

Endlagerkonzept Deutschland Salz (VSG)

Bericht zum Arbeitspaket 1

Anhang 5

Anforderungen an aktuelle
Endlagerkonzepte
für unterschiedliche
Wirtsgesteinsformationen

Endlagerkonzept Deutschland Salz (VSG)

Bericht zum Arbeitspaket 1

Anhang 5

Anforderungen an aktuelle
Endlagerkonzepte
für unterschiedliche
Wirtsgesteinsformationen

Jürgen Larue
Ludger Lambers

August 2017

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende F&E-Vorhaben wurde im Auftrag 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

Anforderungen, Endlagerkonzept, Deutschland, Steinsalz

Kurzfassung

In Deutschland wurden über mehrere Jahrzehnte gezielt Konzepte und technischen Komponenten für ein Endlager in Salz entwickelt. Das nachfolgend dargelegte Konzept für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in einem Salzstock stellt den derzeitigen FuE-Stand dar und basiert u. a. auf den Planungsstand der „Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben“ (VSG). Dieser Bericht gibt daher eine kurze Zusammenfassung der umfangreich durchgeführten Arbeiten in der VSG hinsichtlich der Endlagerauslegung und der betrieblichen Arbeiten unter Berücksichtigung der der Rückholbarkeitsoption wieder.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Gesetzliche Regelung.....	3
3	Endlagerkonzept.....	5
3.1	Sicherheits- und Nachweiskonzept	5
3.2	Abfallinventar und -charakterisierung.....	6
3.3	Behälterkonzepte.....	6
3.4	Endlager-Layout	10
3.5	Betriebliches Einlagerungskonzept	13
3.6	Barrierenkonzept	15
3.7	Co-Disposal	16
3.8	Monitoring.....	17
3.9	Rückholbarkeit.....	18
4	Ableitung von Grundanforderungen	25
	Literatur.....	27
	Abbildungsverzeichnis.....	31

1 Einleitung

Salz in steiler Lagerung als Wirtsgestein wird als bevorzugte Option zur Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle seit nahezu 40 Jahren untersucht. In einer Reihe von Forschungsarbeiten wurden entsprechende Endlagerdesigns für diese Option entwickelt und ihre Machbarkeit und Sicherheit bewertet. Die neuesten Arbeiten zum Endlagerdesign in Forschungsprogramm ISIBEL /BOL 17/ basieren auf Arbeiten im Rahmen des Forschungsvorhabens VSG.

Im Forschungsvorhaben „Vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG)“ wurde für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle auf Basis der Kenntnisse von konzeptionellen Einzeluntersuchungen /BOL 11/, /BOL 12/ und /PEI 12/ ein Endlagerdesign für einem konkreten Standort im Salz (Salzstock Gorleben) entwickelt, der den derzeitigen Stand von W & T bei der Endlagerung im Wirtsgestein Salz in steiler Lagerung widerspiegelt.

Der nachfolgende Bericht gibt daher eine kurze Zusammenfassung der umfangreich durchgeführten Arbeiten in der VSG hinsichtlich der Endlagerauslegung und der betrieblichen Arbeiten unter Berücksichtigung der der Rückholbarkeitsoption wieder. Für Detailinformationen wird auf die zitierten umfangreichen Berichte der VSG verwiesen.

2 Gesetzliche Regelung

Die wichtigsten Anforderungen an die Endlagerauslegung bei der Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in Deutschland werden durch die Sicherheitsanforderungen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) aus dem Jahr 2010 vorgegeben.

Dabei sind hinsichtlich des Nachweises der Betriebssicherheit folgende Punkte zu nennen:

„Für die Sicherheit des Endlagers in der Betriebsphase einschließlich Stilllegung ist die Zuverlässigkeit und Robustheit von Sicherheitsfunktionen innerhalb des Endlagers in Anlehnung an das kerntechnische Regelwerk für vergleichbare Funktionen in anderen kerntechnischen Anlagen nachzuweisen. Für die Betriebsphase sind darüber hinaus in vier Sicherheitsebenen gestaffelte Maßnahmen zu planen, wie dies analog auch für Kernkraftwerke gilt. Durch die Zuordnung dieser vier Ebenen zu Anlagenzuständen und durch die Festlegung der für diese Anlagenzustände zu ergreifenden oder vorgesehenen Schutzmaßnahmen ist ein Konzept in der Tiefe gestaffelter Abwehrmaßnahmen (defence in depth) zu realisieren.“ (Punkt 8.1 in /BMU 10/).

Spezielle Anforderungen an die Abfallgebinde ergeben sich aus Punkt 8.6 in /BMU 10/. Dabei müssen Abfallbehälter unter Berücksichtigung der darin verpackten Abfallprodukte folgende Sicherheitsfunktionen erfüllen:

- „Für die wahrscheinlichen Entwicklungen muss eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole zu beachten.“
- „In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein.“

Weiterhin fordert /BMU 10/, dass Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung oder Bergung getroffen werden, die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen.“

Über die Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ hinaus empfiehlt die Kommission zwischen dem Versatz der Einlagerungsbereiche und dem endgültigen Verschluss

des Endlagers eine zusätzliche Beobachtungsphase /KOM 16/. Hieraus leitet sich eine Zeitspanne von bis zu 600 Jahren ab, in den bestimmte Teile des Bergwerks offengehalten werden müssten, bzw. „Sorge zu tragen ist, dass die geforderte Rückholung bzw. Bergung technisch machbar ist“ /KOM 16/.

3 Endlagerkonzept

In Deutschland wurden über mehrere Jahrzehnte gezielt Konzepte und technischen Komponenten für ein Endlager in Salz entwickelt. Das nachfolgend dargelegte Konzept für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in einem Salzstock stellt den derzeitigen FuE-Stand dar und basiert u. a. auf den Planungsstand der VSG in /BOL 12/, welches aufgrund veränderter Planungsdaten (Rückholbarkeit, Abfallmengen) eine optimierte Weiterentwicklung des Konzeptes von /BOL 11/ darstellt. Des Weiteren werden in /PEI 12/ die betriebliche Machbarkeit der Endlagerkonzepte und in /BOL 12/ Rückholkonzepte für verschiedene Varianten der Endlagerkonzepte beschrieben. Bezüglich der Rückholbarkeit wurden weitere Anpassungen des VSG-Konzeptes in /BOL 14a/ durchgeführt. Alle Konzepte gehen von einer reinen Betriebszeit (Einlagerungszeitraum) von ca. 40 Jahren aus

3.1 Sicherheits- und Nachweiskonzept

Im Sicherheits- und Nachweiskonzept der VSG /MÖN 12/ wurden die 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 Brennstabkaskillen (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 Einzelun-

tersuchungen und den anschließenden Sicherheitsanalysen in /KOC 12/ und /LAR 13/ der VSG erfolgte in einer Synthese /FIS 13/.

3.2 Abfallinventar und -charakterisierung

Im Rahmen des Vorhabens VSG wurden für die Entwicklung der Endlagerkonzepte für wärmeentwickelnde Abfälle inklusive eines möglichen Co-Disposals folgende Abfallströme berücksichtigt /PEI 11/:

- Bestrahlte Brennelemente aus Leistungsreaktoren (direkte Endlagerung von BE)
- Radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung im Ausland sowie aus der Wiederaufarbeitungsanlage in Karlsruhe (HAW-Kokillen).
- Bestrahlte Brennelemente aus Prototyp- und Forschungsreaktoren
- Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung

Dabei wurde in der VSG für die Entwicklung der unterschiedlichen Endlagerkonzepte von einem Abfallvolumen bei den wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen - unter Berücksichtigung des Ausstiegbeschlusses aus der Kernenergie und der verbleibenden Laufzeiten der Kernkraftwerke – von 34.630 Brennelemente (UO₂, MOX, DWR, SWR) bzw. ca. 8.000 HAW-Kokillen und einem Volumen ca. 2.000 m³ für Brennstoffe aus Forschungsreaktoren ausgegangen /PEI 11/. Für das Co-Disposal wurde ein Volumen von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung von ca. 57.000 m³ (u.a. ca. Urantails 35.000 m³) berücksichtigt /BOL 12/.

