. Die Temperatur erreicht erst einige hundert Jahre nach Verschluss der Strecke ihr Maximum. Durch eine Bewetterung in der Rückholphase können in der Einlagerungsstrecke normale Arbeitsverhältnisse hergestellt werden. Zur Rückholung müssen die Einlagerungsstrecken und die Bohrlöcher geöffnet und die Behälter freigelegt, gehoben und nach über Tage transportiert werden. Auch hieraus ergeben sich keine wesentlichen technischen Herausforderungen.

Insgesamt sind im Ergebnis der ausgewerteten Endlagerkonzepte im Kristallin (KBS-3) die technischen Auswirkungen einer möglichen Rückhol- und Bergbarkeitsoption auf das Einlagerungskonzept gering, da man davon ausgeht, dass die entsprechende Einlagerungsinfrastruktur auch für die Auslagerung der Behälter genutzt werden kann. Durch die bereits im Endlagerkonzept berücksichtigten langzeitstabilen Behälter und das stabile Gebirge sind keine weiteren Maßnahmen zur Erleichterung einer Rückholung der Behälter angedacht.

Bei der tiefen Bohrlochlagerung (Anhang 07) gelten bei der Rückholung der entsprechenden Abfallgebinde grundsätzlich dieselben Strahlenschutzanforderungen wie bei Endlagerung in einem Bergwerk. Obwohl ein solches Konzept möglicherweise sicherheitstechnische und zeitliche Vorteile aufweist (z. B. Redundanz und Diversität der geologischen Barriere, mannlose Einlagerung untertage, erschwerte Proliferation, schnelle Einlagerung nach Umkonditionierung), sind Nachteile im Hinblick auf geltende Anforderungen aus der betrieblichen Sicherheit inklusive der Rückholbarkeitsoption und der Langzeitsicherheit vorhanden. Diese sind die nicht auszuschließende Gasbildung, die erhöhten Temperaturen, die erschwerte bis unmögliche Bergbarkeit nach Verschluss der Bohrlöcher sowie der noch erforderliche technische Entwicklungsbedarf um eine Anwendungsreife des Konzepts für eine Endlagerung hoch-radioaktiver Abfälle zu erreichen.

2.2.2 Sicherheitstechnische Zusammenhänge zwischen Einlagerungs- und Rückholungsbetrieb

Es existieren nur wenige Untersuchungen und Erfahrungen darüber, wie sich Rückholbarkeitsoptionen planerisch auf das Endlagerkonzept bzw. sicherheitstechnisch auf den Betrieb auswirken, da bisher insbesondere die sicherheitstechnischen Implikationen auf die Nachbetriebsphase (Langzeitsicherheit) untersucht wurden. Rückholbarkeitsoptionen sind abhängig vom Endlagerkonzept und den betrachteten Zeiträumen, für die eine Rückholbarkeitsoption gelten soll.

Hinsichtlich der strahlenschutztechnischen und betrieblichen Sicherheit kann die Forderung nach einer Rückholbarkeitsoption zu verschiedenen Zielkonflikten führen. Potentielle Zielkonflikte in der sicherheitlichen Bewertung entstehen durch Auswirkungen des Grades und der benötigten Zeiträume für eine Offenhaltung des oder von Teilen des Grubengebäudes sowie durch die Temperatureinflüsse der Abfälle auf das Gebirge. Eng verknüpft mit dem Thema Rückholbarkeit ist ein Monitoring, um die Endla-

gerentwicklung zu beurteilen bzw. strahlenschutztechnisch zu überwachen. Im internationalen Verständnis sind Monitoring-Konzepte unabhängig von der Frage der Rückholbarkeit oder Reversibilität für den Nah- und Fernbereich eines Endlagers zu entwickeln.

Mögliche Zielkonflikte ergeben sich im Wirtsgestein Salz aufgrund der Schaffung einer längerfristigen Zugriffsmöglichkeit auf radioaktive Abfälle (partielle Offenhaltung). Bei längerer Offenhaltung wird der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle erst zu einem späteren Zeitpunkt erreicht, was einer Beeinträchtigung der passiven Sicherheit des Endlagers entspricht. Weitere Konflikte bzw. Herausforderungen bestehen in der Temperaturentwicklung nach Einlagerung der Abfallgebinde. Abhängig vom Rückholungszeitpunkt ist dem Behälter nach der Freilegung durch geeignete Maßnahmen (z. B. Kühlung, Bewetterung) eine ausreichende Abkühlungszeit einzuräumen. Optimierungen zur Reduzierung der Temperaturmaxima sind denkbar durch Veränderungen der Behälterbeladung, längere Zwischenlagerzeiten oder das Grubendesign. Führt dies zu Verringerungen der Einlagerungsrate kann dies der Anforderung einer möglichst zügigen Einlagerung entgegenstehen. Technische Maßnahmen wie Vergrößerungen von Abständen zwischen Einlagerungsstrecken bzw. Einlagerungsfeldern zur Verringerung der Temperaturmaxima stehen im Zielkonflikt zur Anforderung der Minimierung der Auffahrungen. Die Offenhaltung von Grubenbereichen zur Erleichterung einer möglichen Rückholbarkeit steht im Konflikt zur Gewährleistung des Strahlenschutzes bzw. der Störfallvorsorge (u. a. Laugeneinbruch).