3.3 Behälterkonzepte

Für eine Endlagerung im Steinsalz wurden in Deutschland die drei verschiedenen Einlagerungskonzepte Streckenlagerung selbstabschirmender POLLUX®-Behälter, direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) in kurzen horizontalen Bohrlöchern und Einlagerung von Kokillen (BSK, BSK-3 bzw. neuentwickelte rückholbare Bohrlochkokillen BSK-R) in tiefe vertikale Bohrlöcher untersucht. Die Kokillen sind nicht selbstabschirmend und müssen daher während des Transports nach untertage bis zum Einlagerungsort in speziellen Transferbehältern transportiert und durch eine Bohrlochschleuse in das Bohrloch abgelassen werden.

Im Rahmen der Arbeiten für die VSG wurden für die Variante B1 (Streckenlagerung) selbstabschirmende Behälter vom Typ POLLUX® und CASTOR® berücksichtigt, die gemäß der BMU-Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ die Anforderungen einer mechanischen Stabilität gegenüber dem im Einlagerungshorizont zu erwartenden Gebirgsdruck, einen gasdichten Einschluss der im Endlagerbehälter verpackten radioaktiven Stoffe, eine ausreichende Abschirmung der in dem Endlagerbehälter verpackten radioaktiven Stoffe während der Transport- und Handhabungsprozesse und eine Langzeitstabilität gegenüber Korrosion bis zum Zeitpunkt, an dem andere Barrieren den sicheren Einschluss gewährleisten müssen /BOL 11/.

Dabei kommen für die unterschiedlichen wärmeentwickelnden Abfälle (i. d. R. Brennstoff) folgende Abfallgebinde zur Anwendung:

- POLLUX®-Behältern (POLLUX®-10) für Brennstäbe ausgedienter Brennelemente aus DWR, SWR und WWER,
- CSD-V (HAW-Kokillen), CSD-B und CSD-C in POLLUX®-Behältern (POLLUX®-9) für radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung,
- Transport- und Lagerbehälter (CASTOR®-Behältern) für ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren /BOL 12/.

Der POLLUX®-10 besteht aus einem Innenbehälter, aus Feinkornbaustahl in einer Wandstärke von 160 mm und einem äußeren Abschirmbehälter aus Sphäroguss in einer Wandstärke von ca. 270 mm. Der Innenbehälter wird durch einen geschraubten Primärdeckel und einen geschweißten Sekundärdeckel dicht verschlossen. Der Abschirmbehälter mit einem verschraubten Deckel hat keine Dichtfunktion. Im Mantel sind in radial verteilten Bohrungen Stäbe aus Polyethylen zur Verringerung der Neutronenstrahlung eingesetzt. Der beschriebene strukturelle Behälteraufbau und die Materialauswahl gewährleisten nach /BOL 11/ die grundlegenden Anforderungen hinsichtlich Rückholbarkeit in der Betriebsphase bzw. der Anforderung einer Handhabbarkeit des Behälters bis 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers.

Die CASTOR®-Behälter der Typen THTR/AVR und KNK bestehen aus einem zylindrischen Grundkörper aus Gusseisen mit Kugelgraphit mit zwei übereinanderliegenden, einzeln abgedichteten Deckeln (Primär und Sekundärdeckel) aus Gusseisen bzw. aus unlegiertem Baustahl. Bei der Handhabung, kann der CASTOR®-Behälter mit einer

Schutzplatte aus Kohlenstoffstahl zum Schutz des Deckelsystems vor Staub, Feuchtigkeit und mechanischen Einwirkungen versehen werden. Zur Handhabung wird der Behälter oben und unten jeweils mit zwei Tragzapfen ausgerüstet /BOL 11/.

Für die Variante B2 (Differenzbetrachtung Transport- und Lagerbehälter, Typ CASTOR®) gelten dieselben Anforderungen wie für die Variante B1. Nachweise sind in weiteren Planungsphasen zu führen /BOL 11/.

Für die Variante C (Bohrlochlagerung) wurden unabgeschirmte Behälter vom Typ Brennstabkokille (BSK) vorgesehen, die die Anforderungen eines gasdichten Einschusses der im Endlagerbehälter verpackten radioaktiven Stoffe und einer mechanischen Stabilität gegenüber noch zu definierender Gebirgsdrücke gemäß BMU-Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ erfüllen müssen /BOL 11/.

Für die Bohrlochlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle (Variante C) in tiefen vertikalen Bohrlöchern wurden folgende Abfallgebinde betrachtet:

- Brennstabkokillen (BSK) für Brennstäbe von DWR-, SWR- und WWER-BE,
- Triple-Packs (BSK-3) für CSD-V (HAW-Kokillen), CSD-B und CSD-C, wobei diese Behälter, die in Form und Dimension der Brennstabkokille (BSK) entspricht, jeweils 3 Kokillen enthalten und
- modifizierte Brennstabkokillen für ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren in /BOL 11/.

Bei der Bohrlochlagerung in einem Endlagerbergwerk ist geplant, Behälter von der Einlagerungssohle aus in bis zu 300 m tiefe Bohrlöcher einzulagern. Als Behälter für die Brennstabkokillen sollen sogenannte Brennstoffkokillen „BSK 3“ oder „Triple Pack“ Behälter verwendet werden (siehe Abbildung Abb. 3.1) /BOL 16/.

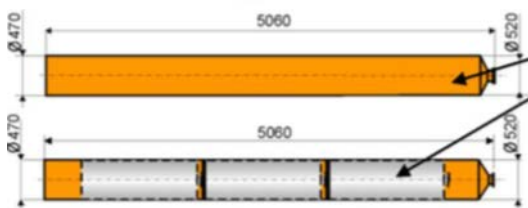


Abb. 3.1 BSK 3 und Triple Pack Behälter /BOL 16/

Für eine Rückholbarkeitsoption wurden darüber hinaus in der VSG das Konzept für die Variante C (Bohrlochlagerung) überarbeitet und die bisherigen für die Endlagerung im

Salz vorgesehenen Behälter (BSK, BSK3) für eine mögliche Rückholbarkeitsoption weiterentwickelt (BSK-R, BSK-3R) /BOL 14b/. Die planerisch neuentwickelten für eine Rückholung optimierte Behälterversionen beinhalteten gezogene Brennstäbe aus 3 DWR-BE oder 9 SWR BE in einem zylindrischen Behälterkörper (Overpack) mit 40 mm Wandstärke (BSK-R) bzw. 3 HAW-Kokillen (CSD-V), 3 CSD-B oder 3 CSD-C in einem zylindrischen Behälterkörper (Overpack) mit 5 mm Wandstärke (BSK-3R). Ihre Langzeitbeständigkeit gegenüber Korrosion muss im Zusammenhang mit dem gewählten Einlagerungskonzept, das Rückholung ermöglicht, geklärt werden.

Die neuentwickelte rückholbare Bohrlochkokille (BSK-R), die sowohl die Brennstäbe der Leistungsreaktoren, Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie Forschungsreaktoren aufnehmen als auch Kokillen mit Wiederaufarbeitungsabfällen aufnehmen kann, entspricht im Wesentlichen der Länge der alten BSK. Die Konizität der BSK-R erleichtert im möglichen Rückholprozess das Ziehen der Kokillen (siehe Abb. 3.2) /BOL 14b/.

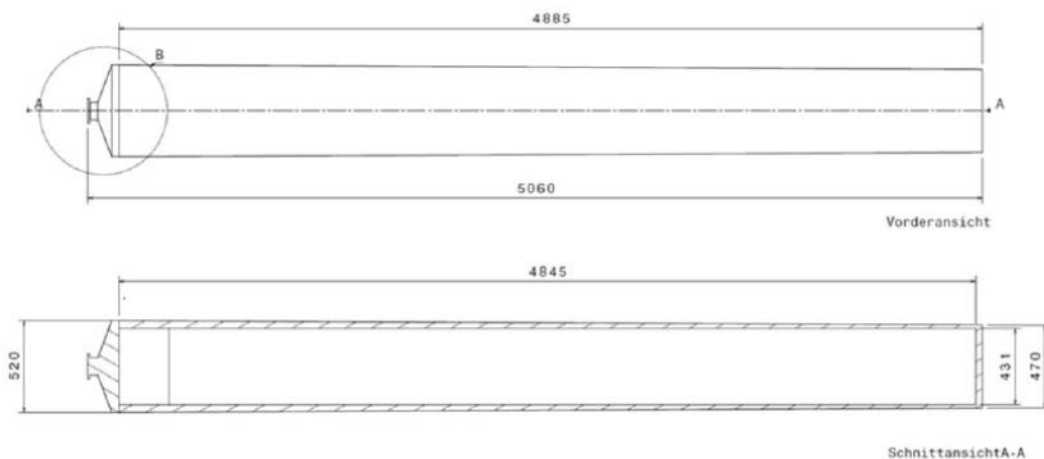


Abb. 3.2 Seitenansicht (oben) und Schnitt (unten) der rückholbaren Kokille (BSK-R) für ausgediente Brennstäbe und Wiederaufarbeitungskokillen (aus: /BOL 14a/)

Für die Endlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung wurden Behälter gewählt, die auch für die Verpackung der Abfälle für das Endlager Konrad zu verwenden sind (Behältergrundtypen) /BOL 11/. Diese sind Betonbehälter vom Typ I und II, Gussbehälter vom Typ I bis III sowie Container vom Typ I bis VI.

3.4 Endlager-Layout

Für die aus den im Vorhaben VSG entwickelten Endlagerkonzepten resultieren Bergwerk- Layouts wurden jeweilige Auffahrungs- und Einlagerungskonzepte sowie das Verfüll- und Verschlusskonzepte entwickelt. Basis für die Einlagerung aller wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle im Salzstock Gorleben waren Endlagerlayouts zur Einlagerung

- von POLLUX- (CASTOR)- Behältern in horizontalen Strecken (Variante B1),
- von Transport- und Lagerbehältern (TLB, Typ CASTOR) in horizontalen Bohrlöchern (Variante B2) sowie
- von BSK in tiefen, vertikalen Bohrlöchern (Variante C).

Diese Konzepte wurden jeweils in Kombination mit einem optionalen Co-Disposal, d. h. der Einlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in horizontalen Einlagerungskammern in einem Endlagerflügel südwestlich der Schächte (Variante A) entwickelt (s. Kapitel 3.7). Die aufzufahrenden Bergwerke nehmen eine Fläche von 1,1 km² für die Bohrlochlagerung und 2,1 km² bei Streckenlagerung /BOL 14a/ ein. Laut VSG werden Einlagerungsfelder mit insgesamt ca. 130 Strecken in dem POLLUX/CASTOR- Streckenlagerungskonzept, 17 im BSK-Bohrlochlagerungskonzept (bei ca. 225 Bohrlöchern) und ca. 1.600 Kurzbohrlöcher im horizontalen TLB - Kurzbohrlochkonzept geplant /ENG 95/.

Derzeit befindet sich am Standort Gorleben auf einer Teufe von 840 m eine Erkundungssohle. Die Planungen laut VSG sehen eine Einlagerungssohle auf 870 m vor. Die Zugänge zu dem jeweiligen Endlagerbergwerken von über Tage führen über zwei bereits bestehende Tagesschächte (Gorleben 1 und 2), an die sich südlich ein Infrastrukturbereich anschließt. Die Auffahrung der jeweils erforderlichen Einlagerungsfelder erfolgen in einer Teufe von 870 m u. GOK, d. h. 30 m unterhalb des derzeitigen Erkundungsbergwerks (840 m), im Zentralteil des Salzstockes. Die für die Infrastruktur der Einlagerung erforderlichen Richtstrecken und Querschläge werden in Richtung Nordosten für die wärmeentwickelnden Abfälle und bestrahlten Brennelemente und für die vernachlässigbar wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in Richtung Südwesten aufgefahren

Im Rahmen der VSG wurde für den Standort Gorleben zur Umsetzung des Einlagerungskonzeptes der Streckenlagerung ein Endlagerdesign für das benötigte Grubengebäude zur Unterbringung aller Endlagerbehälter entworfen (siehe Abb. 3.3). Vom zentralen Infrastrukturbereich zwischen Schacht 1 und 2 erschließen zwei Richtstrecken den Einlagerungsbereich in östliche Richtung. Der Verlauf der Richtstrecken richtet sich, unter der Einhaltung von Sicherheitsabständen, nach den vorhandenen Salzstrukturen. Die südliche Richtstrecke ist dem Überwachungsbereich (ÜB) zugeordnet und dient der Durchführung der bergmännischen Tätigkeiten. Im geplanten Querschnitt von 23 m² sind Fahrwege und eine Bandanlage untergebracht. Die nördliche Richtstrecke ist dem Kontrollbereich (KB) zugeordnet. Hier findet der Transport zwischen Schacht 2 und den Einlagerungsstrecken statt. Im Querschnitt von 24 m² sind die Gleisanlage und ein Fahrweg für nicht gleisgebundene Fahrzeuge untergebracht /BOL 14a/.

Grundlagen für die Auslegung des Endlagers bilden die Ergebnisse von Erkundungen sowie Planungswerte für die End zu lagernden Abfälle. Des Weiteren sind Sicherheitsabstände einzuhalten. In der Vorbemessung betragen die Sicherheitsabstände mindestens 50 m zu potenziellen Störungszonen und relevanten Schichtgrenzen (Kaliflöz oder Anhydrit, sowie einen Sicherheitsabstand von dem Einlagerungsort wärmeentwickelnder Abfälle zum Schacht von 300 m /BOL 11/. Die Abstände zwischen Endlagerbehältern, Einlagerungsstrecken und -Bohrlöchern wurden aus bereits vorliegenden Ergebnissen thermischer Berechnungen abgeleitet, wobei auslegungsbestimmend eine Höchsttemperatur von 200 °C an der Kontaktfläche zwischen den Endlagerbehältern und dem Salzgrusversatz, die über den betrachteten Zeitraum von 1 Mio. Jahren nicht überschritten werden darf /BOL 11/.

Eine schematische Darstellung des Endlagers für die Variante B1 (Streckenlagerung) ist in Abb. 3.3, die des Endlagers für die Variante C in Abb. 1.2 bzw. für die Variante C in Abb. 3.4 zu finden.