Zielkonflikte im Wirtsgestein Ton/Tonstein ergeben sich potenziell aufgrund des zu betreibenden Aufwandes zur Grubenstabilisierung (komplexe Ausbaumaßnahmen von Hohlräumen) und der Anforderung eines schnellstmöglichen Abwurfs bzw. Versatzes eingelagerter Grubenteile. Der notwendige Grubenbauausbau selbst stellt in der Betriebs- und Offenhaltungsphase, abgesehen von den zusätzlichen Maßnahmen und Kosten, keinen sicherheitstechnischen Zielkonflikt dar. Jedoch besteht dieser in Bezug auf die Langzeitsicherheit (z. B. Wegsamkeiten, Gasbildung). Dabei ist nach /BOL 14b/ zu prüfen, welche Rückholungsstrategie im Tonstein (Re-Mining oder teilweise Offenhaltung) eine Auflösung des Zielkonfliktes sicherer Einschluss gegenüber einfacher Rückholung besser umzusetzen vermag.

Eine Endlagerung im Kristallin wurde bisher in der deutschen Endlagerforschung nur nachrangig berücksichtigt. Aus diesen Gründen existiert heute für kristallines Gestein in Deutschland kein technisches Endlagerkonzept vergleichbarer Planungstiefe wie bei

Tonstein bzw. Salz. Durch die bereits im Endlagerkonzept berücksichtigten langzeitstabilen Behälter und die hohen Gebirgsfestigkeiten sind derzeit keine weiteren Maßnahmen zur Erleichterung einer Rückholung der Behälter angedacht.

2.2.3 Ableitung von sicherheitstechnischen Anforderungen an die Rückholbarkeit aus betrieblicher Sicht

Aus den Randbedingungen für Endlagerkonzepte und den damit verbundenen Wechselwirkungen, sowie verschiedenen Zielkonflikten, lassen sich sowohl erste generische Anforderungen als auch Maßnahmen und Optimierungsmöglichkeiten für die unterschiedlichen Wirtsgesteine ableiten (siehe hierzu auch /BOL 14b/).

Aus betrieblichen Vorgängen während der Einlagerung und dem Verschluss des Bergwerks folgen Anforderungen an die Handhabbarkeit und Transportierbarkeit der Abfallgebände unter den Randbedingungen des Endlagers (u. a. Temperaturentwicklung im Endlager), die auch die gegebenenfalls erforderliche Rückholung und Instandhaltungsmaßnahmen umfassen. Eine grundsätzlich wichtige betriebliche Anforderung ist die Minimierung der Strahlenexposition des Betriebspersonals. Andere Anforderungen an die betriebliche Sicherheit ergeben sich aus der Hohlraumstabilität eines Wirtsgesteins für die spätere Ausgestaltung des Rückholungsbergwerks und der möglichen Handhabungstechniken untertage. Diese beschränken gegebenenfalls Behälterabmessungen und Massen der Behälter und sind bei der Auslegung zu berücksichtigen.

Die Anforderung einer Rückholbarkeit eingelagerter radioaktiver Abfälle aus einem Bergwerk bedingt für die Planung bzw. Konzeption u. a. die Berücksichtigung der Zeiträume für den Rückholungsbetrieb sowie die Bereitstellung von Infrastruktur über und unter Tage. Weiterhin ist die Bereitstellung von Zwischenlagerkapazitäten, von Behältern für Transport und Zwischenlagerung, Konditionierungsanlagen für die rückgeholtten Abfälle und die Entwicklung alternativer Entsorgungsstrategien notwendig /BOL 16/. Die maximalen Auslegungstemperaturen unterscheiden sich nach Wirtsgestein. Sie sind unter Berücksichtigung der zulässigen thermischen Belastungen im Gebirge und im Grubengebäude festzulegen. Hier ist der Zielkonflikt zwischen einem schnellen sicheren Einschluss, der nach /BOL 14b/ von einer hohen Gebirgstemperatur begünstigt wird und einer Erleichterung oder auch Gewährleistung der Rückholung durch niedrige Auslegungstemperaturen aufzulösen. Die Rückholungsoption erfordert in der Konzeptionsphase die thermische Entwicklung des Endlagers für eine optionale Rückholung in der dazu festgelegten Zeitspanne zu berücksichtigen.

Im Wirtsgestein Ton/Tonstein und bei tonhaltigem Versatzmaterial ist aufgrund der spezifischen Festigkeitseigenschaften des Tons auf mögliche Wasserzuflüsse bei der Wiederauffahrung zu achten. Bei der Verwendung von Ausbaumaterialien im Ton/Tonstein sind chemische Bedingungen im Endlager zu beachten.

Für Kristallingesteine sind mechanische Anforderungen und Maßnahmen zu bedenken. Hier ist zum Erhalt der mechanischen Integrität des Wirtsgesteins zu berücksichtigen. Neuauffahrungen sind im Fall einer Rückholung möglichst zu vermeiden und die optional benötigten Streckenquerschnitte bereits bei der Auslegung zu berücksichtigen /BOL 14b/.

Im Fall einer tiefen Bohrlochlagerung bestehen Optimierungsmöglichkeiten der Temperaturbeständigkeit der Behälter über die Materialwahl (keramische Materialien, Verbundwerkstoffe). Zur Gewährleistung ausreichender mechanischer Stabilität ist eine Verrohrung der Bohrlöcher erforderlich.

2.2.3.1 Co-Disposal

Als Co-Disposal bezeichnet man die Endlagerung unterschiedlicher Abfallarten am selben Standort. In Deutschland betrifft die Forderung der Rückholbarkeit entsprechend den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ ausschließlich wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente. Damit erhalten in einem Endlager für unterschiedliche Abfallarten die Verschlüsse zu den Einlagerungsfeldern der Abfälle, die nicht rückholbar sein müssen, und die Erhaltung der Integrität des rückholbaren „Rest-Endlagers“ besondere Bedeutung. Für die Betriebsphase sind die räumliche Nähe bzw. räumliche Trennung von Einlagerungsfeldern und ggf. die gemeinsame Nutzung von Schächten/Rampen und unterirdischer Infrastruktur zu betrachten. Die Wärmentwicklung der Abfallgebände bewirkt Temperaturveränderungen des Umgebungsgesteins. Es kann aufgrund größerer aufzufahrender Strecken zur Rückholung der eingelagerten Gebände zu Auswirkungen auf die Gebirgsintegrität kommen.

Sollen auch nicht-wärmeentwickelnde Abfälle (ILW, LLW) zurückgeholt werden, sind für diese Abfallarten Behälter zu entwickeln, die den Anforderungen der Rückholbarkeit genügen.

In Bezug auf Rückholbarkeit, ist zu beachten, dass eine unzulässige gegenseitige Beeinflussung der Abfalltypen auch im Rückholungsbetrieb ausgeschlossen werden muss.

2.2.3.2 Behälterkonzepte / Behälterdesign

Der Behälter stellt sowohl in der Betriebsphase als auch über bestimmte konzeptspezifische Zeiträume in der Nachbetriebsphase eine wesentliche Barriere für die Rückhaltung von Radionukliden dar. Das Behälterdesign muss eine Handhabbarkeit und den Schutz des Personals bei Rückholung, die Abschirmung und Aktivitätsrückhaltung und die mechanische Integrität bei dynamischer Belastung sicherstellen.

Nach den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ haben Abfallbehälter für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle bei Berücksichtigung der darin verpackten Abfallprodukte und des umgebenden Versatzes zwei übergeordnete Sicherheitsfunktionen zu 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“.

Zusätzlich dürfen Maßnahmen zur Sicherstellung der Rückholungsoption oder Bergung keine passiven Sicherheitsbarrieren beeinträchtigen, damit die Langzeitsicherheit gewährleistet bleibt.

Grundsätzlich gelten bei der Bohrlochlagerung in einem Bergwerk in den unterschiedlichen Wirtsgesteinen bei der Rückholung der entsprechenden Endlager-Kokillen (BSK-R, BSK-3R, BSK-Cu) dieselben Strahlenschutzanforderungen wie bei einer Streckenlagerung der POLLUX®-Behälter oder TLBs. Da die Kokillen nicht selbstabschirmend sind, ist während des Einlagerungs- bzw. Rückholungsprozesses ein Sperrbereich um das Einlagerungsbohrloch einzurichten und abzusichern. Für den Rückholprozess sind administrative Regelungen zu treffen, die die Strahlenschutzanforderungen auch beim Öffnen des Bohrloches und bei der Installation der Schleuse gewährleisten /BOL 14b/.

2.2.3.3 Standfestigkeit des Grubengebäudes

In der Betriebsphase des Endlagers sind Ausbau- und Instandhaltungsmaßnahmen für die Standfestigkeit des Grubengebäudes durchzuführen. Der dazu nötige Aufwand und die technische Machbarkeit unterscheiden sich je nach Wirtsgestein erheblich. Insbesondere die Rückholungsoption bedingt zusätzliche Anforderungen an die Standfestigkeit des Grubengebäudes, die bereits bei der Endlagerkonzeption und in der Errichtungs- und Einlagerungsphase des Endlagers mitbedacht werden müssen. Es sind Maßnahmen für die notwendige Dauer der Offenhaltung sowohl von Infrastrukturbereichen, ggf. Monitoringstrecken und Schächten vorzuhalten.