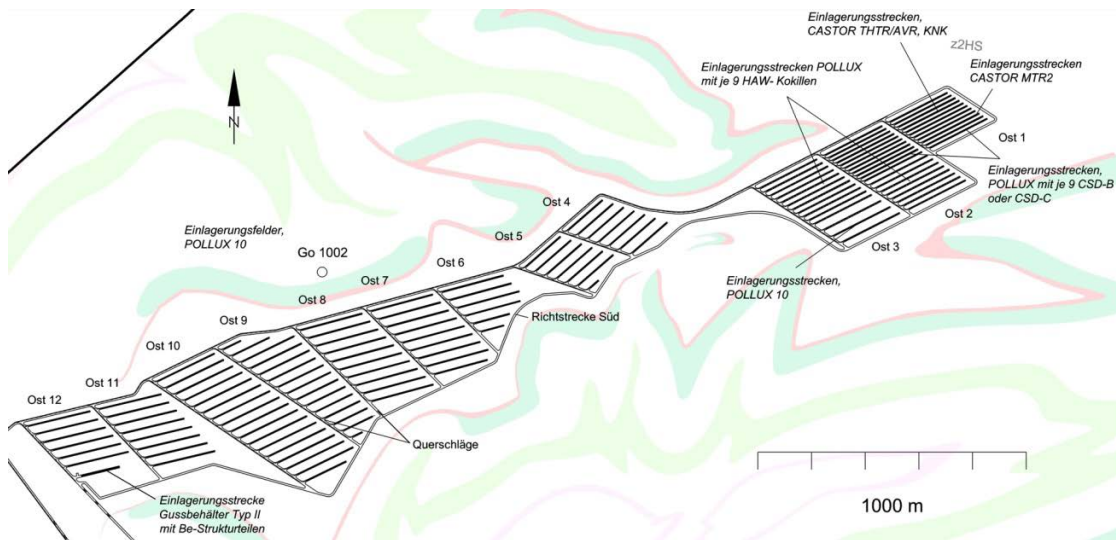


Abb. 3.3 Variante B1: Einlagerungsfelder (Ost 1 bis 12) für die Streckenlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und Brennelement-Strukturteilen im Ostflügel, aus /ENG 95/

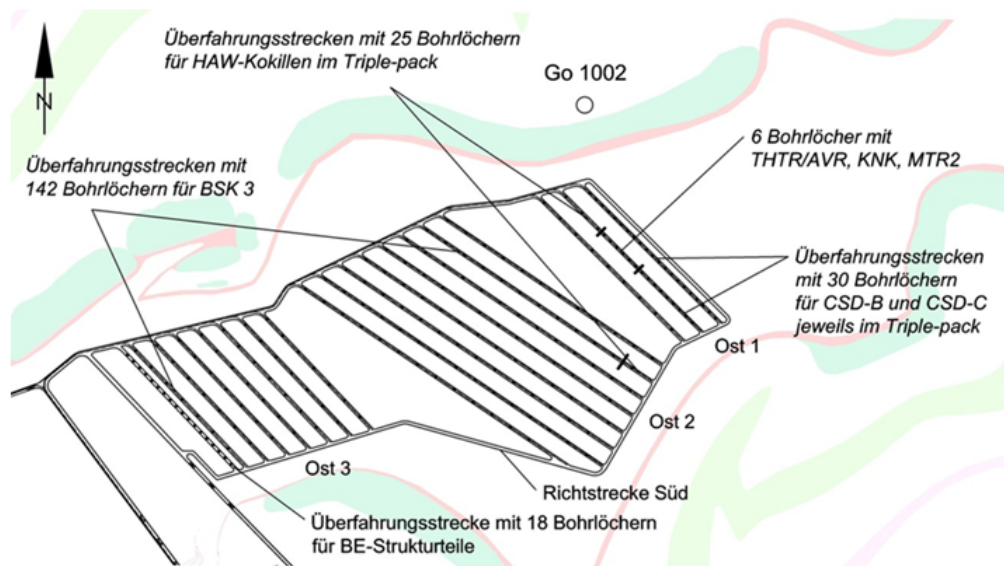


Abb. 3.4 Variante C: Bohrlochlagerung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen sowie Brennelement-Strukturteilen im Ostflügel des Salzstockes, aus /ENG 95/

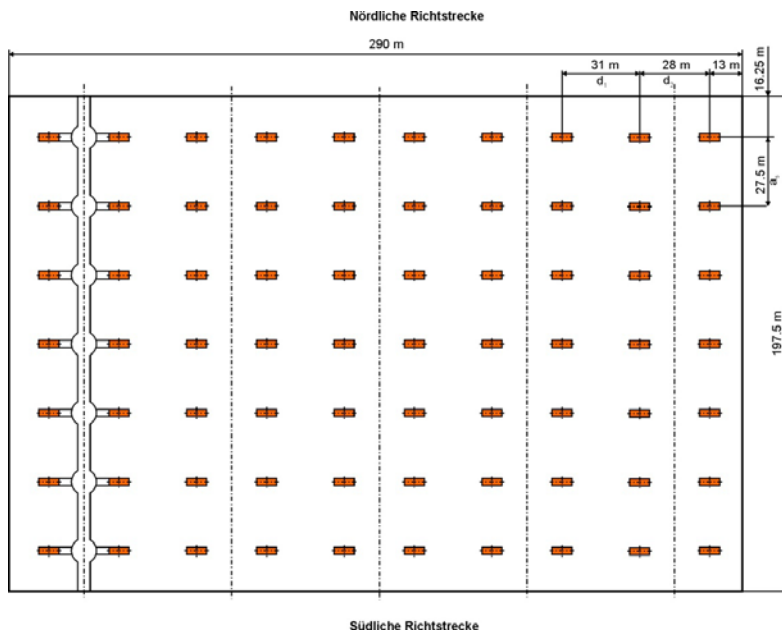


Abb. 3.5 Variante B2: Horizontale Bohrlochlagerung von Transport und Lagerbehälter (TLB), aus /BOL 12/

Die Gesteinsfestigkeit und die Eigenstabilität des Gebirges erlauben eine weitgehend ausbaulose und einfache Herstellung der Transport- und Einlagerungshohlräume. /BOL 14a/. Auch unter Berücksichtigung einer Rückholbarkeitsoption ist ein Ausbau der Strecken in den Einlagerungsfeldern nicht erforderlich, da das RE-Miningkonzept d.h. die Behälterfreilegung durch bergbauliche Tätigkeiten ohne einen entsprechenden Ausbau auskommt. Eine Ausnahme bildet die tiefe vertikale Bohrlochlagerung in der Metallliner mit Sandversatz die Rückholbarkeit der BSK erlauben soll (s. Kapitel 3.10).

Nach /BOL 14a/ bilden die seit 150 Jahren gewonnenen Erfahrungen des industriellen Steinsalz- und Kalibergbaus eine solide Basis und einen Nachweis zur Beherrschbarkeit und Durchführbarkeit anforderungsgerechter Auffahrungen des Salzgebirges bzw. des Wiederauffahrens von versetzten Strecken im Steinsalz in steiler Lagerung.

3.5 Betriebliches Einlagerungskonzept

Zur Überprüfung Grundanforderung an den Betrieb des Endlagers aus den BMU-Sicherheitsanforderungen wurde in der VSG für die vorliegenden Endlagerlayouts untersucht, ob es bereits zu Beginn der Endlagerplanung grundlegende Anforderungen

aus Sicht der Betriebssicherheit gibt, die direkten Einfluss auf die Wahl der Einlagerungsvariante haben. Basis hierfür lieferte zu Grundanforderung an den Betrieb des Endlagers aus /BMU 10/ (s. Kapitel 2). Obschon die betriebliche Organisation nicht Teil der Aufgaben des Forschungsvorhabens VSG waren, wurde überprüft ob mit den geplanten Betriebsabläufen und der verfügbaren Betriebstechnik die Sicherheitsanforderungen des Bergbaus und des Strahlenschutzes im bestimmungsgemäßen Betrieb sowie bei Betriebsstörungen durch geeignete technische und/oder organisatorische Maßnahmen gewährleistet werden kann.

In den drei Endlagerkonzepten erfolgte die Einlagerung während der Betriebsphase beginnend vom schachtfürnsten Punkt des Endlagerbergwerkes im Rückbau. Hierzu erfolgt vor Beginn der Einlagerung die Auffahrung der Hauptstrecken bis zum schachtfürnsten Einlagerungsfeld, wobei die Einlagerungen der Abfallgebände in den schachtfürnsten Einlagerungsfeldern beginnen und in den schachtnahen Bereichen enden. Die Abfallgebände werden in der Einlagerungsvariante B1 nach der Annahme auf Schienen gebundene Plateauwagen umgeladen. Die Plateauwagen werden in den Förderkorb gefahren und hiermit auf die Endlagersole befördert. Auf der Einlagerungssole werden die Plateauwagen mit Batterie betriebenen Lokomotiven zum Einlagerungsort gezogen. Am Einlagerungsort werden die Endlagerbehälter mit Hilfe einer Einlagerungsvorrichtung auf die Sole gehoben und anschließend die Einlagerungsstrecke mit Salzgrus versetzt.

In der Einlagerungsvariante C werden Kokillen oder Triple-Packs in dickwandigen Transferbehältern angeliefert. Die Transferbehälter werden ebenfalls auf einem Plateauwagen über den Schacht in die Einlagerungsbereiche transportiert. In der Einlagerungsebene werden die Plateauwagen mit Hilfe der Batterie-Lokomotive zum Einlagerungsort gezogen. Am Einlagerungsort werden die Kokillen oder Triple-Packs mit Hilfe einer Einlagerungsvorrichtung in Bohrlöcher herabgelassen.

Abfallgebände mit nicht wärmeentwickelnden Abfällen werden ebenfalls mit Hilfe von Plateauwagen über den Schacht zum Einlagerungsort transportiert. Am Einlagerungsort werden die Abfallgebände mit Hilfe eines Stapelfahrzeuges an die endgültige Position gebracht. Eventuell eingesetzte Tausch- oder Transportpaletten werden wieder nach über Tage befördert.

Das Einlagerungskonzept der VSG sah vor, das Grubengebäude während der gesamten Betriebszeit einsöhlilig zu bewettern und nur die vorhandenen Grubenbaue der Ein-

lagerungssohle, ohne die über dem Einlagerungsniveau liegende Erkundungssohle, zur Bewetterung zu nutzen. Mit den zwei Tagesschächten von jeweils 7,5 m Durchmesser kann eine Kapazität des Hauptwetterstroms ca. 26.500 m³/min eingehalten werden. Der Wetterbedarf der Einlagerungsfelder der Bohrlochlagerung ergibt sich aus der Art und der Anzahl der aktiven Betriebspunkte.

Die Eingliederung der Rückholung in das Endlagerkonzept während der Betriebsphase erfolgte als sogenanntes „Re-Mining“-Konzepts als Bestandteil der Endlagerauslegung. Dabei wurden im Rückholungskonzept eine technischen Umsetzung, die notwendigen Prozessschritten und der Zeitaufwand beschrieben. Weiterhin fand in /BOL 12/ u. a. eine abschätzenden Wetter- und Klimabetrachtung unter betrieblichen radiologischen Rahmenbedingungen statt.

3.6 Barrierenkonzept

Die verbleibenden Hohlräume werden unmittelbar nach dem Verbringen der Abfälle mit Salzgrus versetzt. Es wurde ein Verfüll- und Verschlusskonzept für die jeweiligen zu versetzenden- oder zu verfüllenden Hohlräume erarbeitet. Das viskoelastoplastische Materialverhalten von Salzgestein und Salzgrus führt langfristig zum vollständigen Einschluss der Endlagerbehälter /BOL 14a/.

Es ist vorgesehen, dass grundsätzlich die offenen Hohlräume des Endlagerbauwerkes sukzessive, nachdem sie nicht mehr genutzt werden (z. B. Transportstrecken) oder nachdem die Endlagerbehälter eingelagert worden sind (z. B. Einlagerungsstrecken), mit Versatzmaterial verfüllt werden. Als Versatzmaterial wurde Salzgrus ausgewählt, weil es als arteigenes Material (gebrochenes Salz aus der Streckenauffahrung) in seiner stofflichen Zusammensetzung dem Wirtsgestein gleich ist, weil es in ausreichender Menge ohne weitere Aufarbeitung im Endlagerbergwerk zur Verfügung steht und weil es mit erprobten Verfahren in die Grubenbaue eingebaut werden kann. Eine Ausnahme bildet der Infrastrukturbereich, welches mit langzeitstabilen Material versetzt wird /BOL 11/.

Zur Beschleunigung der Kompaktion des Versatzkörpers wird der Salzgrus für die Richt- und Transportstrecken eine geringe Menge Lösung (max. 1 Gew.-%) beigegeben. Da möglicherweise über lange Zeiträume aus dem kompaktierenden Versatz der Richtstrecken austretende Feuchte in die Einlagerungsstrecke zu den POLLUX®-

Behältern gelangen können, werden die Querschläge in Richtung der Richtstrecke durch einen ca. 10 m langen Pfropfen aus Sorelbeton, welcher langzeitbeständig gegenüber salinaren Lösungen ist, verschlossen /BOL 11/.

Als weitere Barrieren werden an ausgewählten Stellen der Zugangs- und Transportstrecken Streckenverschlüsse eingebracht und die Tagesschächte mit einem gestaffelten System von Trag- und Abdichtelementen verschlossen /BOL 11/.

3.7 Co-Disposal

Als Co-Disposal bezeichnet man die Endlagerung unterschiedlicher Abfallarten am selben Standort. In der VSG wurde als Option die Einlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in horizontalen Einlagerungskammern (Variante A) räumlich getrennt von Einlagerungsfelder der wärmeentwickelnden Abfälle betrachtet.. Diese räumliche Trennung der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle (Uran-tails, graphithaltige Abfälle sowie sonstige Mischabfälle) erfolgt in einem eigenen Endlagerflügel (Westflügel) und die wärmeentwickelnden Abfälle (einschließlich der Brennelement-Strukturteile und der CSD-B/CSD-C Abfälle aus der Wiederaufarbeitung) im Ostflügel. Verbunden sind diese Endlagerflügel nur über die Richt- und Transportstrecken, die zu den gemeinsamen unterirdischen Infrastrukturbereichen und Schächten führen.

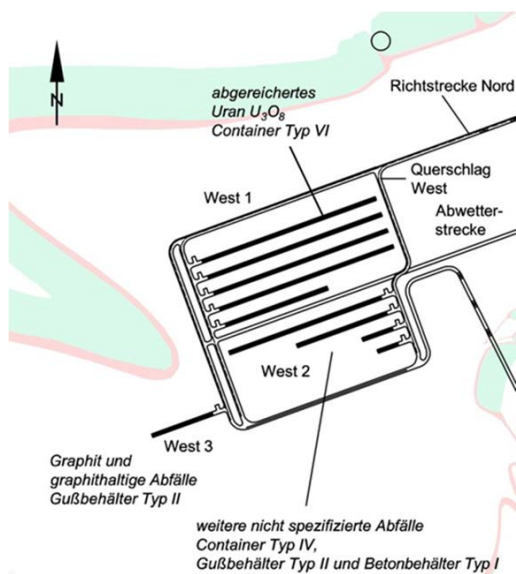


Abb. 3.6 Variante A: Optimierte Einlagerungsfelder (West 1 bis West 3) für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung im Westflügel, aus /BOL 12/.

Das Einlagerungskonzept der VSG sah für die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle eine getrennte Einlagerung der drei Abfalltypen in verschiedenen Teilfeldern des Westfeldes vor. Geplant wurde das Einlagerungslayout auf Basis eines Abfallinventars von 7.217 Stahlblechcontainer Typ VI für Uranoxid (West 1 in Abb. 3.6), 1.695 Stahlblechcontainer Typ IV bzw. 1.150 Gussbehälter Typ II ohne Blei-Abschirmung bzw. 800 Betonbehälter Typ I aus Normal- und aus Schwerbeton für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Mischabfälle (West 2 in Abb. 3.6) und 2.300 Gussbehälter Typ II ohne Blei-Abschirmung für graphithaltige Abfälle (West 3 in Abb. 3.6).