Neben der Standfestigkeit sollte eine gute Verträglichkeit des Wirtsgesteins mit Versatz- und Ausbaumaterialien gegeben sein. Die Auflockerungszone sollte grundsätzlich minimiert werden. Weiterhin sind Fragen der technischen Machbarkeit, zur Betriebssicherheit, zur technischen Zuverlässigkeit der Technologien /BAL 02/ auch bei möglichen Störfällen in Bezug auf ihre Wechselwirkung mit der Standsicherheit des Grubengebäudes zu berücksichtigen /BOL 14b/.

2.2.3.4 Thermische Aspekte

Eine Rückholung der Abfallgebände erfordert, dass die Wärmeentwicklung auch nach Einlagerung der Abfälle bei der Auslegung des Endlagers in Hinblick auf die technische Machbarkeit (Streckenauffahrung, Bewetterung, Kühlung, Arbeitsbedingungen) berücksichtigt wird. Eine wesentliche Anforderung für die optionale Rückholbarkeit ist dabei die Begrenzung der Temperatur in der Rückholphase im Hinblick auf betriebliche Abläufe und Arbeitsschutz.

Zur Gewährleistung der betrieblichen Sicherheit im Falle einer Rückholung darf während der Betriebszeit bzw. während der Handhabung der Behälter deren Oberflächentemperatur nach /BOL 08/ einen Wert von 85 °C nicht überschreiten. Abhängig vom exakten Rückholungszeitpunkt ist somit nach der Freilegung der Behälter eine ausreichende Abkühlungszeit einzuräumen oder die Behälteroberfläche ist durch geeignete Maßnahmen vor einem zusätzlichen mechanischen Kontakt zu schützen. Für den Rückholungsbetrieb ist eine entsprechende Kühl- und Wettertechnik einzuplanen. /BOL 14b/.

2.2.3.5 Safeguards

Die Einhaltung der Safeguards, d. h. die Überwachung der Materialien muss über den Einlagerungsbetrieb hinaus, auch für den Zeitraum der Rückholungsoption vollumfänglich gewährleistet sein /IAEA 10/. Somit verlängern sich die Safeguards-Maßnahmen um den Zeitraum der Rückholungsoption. Die Art und der Umfang von Maßnahmen zum Proliferationsschutz ist vom Schwierigkeitsgrad die Materialien zu schützen abhängig.

Die Anforderung der Rückholbarkeit der Abfälle hat direkte Auswirkungen auf das Safeguards-Konzept. Es sind entsprechende Maßnahmen zu überlegen. Diese müssen geeignet sein, planmäßig durchgeführte Rückholungsvorgänge und Materialströme zu überwachen. Ggf. können sich Maßnahmen zur Kernmaterialüberwachung und zum Monitoring der Abfälle nach Einlagerung ergänzen. Nach /BOL 14b/ werden Einflüsse der Kernmaterialüberwachung nicht als wesentlich für die Umsetzung einer Rückholbarkeitsoption eingestuft. Als wesentlicher werden betriebliche und sicherheitstechnische Aspekte bewertet.

Insgesamt resultieren aus Safeguards-Maßnahmen keine zusätzlichen Anforderungen an die Rückholung. Andererseits beeinflussen Rückholprozesse die notwendigen Maßnahmen zum Proliferationsschutz. In Anhängigkeit vom Rückholungskonzept ergibt sich dann ein Mehraufwand gegenüber der Endlagerung ohne Rückholbarkeitsoption.

3 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden aus betrieblicher Sicht für unterschiedliche Endlagerkonzepte für in Deutschland potenziell in Frage kommende Wirtsgesteine Grundanforderungen an Endlagerkonzepte und sicherheitstechnische Anforderungen an eine Rückholbarkeit eingelagerter radioaktiver Abfälle erarbeitet und dargestellt. Hierfür wurden bestehende internationale und nationale Endlagerkonzepte in den Wirtsgesteinen Ton/Tonstein, Granit und Salz ausgewertet. Basierend auf dem international anerkannten Stand von W&T wurden die jeweiligen Grundanforderungen (z. B. bzgl. Entwicklungsstand, Abfallart, Betriebszeit, Einlagerungstechnik, thermischer Auslegung, Behälterkonzepten und Rückholbarkeit, etc.) ausgewertet und dargestellt und, wo möglich, mit den derzeit in Deutschland vorhanden regulatorischen Anforderungen verglichen. Die sicherheitstechnischen Zusammenhänge zwischen dem Einlagerungs- und einem möglichen Rückholungsbetrieb wurden dargestellt und bewertet. Basierend auf diesen Auswertungen wurden – aus betrieblicher Sicht – grundlegende sicherheitstechnische Anforderungen an die verschiedenen Endlagerkonzepte abgeleitet und dargestellt.