3.8 Monitoring

Unterschiedliche Endlagerphasen (von der Vorbetriebs- bis zur Nachbetriebsphase) benötigen unterschiedliche Monitoring - Maßnahmen. Monitoring-Programme müssen so ausgelegt und installiert werden, dass das Gesamtsicherheitsniveau des Endlagers in der Nachverschlussphase erhalten bleibt. Während der Betriebsphase beschränkt sich das radiologische Monitoring darauf Kontaminationsverschleppung aus dem Kontrollbereich zu verhindern. Hierzu dienen Maßnahmen zur Überwachung der Ortsdosis und Ortsdosisleistung in Räumen und an Arbeitsplätzen und die Überwachung der Raumluft und Wetter. Die Personenüberwachung erfolgt gemäß § 40 und § 41 StrlSchV /SSV 11/. Ein betriebliches Monitoring des Endlagers, welches durch kontinu-

ierliche oder periodische Überwachungen und Messungen, der Beurteilung dienen soll, wie sich das Endlager entwickelt, wurde in Rahmen der VSG-Arbeiten nicht beschrieben. Jedoch wurden bzw. werden im Nachgang der VSG in Forschungsarbeiten (u. a. MoDerRn-Projekt bzw. MoDeRN 2020) generische Monitoring-Methoden entwickelt /JOB 13/. Unter der Prämisse, dass Monitoring die Langzeitsicherheit nicht gefährden darf, werden entsprechende Messinstrumente und Messeinrichtungen entwickelt. In einigen Ländern wird derzeit Monitoring in der Form von „Monitoring in Versuchsanlagen/Versuchsfeldern“ (z. B. Schweiz) verfolgt. Dies bietet die Möglichkeit Messinstrumentarien zu entwickeln, zu verbessern und auftretende Prozesse bereits während des Endlagerbetriebs zu verstehen. So können ggf. Anpassungen von Monitoring-Programmen noch vor Schließung eines Endlagers erfolgen /JOB 13/. Im Forschungsvorhaben ENTRIA /RÖH 16/ wird derzeit eine neue Strategie für ein Entsorgungs- und Monitoring-Konzept für ein HAW-Tiefenlager in den verschiedenen Wirtsgesteinen u. a. auch Salzgestein verfolgt. In diesem Projekt wird angesichts grundsätzlicher konzeptioneller Erweiterungen vorgeschlagen, das Endlager übergeordnet als „HAW-Entsorgungsanlage“ funktional und zeitlich vom Begriff Endlager zu trennen. Nach Beendigung der Einlagerung von Abfällen wird Tiefenlager weiterhin über einen bestimmten Zeitraum überwacht und erst daran anschließend zu einem nachsorgefreien Endlager deklariert. Ein direktes Monitoring könnte nach /LUX 17/ u. a. im Salzgestein in einem zweisöhligen Entsorgungsbergwerk z. B. durch Anordnung einer längerfristig nach Versatz und Verschluss der Einlagerungssohle offenzuhaltenden Überwachungssohle erfolgen, die mit der Einlagerungssohle über Beobachtungs- bzw. Messbohrlöcher verbunden ist.

3.9 Rückholbarkeit

Vor September 2010 war die Rückholbarkeit nicht Bestandteil der Sicherheitskriterien/-anforderungen bzw. wurden in den Sicherheitskriterien /BMI 83/ ausdrücklich ausgeschlossen wurde. Mit Veröffentlichung der Sicherheitsanforderungen des BMU an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 10/ müssen bestehende oder neue Endlagerkonzepte für Deutschland um die Rückholbarkeit erweitert werden.

Die BMU-Sicherheitsanforderungen fordern hinsichtlich der Rückholbarkeit in Artikel 8.6, dass in der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein muss.

Für die Rückholbarkeit in der Betriebsphase und einer eventuellen Bergbarkeit in der Nachbetriebsphase gelten folgende grundlegende Anforderungen:

- „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 der Freisetzung von radioaktiven Aerosolen zu beachten.“
- „In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein.“ /BMU 10/

Die hinsichtlich der Gewährleistung und Erleichterung der Rückholbarkeit von Abfallgebunden zu treffenden Maßnahmen dürfen keine passiven Sicherheitsbarrieren und damit nicht die Langzeitsicherheit beeinträchtigen /BMU 10/.

Um die Rückholung der Abfälle zu ermöglichen wurde ein „Re-Mining-Konzept“ abgeleitet. Dies ergänzt das Endlagerkonzept mit der planmäßigen Einlagerung der Endlagerbehälter sowie deren Versatz und den Verschluss der Strecken um das Rückholungskonzept. Im Falle einer Entscheidung zur Rückholung müssen die Endlagerbehälter dann durch bergbauliche Tätigkeiten wieder freigelegt und unter Einhaltung betrieblicher und strahlenschutztechnischer Belange mit vorhandener oder angepasster Einlagerungstechnik aus dem Endlager nach über Tage transportiert und dort zwischengelagert werden. Entsprechend dem Sicherheits- und Nachweiskonzeptes der VSG /MÖN 12/ und dem daraus abgeleiteten Endlagerauslegung zur Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle im Salzstock Gorleben sollen die Endlagerbehälter für die endgültige Endlagerung eingelagert und die Hohlräume versetzt und die Strecken entsprechend verschlossen werden bei möglichst wenigen konzeptionellen und technischen Anpassungen zur Erleichterung der Rückholung. Dadurch sollen negative Einflüsse auf die Langzeitsicherheit vermieden werden /BOL 14a/. Als abdeckende Randbedingung wird von einer Rückholung zum Ende der Betriebs- und Verschlussphase ausgegangen. D. h. zu einem Zeitpunkt zu dem die Strecken verfüllt und die Streckenverschlüsse errichtet sind. Zugänglich sein sollten der Infrastrukturbereich und die Schächte /BOL 16/.

Für die Rückholbarkeit von Abfallbehältern werden für die Variante B1 (Streckenlagerung) und Variante C (Bohrlochlagerung) unterschiedliche Konzepte entwickelt. In beide Konzepte werden jedoch zunächst die benötigten bereits versetzten und verschlossenen Grubenräume wieder aufgefahren.

Rückholungskonzept für Pollux-Behälter aus der Streckenlagerung (Einlagerungsvariante B1)

In der VSG wurden zwei Konzepte zur Rückholung der Pollux-Behälter aus der Streckenlagerung entwickelt. Im „Zugkonzept“ werden von den wiederaufgefahrenen Querschlägen Rückholungsstrecken durchschlägig und parallel direkt neben den alten Einlagerungstrecken neu aufgefahren werden. Schrittweis wird je ein Behälter nach Entfernung des Salzes durch eine noch zu entwickelnde Vorrichtung in die Streckenmitte gezogen und weg transportiert. Eine alternative Rückholungstechnologie stellt die „vollständige Freilegung“ dar, bei der zunächst beidseitig des Behälters Rückholungsstrecken aufgefahren (s. Abb. 3.8), anschließend der verbleibende Pfeiler zwischen beiden Strecken gewonnen und damit die Behälter schrittweise freigelegt (s. Abb. 3.9). Im entstehenden Streckenprofil liegt der freigelegte Behälter in der Streckenmitte und wird durch eine modifizierte Einlagerungsvorrichtung (modifizierte POLLUX®-Aufnahme) angehoben und wegtransportiert. Zur Aufnahme der POLLUX®-Behälter dienen Tragzapfen, wobei man davon ausgeht, dass diese zum Zeitpunkt der Rückholung als Anschlagmittel noch genutzt werden können. Ein entsprechender Nachweis, dass die Tragzapfen und die Schraubverbindungen als Anschlag zur Verfügung stehen, ist nach /BOL 14a/ noch zu erbringen. Ein alternatives Anschlagssystem wird in einer vollständige Umschlingung des Behälters unterhalb der Tragzapfen durch eine Rahmenkonstruktion wie in Abb. 3.7 dargestellt, gesehen /BOL 14a/.