4 Abkürzungsverzeichnis

AKEnd *Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte*

ANSICHT *Vorhaben zur Erarbeitung der Methodik des Sicherheitsnachweises für ein HAW-Endlager in Tongestein*

BE *Brennelemente, Brennelemente*

BSK *Brennstabkokille*

BSK-(3)R *Brennstabkokille - Triple-Pack; Endlagerbehälter für Bohrlochlagerung im Salz.*

Beinhaltet 3 HAW-Kokillen (CSD-V), 3 CSD-B oder 3 CSD-C in einem zylindrischen Behälterkörper (Overpack) mit 5 mm Wandstärke. Für die Rückholung optimierte Version.

BSK-3 *Brennstabkokille; Endlagerbehälter für Bohrlochlagerung in Salz. Er beinhaltet 3 HAW-Kokillen (CSD-V), 3 CSD-B oder 3 CSD-C in einem zylindrischen Behälterkörper (Overpack) mit 5 mm Wandstärke.*

BSK-Cu *Brennstabkokille; Endlagerbehälter für Bohrlochlagerung in Kristallingestein. Er beinhaltet gezogene Brennstäbe aus 3 DWR-BE oder 9 SWR BE in einem zylindrischen Behälterkörper (Overpack) mit 40 mm Wandstärke. Als Korrosionsschutz ist der Behälter von einer 5 cm starken Kupferschicht umhüllt.*

BSK-R *Brennstabkokille; Endlagerbehälter für Bohrlochlagerung in Salz. Er beinhaltet gezogene Brennstäbe aus 3 DWR-BE oder 9 SWR BE in einem zylindrischen Behälterkörper (Overpack) mit 40 mm Wandstärke. Für die Rückholung optimierte Version.*

CHRISTA *Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland*

CSD-B *„Colis de Standard de Déchet Type B“ Verglaste Spülwässer aus der Wiederaufbereitung*

CSD-C *Conteneur de Standard de Déchets Compacté; Kompaktierte Abfälle aus der Wiederaufarbeitung.*

CSD-V *Conteneur de Standard de Déchets Vitriifiés; Verglaste Abfälle aus der Wiederaufbereitung.*

DBC-R *Deep Borehole Container - Retrievable; Rückholbarer Behälter für tiefe Bohrlöcher*

DWR *Druckwasserreaktor*

ERATO *Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein*

ESK *Entsorgungskommission; Expertengremium zur Beratung des BMUB*

FuE *Forschung und Entwicklung*

GEISHA *Vorhaben zur Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein*

GEIST *Vorhaben zur Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein*

HAA *Hochaktiver Abfall*

HAW *High Active Waste*

HLW *High Level radioactive Waste*

ILW *Intermediate Level Waste*

ILW-LL *Intermediate Level Long-Lived Waste, Intermediate Level Waste Long-Lived*

KBS-3 *KärnbränsleSäkerhet – Nuclear Fuel Safety; Einlagerungskonzept von Cu ummantelten Abfallbehälter in kurzen Bohrlöchern (FIN, SWE)*

KOMTESSA *Vorhaben Komplettierung des Instrumentariums zur technischen Realisierbarkeit und sicherheitlichen Bewertung von HAW-Endlagern im Salinar*

LAW *Light Active Waste*

LMA *Langlebiger mittelaktiver Abfall*

LZS *Langzeitsicherheit*

MAW *Medium Active Waste*

MOX BE *Mischoxid-Brennelemente*

SMA *Schwach und mittel radioaktive Abfälle*

SWR *Siedewasserreaktor*

TLB *Transport- und Lagerbehälter*

UOX-BE *Uranoxid-Brennelemente*

VSG *Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben*

WIPP *Waste Isolation Pilot Plant*

5 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Zeitliche Zuordnung der Begriffe Reversibilität, Rückholbarkeit und Bergbarkeit, verändert nach /NEA 11/, /HER 16/ 46
----------	---

6 Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Vergleich der ausgewerteten Endlager-Konzepte	8
----------	---	---

7 Literaturverzeichnis

- /AKE 02/ Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, Empfehlungen des AkEnd - Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Abschlussbericht. 260 S.: Köln, Dezember 2002.
- /AME 04a/ Amelung, P., Bollingerfehr, W., Filbert, W., Müller-Hoeppe, N., Polster, M., Ziegenhagen, J., Behrens, J., Kutowski, J., Schwarz, T.: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein (FKZ 02 E 9511) GEIST, Vergleich der technischen Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Salz und Ton (A2). 189 S., Dezember 2004.
- /AME 04b/ Amelung, P., Biurrun, E., Bollingerfehr, W., Filbert, W., Müller-Hoeppe, N., Ziegenhagen, J.: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein (02 E 9511), Abschlussbericht Hauptband. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Forschungszentrum Karlsruhe - Institut für Nukleare Entsorgung (FZK-INE), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH, Stephan Schmidt KG, 235 S.: Peine, 12.2004.
- /AND 16/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs: Cigéo Project, Deep geological disposal facility for radioactive waste in Meuse / Haute-Marne departments. September 2016.
- /BAL 02/ Baltés, B., Heuser, H., Kindt, A., Thomas, W.: Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk, - Überarbeitete Diskussionsgrundlage -. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-2990, 67 S., Januar 2002.
- /BFE 08/ Bundesamt für Energie (BFE): Sachplan geologische Tiefenlager, Konzeptteil, Revision vom 30. November 2011. 92 S.: Bern, Schweiz, 2. April 2008.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. 22 S.: Bonn, 30. September 2010.

- /BOL 08/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Pöhler, M., Tholen, M., Wehrmann, J.: Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars, Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (Projekt ISIBEL), Arbeitspaket AP 1.2. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), 176 S.: Peine, 1. April 2008.
- /BOL 11a/ Bollingerfehr, W., Herklotz, M., Herzog, C., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Weiß, E., Wolf, J., Ziegenhagen, J., Hammer, J., Sönke, J., Mingerzahn, G.: Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für Endlager in tiefen geologischen Formationen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen (EUGENIA), Synthesebericht, FKZ 02 E 10346. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), TEC-29-2008-AB, 185 S.: Peine, November 2011.
- /BOL 11b/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M.: Endlagerkonzepte, Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), GRS-272, 187 S., ISBN 978-3-939355-48-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH (Hrsg.): Köln, 2011.
- /BOL 12/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomaske, B., Bracke, G., Kilger, R.: Endlagerauslegung und -optimierung, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Bericht zum Arbeitspaket 6. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-281, 285 S.: Köln, 2012.
- /BOL 14a/ Bollingerfehr, W., Herold, P., Dörr, S., Filbert, W.: Auswirkungen der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte, Abschlussbericht, BMWi-Vorhaben, FKZ 02E11112. Hrsg.: Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), K-MAT 24 c, 140 S.: Peine, Februar 2014.

- /BOL 14b/ Bollingerfehr, W., Herold, P., Dörr, S., Filbert, W.: Auswirkungen der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte, Abschlussbericht. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-21-2013-AB, 142 S.: Peine, 2014.
- /BOL 16/ Bollingerfehr, W.: Rückholbarkeit wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle - Auswirkungen auf Behälter- und Endlagerkonzept. Präsentation, AINT Endlager-Symposium 2016, DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC): Peine, 4. Februar 2016.
- /BOL 17/ Bollingerfehr, W., Buhmann, D., Dörr, S., Filbert, W., Gehrke, A., Heemann, U., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Rübel, A., Weber, J. R., Wolf, J.: Evaluation of methods and tools to develop safety concepts and to demonstrate safety for an HLW repository in salt (KOMTESSA), Final Report, FKZ 02E10719 & 02E10729. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-03-2017-AB, 256 S.: Peine, März 2017.
- /BRA 16/ Bracke, G., Charlier, F., Geckeis, H., Harms, U., Heidbach, O., Kienzler, B., Liebscher, A., Müller, B., Prevedel, B., Röckel, T., Schilling, F., Sperber, A.: Tiefe Bohrlöcher. GRS-423, 316 S., ISBN 9783946607052, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig, Februar 2016.
- /BRA 17a/ Bracke, G.: Endlagerkonzept einer tiefen Bohrlochlagerung (Deutschland), Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Bericht zum AP1 im Anhang von GRS-471. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, August 2017.
- /BRA 17b/ Bracke, G., Charlier, F., Liebscher, A., Schilling, F., Röckel, T.: Does Deep Borehole Disposal of HLRW has a Chance in Germany? , atw - Internationale Zeitschrift für Kernenergie, Bd. 62, Nr. 1, S. 46–53, 2017.
- /DBE 16/ DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC): Gutachten Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle. Hrsg.: Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-MAT 58, 92 S., 2016.

- /DEP 16/ Depaus, C., Wacquir, W., Raymaekers, D.: Evolution of the lay-out of the Belgian geological repository to improve the operational safety, Joint NEA / IAEA Workshop Operational Safety of Geological Repositories Session 5.1.d. Präsentation, Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA), International Atomic Energy Agency (IAEA): Paris, 1. Juli 2016.
- /ENSI 14/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Möglichkeit der Errichtung eines Kombilagers für HAA und SMA. erreichbar unter <https://www.ensi.ch/de/technisches-forum/moeglichkeit-der-errichtung-eines-kombilagers-fuer-haa-und-sma/>, abgerufen am 22. Dezember 2016.
- /ESK 16/ Entsorgungskommission (ESK): Diskussionspapier zur Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen, abgereichertem Uran aus der Urananreicherung, aus der Schachtanlage Asse II rückzuholenden Abfällen und sonstigen Abfällen, die nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können, an einem Endlagerstandort. Hrsg.: Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Diskussionspapier der Entsorgungskommission, K-MAT 60, 19 S., Mai 2016.
- /FAß 17/ Faß, T.: Endlagerkonzept im Kristallin (Schweden), Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Bericht zum AP1 im Anhang von GRS-471. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, August 2017.
- /FED 14/ Federal Agency for Nuclear Control on behalf of Belgium: Fifth meeting of the Contracting Parties to the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, NATIONAL REPORT. 142 S., 2014.
- /FIS 13/ Fischer-Appelt, K., Baltés, B., Buhmann, D., Larue, P.-J., Mönig, J.: Synthesebericht für die VSG, Bericht zum Arbeitspaket 13, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-290, 424 S., ISBN 978-3-939355-66-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2013.