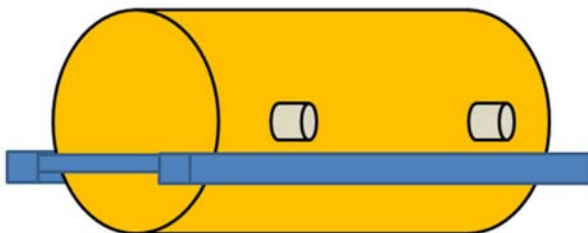


Abb. 3.7 Schematische Darstellung einer modifizierten POLLUX®-Aufnahme /BOL 14a/.

Mit dem Ziel, die Einlagerungsschritte während der Rückholung umzukehren soll wie im Einlagerungskonzept gleisgebunden erfolgen /BOL 14a/

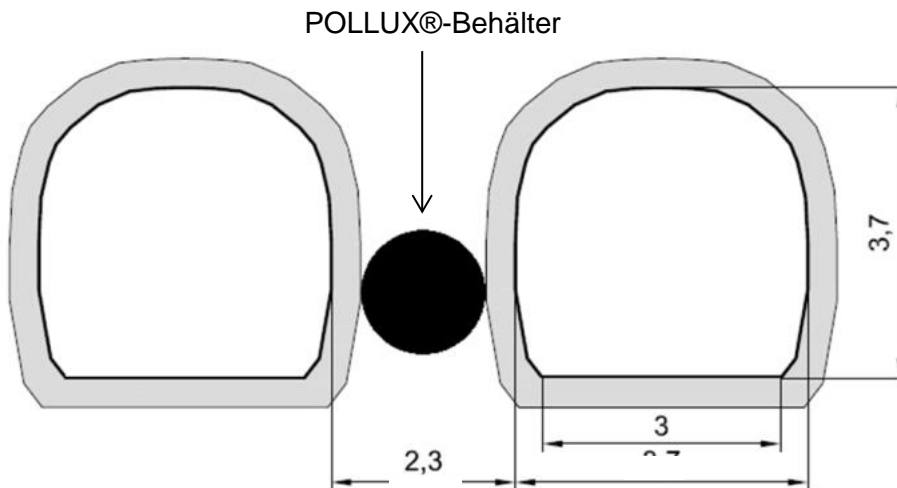


Abb. 3.8 Vorbereitung zur Rückholung (nach /BOL 16/)

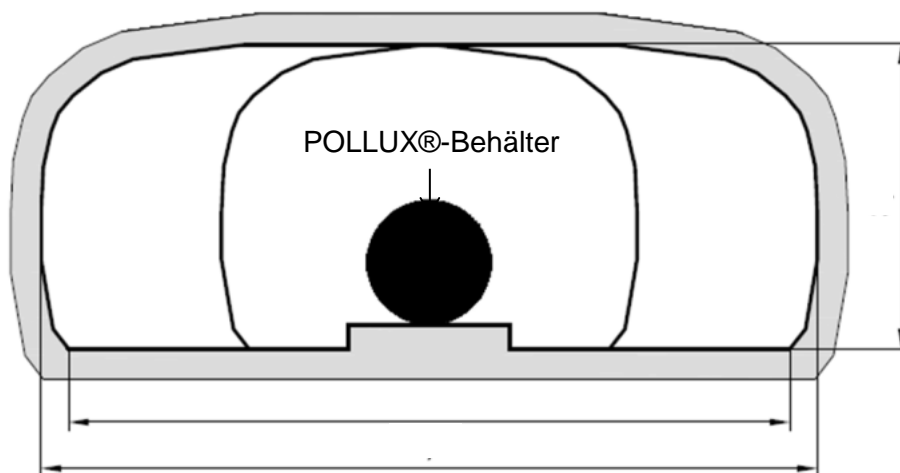


Abb. 3.9 Fertiggestellte Rückholungsstrecke (nach /BOL 16/)

Ausgehend von den thermischen Annahmen, dass im Einlagerungsbereich maximale Gebirgstemperaturen von 200 °C zu erwarten sind, wurden in /BOL 12/ rechnerische Abschätzung durchgeführt, mit welchen Wettermengen und Wettertemperaturen die Vorschriften der Klimabergverordnung einzuhalten sind.

/BOL 12/ unterstellt, dass die zur Rückholung aufgefahrenen Strecken nach ihrer Auf-fahrung durch Wetter gekühlt werden müssen. Exemplarisch wird in /BOL 12/ darge-stellt, wie sich die Austrittstemperatur der Wetter, die zur Kühlung einer erneut aufge-fahrenen Strecke eingesetzt werden, entwickelt. Insgesamt geht /BOL 12/ davon aus, dass bei einer Gebirgstemperatur von 200 °C den Frischwetterstrecken ausreichend

Zeit zum Abkühlen gegeben werden muss, um mit entsprechend kühlen Wetter in die Rückholungsstrecken einzutreten.

Rückholungskonzept für Bohrlochlagerung (Einlagerungsvariante C)

Für die Rückholungsoption von eingelagerten BSK-R aus der Bohrlochlagerung werden alle Bohrlöcher mit einer Verrohrung ausgestattet, die entsprechend den zu erwartenden gebirgsmechanischen Belastungen dimensioniert ist. Die Konvergenz innerhalb des Bohrlochs wird durch ein Rohr mit Wandstärke von 50 mm in dem im Einlagerungsprozess die BSK-R eingelassen und mit Sand die Zwischenräume verfüllt werden, unterbunden. Der Außendurchmesser der Verrohrung beträgt 720 mm. Im Rückholprozess selber werden zunächst die Zugangs- und Richtstrecken wiederaufgefahren und der Bohrlochkellers 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 Kokille und zieht diese aus dem Bohrloch /BOL 12/.

Nach dem die BSK-R gezogen wurden, werden sie aus Gründen des betrieblichen Strahlenschutz im Transferbehälter wieder nach über Tage gebracht, wobei die bereits während der Einlagerung genutzte Technik zum Einsatz kommen /BOL 14a/.

Rückholungskonzept für Transport- und Lagerbehälter (Einlagerungsvariante B2)

Im Konzept für die Rückholung der TLB wurde das für den POLLUX®-Behälter vorgesehene "Zugkonzept" verworfen. Die TLB sollen nach der Freilegung durch eine neue Rückholungsmaschine angehoben und auf einen Transportwagen übergeben werden. Die vorgesehene Rückholung der TLBs ist an das Konzept der POLLUX®-Rückholung angelehnt. Zwischen den wiederaufgefahrenen Richtstrecken sollen Querschläge die einzelnen Einlagerungsfelder erschließen. Zwischen diesen Querschlägen werden dann Rückholungsstrecken aufgefahren. Die Rückholungsstrecken verlaufen senkrecht zu den versetzten Einlagerungstrecken (siehe Abb. 3.10). Damit liegen die Strecken in der Behälterlängsachse und ein zusätzlicher Arbeitsschritt für ein Drehen der Behälter entfällt /BOL 14a/.

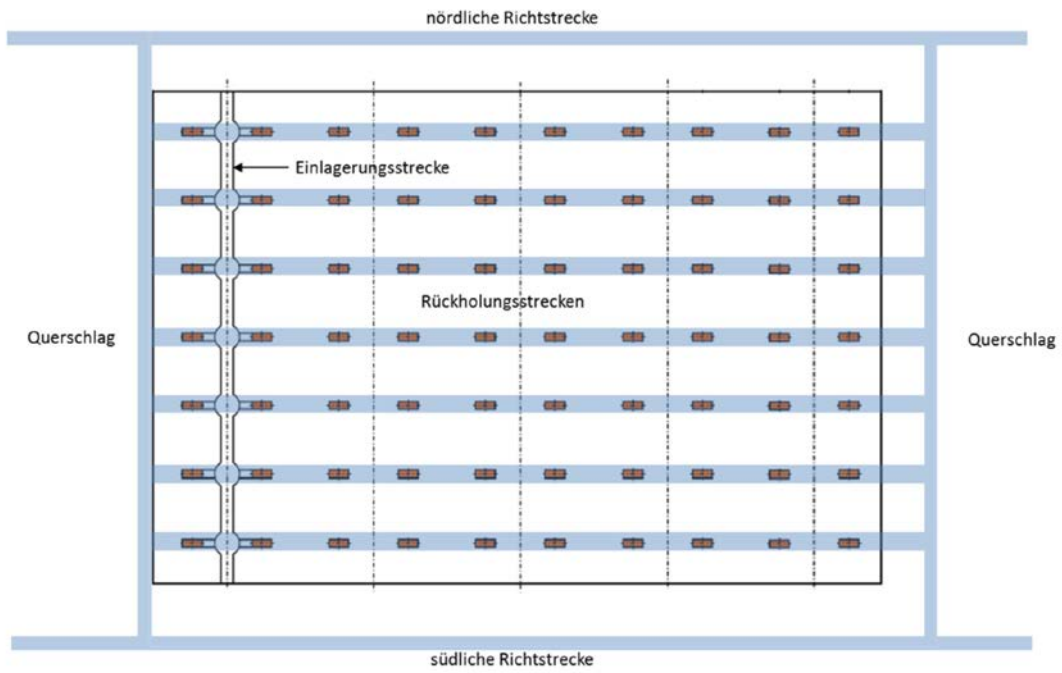


Abb. 3.10 Streckenauffahrungsschema für die Rückholung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) nach /BOL 12/.

4 Ableitung von Grundanforderungen

In diesem Kapitel sollen Grundanforderungen an eine mögliche Rückholbarkeit von radioaktiven Abfällen abgeleitet werden. Hierzu wird zunächst von der Endlagerung von hochaktiven Abfällen in dem Wirtsgestein Salz ausgegangen.

In den Berichten /BOL 11/, /BOL 12/ und /BOL 14a/ wird dargelegt, dass die eingebrachten radioaktiven Abfälle nach ihrer Einbringung versetzt werden. Der Versatz wird infolge der Konvergenz des Gebirges in Laufe der Zeit kompaktiert. Nach vollständiger Kompaktion des Versatzes ist der Behälter möglichen Bewegungen des umgebenden Salzes ausgesetzt. Je nach Stärke dieser Bewegungen besteht die Möglichkeit, dass der Behälter zum Zeitpunkt der beabsichtigten Rückholung nicht mehr an seinem ursprünglichen Platz aufzufinden ist. Somit besteht die Anforderung, dass der Rück zu holende Behälter auffindbar ist. Hieraus wird die Grundanforderung für die Rückholung **‚Auffindbarkeit‘** abgeleitet.

Der zeitliche Ablauf der Kompaktion des Salzgrußes hängt von Parametern wie Temperatur, Gebirgsdruck und Salzeigenschaften ab. So ist die Kompaktion eines relativ kleinen Volumens aus Versatzmaterial bei einer Kokille in einem tiefen Bohrloch deutlich schneller als bei einem relativ großen Volumen aus Versatzmaterial bei einem Pol-lux – Behälter in einer Strecke.

Nachdem ein Behälter wiedergefunden wurde muss die Möglichkeit bestehen Zugang zum Behälter zu erhalten. In den dargestellten Wirtformationen (hier Salz) wird der Zugang zu den Behältern im Wesentlichen durch die erhöhte Temperatur des Wirtsgesteins erschwert. Somit wird als weitere Grundanforderung für die Rückholung **‚Zugänglichkeit‘** abgeleitet.

Nachdem der Behälter aufgefunden wurde und zugänglich ist besteht die Herausforderung, den Behälter (respektive Abfall) aufzunehmen. Hierzu muss der Behälter in einer handhabbaren Form vorliegen. Somit kann als weitere Grundforderung für die Rückholung **‚Handhabbarkeit‘** abgeleitet werden.

Literatur

- /BMI 83/ Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk, zuletzt geändert 20. April 1983 (GMBl. 1983 Nr. 13 220).
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. 22 S.: Bonn, 30. September 2010.
- /BOL 11/ 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., Thomauske, 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.
- /ENG 95/ Engelmann, H.-J., Biurrun, E., Hubert, R., Pohler, M.: Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB (02 E 8371), Untersuchung zur Rückholbarkeit von eingelagertem Kernmaterial in der Nachbetriebsphase eines Endlagers. Hrsg.: Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), DEAB T 57, 76 S.: Peine, Februar 1995.
- /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.
- /JOB 13/ Jobmann, M.: Monitoring Development for Safe Repository Operation and Staged Closure, Modern, EC Deliverable: D-4.1. 148 S., DOI 10.2172/1151778, 2013.
- /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, Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. 684 S., 2016.

- /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.
- /LUX 17/ Lux, K.-H., Wolters, R., Zhao, J.: Auf dem langen Weg zu einem Endlager für hochradioaktive, Wärme entwickelnde Abfälle, Teil 1. atw - Internationale Zeitschrift für Kernenergie, Bd. 62, Nr. 3, S. 185–198, 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.
- /PEI 11/ Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J.: Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke (September 2010), Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-274, 87 S., ISBN 978-3-939355-50-2, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2011.
- /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.
- /RÖH 16/ Röhlig, K.-J.: Struktur und Inhalte des Forschungsverbundes ENTRIA. In: Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen (ENTRIA) (Hrsg.): Fachtagung. Technische Aspekte von Optionen zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe, Braunschweig, 01.-02. November 2016: Braunschweig, 2016.

/SSV 11/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) in der Fassung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I 2001 Nr. 38 S. 1714; 2002 I S. 1459), zuletzt geändert durch Artikel 1 VO zur Änd. strahlenschutzrechtlicher VO vom 4. Oktober 2011 (BGBl. I 2011 S. 2000).

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	BSK 3 und Triple Pack Behälter /BOL 16/.....	8
Abb. 3.2	Seitenansicht (oben) und Schnitt (unten) der rückholbaren Kokille (BSK-R) für ausgediente Brennstäbe und Wiederaufarbeitungskokillen (aus: /BOL 14a/).....	9
Abb. 3.3	Variante B1: Einlagerungsfelder (Ost 1 bis 12) für die Streckenlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und Brennelement-Strukturteilen im Ostflügel, aus /ENG 95/.....	12
Abb. 3.4	Variante C: Bohrlochlagerung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen sowie Brennelement-Strukturteilen im Ostflügel des Salzstockes, aus /ENG 95/	12
Abb. 3.5	Variante B2: Horizontale Bohrlochlagerung von Transport und Lagerbehälter (TLB), aus /BOL 12/	13
Abb. 3.6	Variante A: Optimierte Einlagerungsfelder (West 1 bis West 3) für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung im Westflügel, aus /BOL 12/	17
Abb. 3.7	Schematische Darstellung einer modifizierten POLLUX®-Aufnahme /BOL 14a/	20
Abb. 3.8	Vorbereitung zur Rückholung (nach /BOL 16/).....	21
Abb. 3.9	Fertiggestellte Rückholungsstrecke (nach /BOL 16/)	21
Abb. 3.10	Streckenauffahrungsschema für die Rückholung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) nach /BOL 12/	23

**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