- /HAR 17/ Hartwig-Thurat, E., Larue, P.-J.: Ableitung von sicherheitstechnischen Anforderungen an die Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle aus betrieblicher Sicht, Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Bericht zum AP2 im Anhang von GRS-471. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, August 2017.
- /HER 16/ Herold, Philipp: Rückholbarkeit - eine Herausforderung für die Entwicklung von Endlagerkonzepten. Präsentation, 5. Essener Fachgespräch Endlagerbergbau: Essen, 25. Februar 2016.
- /IAEA 10/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Technological Implications of International Safeguards for Geological Disposal of Spent Fuel and Radioactive Waste. IAEA Nuclear Energy Series, NW-T-1.21, ISBN 978-92-0-106809-5: Wien, 2010.
- /JOB 15/ Jobmann, M., Maßmann, J., Meleshyn, A., Polster, M.: Quantifizierung von Kriterien für Integritätsnachweise im Tonstein, Projekt ANSICHT. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Technischer Bericht, TEC-08-2013-AP, 38 S.: Peine, 15. Dezember 2015.
- /JOB 16/ Jobmann, M., Becker, D.-A., Hammer, J., Jahn, S., Lommerzheim, A., Müller-Hoeppe, N., Noseck, U., Krone, J., Weber, J. R., Weitkamp, A., Wolf, J.: Projekt CHRISTA: Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-20-2016-AB, 20. Oktober 2016.
- /JOH 02/ Johnson, L., Schneider, J., Zuidema, P., Gribi, P., Mayer, G., Smith, P.: Project Opalinus Clay - Safety Report, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and longlived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 02-05, 360 S.: Wetingen, 1. Dezember 2002.

- /KIN 04/ Kind, A.: Rückholbarkeit/Reversibilität in nationalen und internationalen Endlagerprogrammen, Statusbericht. Hrsg.: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3210, 110 S., 2004.
- /KOC 12/ Kock, I., Eickemeier, R., Frieling, G., Heusermann, S., Knauth, M., Minkley, W., Navarro, M., Nipp, H.-K., Vogel, P.: Integritätsanalyse der geologischen Barriere, Bericht zum Arbeitspaket 9.1, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-286, 301 S., ISBN 978-3-939355-62-5: Köln, 2012.
- /KOM 16/ Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe: Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. K-Drs. 268, 683 S.: Berlin, 30. August 2016.
- /KRI 17/ Krischer, A.: Endlagerkonzept im Tonstein (Frankreich), Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Bericht zum AP1 im Anhang von GRS-471. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, August 2017.
- /LAR 13/ Larue, P.-J., Baltés, B., Fischer, H., Frieling, G., Kock, I., Navarro, M., Seher, H.: Radiologische Konsequenzenanalyse, Bericht zum Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-289, 267 S., ISBN 978-3-939355-65-6, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2013.
- /LAR 17/ Larue, P.-J., Lambers, L.: Endlagerkonzept im Salzgestein (Deutschland), Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Bericht zum AP1 im Anhang von GRS-471. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, August 2017.
- /MÖN 12/ Mönig, J., Buhmann, D., Rübél, A., Wolf, J., Baltés, B., Fischer-Appelt, K.: Sicherheits- und Nachweiskonzept, Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-277, 79 S., ISBN 978-3-939355-53-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 2012.

- /NAG 10/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Fragen des ENSI und seiner Experten und zugehörige Antworten der Nagra, Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1. Nagra Arbeitsbericht, NAB 09-29: Wettingen, Schweiz, 2010.
- /NAG 16/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Generische Beschreibung von Schachtkopfanlagen (Nebenzugangsanlagen) geologischer Tiefenlager. Nagra Technischer Bericht, NTB 16-08, 120 S.: Wettingen, Oktober 2016.
- /NEA 04/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA) in co-operation with the European Commission: Engineered Barrier Systems (EBS), Design requirements and constraints ; Workshop Proceedings, Turku, Finland, 26-29 August 2003. Radioactive Waste Management, NEA No. 4548, 145 S., ISBN 92-64-02068-3, Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development: Issy-les-Moulineaux, France, 2004.
- /NEA 11/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel, Final Report of the NEA R&R Project (2007-2011). Radioactive Waste Management, NEA/RWM/R(2011)4, 76 S.: Paris, 2011.
- /PAP 99/ Papp, R.: GEISHA, Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein. Hrsg.: Projektträgerschaft des BMBF für Entsorgung (PTE), Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (FZK), Wissenschaftliche Berichte, FZKA-PTE Nr. 3, 200 S.: Karlsruhe, Mai 1999.
- /PEI 12/ Peiffer, F., McStocker, B.: Einschätzung betrieblicher Machbarkeit von Endlagerkonzepten, Bericht zum Arbeitspaket 12, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-279, 37 S., ISBN 978-3-939355-55-7, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.

- /PIR 13/ Pirot, V.: RD&D plan, for the geological disposal of high-level and/or long-lived radioactive waste including irradiated fuel if considered as waste, State-of-the-art report as of December 2012. Hrsg.: Belgian agency for radioactive waste and enriched fissile materials (ONDRAF/NIRAS), NIROND-TR 2013-12 E, 411 S., 2013.
- /PÖH 10/ Pöhler, M., Amelung, P., Bollingerfehr, W., Engelhardt, H. J., Filbert, W., Tholen, M.: Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein, ERATO, Abschlussbericht. Hrsg.: DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-28-2008-AB, 320 S.: Peine, Juni 2010.
- /SCH 08/ Schneider, J., Gribi, P., Zuidema, P.: Begründung der Abfallzuteilung, der Barriersysteme und der Anforderungen an die Geologie, Bericht zur Sicherheit und technischen Machbarkeit, Vorschlag geologischer Standorte für das SMA- und das HAA-Lager. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 08-05, 555 S.: Wettingen, Oktober 2008.
- /SCH 16/ Schneider-Eickhoff, R.: Rückholbarkeit / Bergbarkeit von Endlagerbehältern Anforderungen an das Behälterdesign. Präsentation, 5. Essener Fachgespräch Endlagerbergbau: Essen, 25. Februar 2016.
- /SKB 11/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project. SKB Technical Report, TR-11-01, 893 S.: Stockholm, Sweden, März 2011.
- /SSM 08/ Swedish Radiation Safety Authority (SSM, Strål Säkerhets Myndigheten): SSMFS 2008:21 The Swedish Radiation Safety Authority Regulatory Code, The Swedish Radiation Safety Authority's regulations and general advice concerning safety in connection with the disposal of nuclear material and nuclear waste. Hrsg.: Yngvesson, U., SSMFS 2008:21, 8 S.: Stockholm, Sweden, 19. Dezember 2008.

- /STA 15/ Stahlmann, J., Leon-Varcas, R., Mintzlaff, V.: Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und Geotechnische Aspekte für die Auslegung, Vertikalprojekt 6: Einlagerung in tiefe geologische Formationen mit Vorkehrung zur Überwachung und Rückholbarkeit. ENTRIA-Arbeitsbericht, ENTRIA-Arbeitsbericht-03, 68 S.: Braunschweig, 2015.
- /TYR 16/ Tyrna, P. L., Mark, C.: MSHA Technical Support Evaluation, Memorandum. Hrsg.: Mine Safety and Health Administration - Roof Control Division, U.S. Department of Labor, 21 S.: Pittsburgh, Pennsylvania, Dezember 2016.
- /UHL 17a/ Uhlmann, S.: Endlagerkonzept im Tonstein (Belgien), Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Bericht zum AP1 im Anhang von GRS-471. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, August 2017.
- /UHL 17b/ Uhlmann, S.: Deutsche Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Ton und Kristallin, Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Bericht zum AP1 im Anhang von GRS-471. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, August 2017.
- /UHL 17c/ Uhlmann, S.: Endlagerkonzept im Tonstein (Deutschland), Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Bericht zum AP1 im Anhang von GRS-471. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, August 2017.
- /WEY 17/ Weyand, T.: Endlagerkonzept im Tonstein (Schweiz), Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Bericht zum AP1 im Anhang von GRS-471. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 83 S.: Köln, August 2017.
- /ZIE 08/ Ziegenhagen, J.: Technische Endlagerkonzepte, Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen (EUGENIA), Bericht zum AP 5. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-10-2008-AP, 146 S.: Peine, September 2008.

- /ZUI 94/ Zuidema, P., Hugli, M., Gribi, P., Niemeyer, M., Resele, G., Schröder, U., Suter, D., Pöttinger, J., van Dorp, F.: Bericht zur Langzeitsicherheit des Endlagers SMA am Standort Wellenberg, Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle (Endlager SMA). Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 94-06, 267 S.: Wetztingen, Juni 1994.
- /ZUI 08/ Zuidema, P., Albert, W., Gautschi, A., Gribi, P., Lambert, A., Müller, H., Schnellmann, M.: Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse, Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 08-03, 428 S.: Wetztingen, Oktober 2008.

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

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de

ISBN 978-3-946607-54-0