



BGE TECHNOLOGY GmbH

ERNESTA

Technische Konzepte für die Rückholung der
Einlagerungsvariante vertikale Bohrlochlagerung
in Salzformationen

BGE TEC 2018-07

ERNESTA

Technische Konzepte für die Rückholung der Einlagerungsvariante vertikale Bohrlochlagerung in Salzformationen

BGE TEC 2018-07

Autor(en)	Philipp Herold Niklas Bertrams Eric Kuate Simo Wilhelm Bollingerfehr Sabine Prignitz Wolfgang Filbert Christian Friedrich (BGE)
-----------	---

Datum	September 2018
-------	----------------

Auftraggeber	PTKA
--------------	------

Förderkennzeichen	02E11294
-------------------	----------

Dieser Bericht wurde erstellt im Rahmen des FuE-Projektes
"Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen"
(ERNESTA)

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des BMWi vertreten durch den Projektträger Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) von der BGE TECHNOLOGY GmbH durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



PTKA
Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Allgemeine Rückholungsstrategie	3
3	Einlagerungskonzept	9
4	Betriebsablauf und Technik der Rückholung	17
4.1	Aus- und Vorrichtung am Beispiel des Grubengebäudes der VSG	17
4.2	Vorbereitung der Rückholung	21
4.3	Versatzentnahme	23
4.4	Rückholungstätigkeit	30
4.5	Automatisierungspotential während der Rückholung	32
4.5.1	Teilschnittmaschinen (TSM)	33
4.5.2	Lader	33
4.5.3	Ankerbohrwagen	34
4.5.4	Andere bereifte Fahrzeuge	35
4.5.5	Hydraulikbagger	35
4.5.6	Schweißroboter	35
4.5.7	Zugbetrieb	36
4.5.8	Einlagerungsvorrichtung	36
4.5.9	Betriebsüberwachung	37
4.5.10	Schlussfolgerungen der Betrachtung des Automatisierungspotentials	37
4.6	Bewetterung und Klimavorausberechnung	39
4.6.1	Bewetterungssystem	39
4.6.2	Temperaturentwicklung im Gebirge bis zum Beginn der Rückholung	41
4.6.3	Temperaturentwicklung im Gebirge nach der Entnahme der Behälter	44
4.6.4	Modellbildung und Klimavorausberechnung	46
4.6.5	Erkenntnisse aus der Klimavorausberechnung	49
4.7	Verschluss und Umgang mit dem geräumten Endlager	51
5	Zeit- und Kostenschätzung	52
5.1	Zeitschätzung	54
5.2	Kosten	57
6	Zusammenfassung	60

Quellenverzeichnis	62
Abbildungsverzeichnis	66
Tabellenverzeichnis	68

1 Einleitung

Die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in tiefen geologischen Formationen hat zum Ziel diese Stoffe dauerhaft sicher von der Biosphäre abzutrennen und damit Mensch und Umwelt vor den schädlichen Auswirkungen der ionisierenden Strahlung sowie vor toxischen Bestandteilen zu schützen. Der langzeitsichere Einschluss soll dabei über ein Multi-Barrieren Konzept gewährleistet werden, bei dem über lange geologische Zeiträume hinweg das Gebirge die wesentliche Einschlussfunktion übernimmt. Die Langzeitsicherheit des Endlagersystems stützt sich damit auf die passive Sicherheit des Wirtsgesteins. Eine aktive Kontroll- und Überwachungsfunktion durch den Mensch ist nicht erforderlich.

Während Erkundung, Planung, Genehmigung, Errichtung, Betrieb und auch Verschluss eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen soll der Planungsgrundsatz der Reversibilität von Entscheidungen die Möglichkeit geben, auf veränderte Bedingungen oder Entwicklungen zu reagieren und getroffene Entscheidungen zu korrigieren. Während der Betriebszeit des Endlagers wird die Reversibilität von Entscheidungen durch eine Rückholbarkeit der Abfälle gewährleistet. Rückholbarkeit ist per Definition *"...die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten radioaktiven Abfallbehälter aus dem Endlagerbergwerk..."* (BMU, 2010). Die Erfüllung der Anforderung der Rückholbarkeit ist heute Genehmigungsvoraussetzung für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente. Mit der Rückholungsoption besteht die Möglichkeit die eingelagerten Behälter aus der passiven Sicherheit des Gebirges wieder zu entfernen und zurück in die (aktive) menschliche Obhut zu überführen.

Während der Konzeption und Auslegung eines Endlagers ist darauf zu achten, dass die technischen Planungen und Maßnahmen zur Vorbereitung einer möglichen Rückholung die passive Langzeitsicherheit des Endlagers nicht beeinträchtigen. Rückholbarkeit nach dem in (BMU, 2010) festgelegten Sicherheitsverständnis bedeutet somit nicht, dass ein permanenter Zugriff möglich und eine direkte Überwachung jedes einzelnen Behälter gegeben sein muss. Vielmehr steht die Funktionsfähigkeit des gesamten Endlagersystems im Vordergrund. Aus diesem Verständnis heraus favorisiert die BGE TECHNOLOGY GmbH das sogenannte "Re-Mining"-Konzept als Vorzugsvariante für eine mögliche Rückholung von Behältern aus einem Endlager. Eine Offenhaltung einzelner Grubenteile über den aus betrieblichen Zwängen resultierenden Zeitraum hinaus ist dementsprechend nicht vorgesehen. Die Behälter werden in der Betriebsphase eingelagert und die Zugänge verfüllt und verschlossen. Im Falle einer Rückholung erfolgen die erneute Auffahrung der Zugänge und die Entnahme der Behälter.

Im Rahmen des FuE-Vorhabens "Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen" (ERNESTA) werden bestehende Rückholungskonzepte weiterentwickelt. Mit dem vorliegenden Teilbericht werden die Arbeiten zur Vertiefung des technischen Konzeptes für die Rückholung der Einlagerungsvariante vertikale Bohrlochlagerung in Salzformationen zusammengefasst.

2 Rückholungsstrategie

Die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen wird innerhalb der gesellschaftlichen Debatte zum Umgang mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen immer wieder hinterfragt. Ein Bestandteil dieser Debatte ist die Frage, ob und wie eine Reversibilität von Entscheidungen in die Entsorgungsstrategie implementiert werden kann. Reversibilität wird als *"Möglichkeit der Umkehrung einer oder mehrerer Schritte in allen Phasen des Prozesses der Endlagerentwicklung: Endlagerung und -auslegung, Bau und Betrieb des Endlagers bis hin zur völligen Rückabwicklung"* (ESK 2011) definiert. Mit voranschreitender Projektphase steigt dabei der Aufwand eines Rücksprungs bzw. einer Kurskorrektur. Die Diskussion um die Reversibilität dreht sich innerhalb der breiten gesellschaftlichen Debatte im Wesentlichen um die Frage nach der Notwendigkeit einer Rückholbarkeit. Die Rückholbarkeit wird als *"die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten Abfallbehälter mit radioaktiven Abfällen während der Betriebszeit"* (StandAG, 2017) bezeichnet und stellt damit einen Teilaspekt der Reversibilität dar.

Das Für und Wider der Rückholbarkeit umfasst ein weites Spektrum an gesellschaftlichen, ethischen, ökonomischen und technischen Aspekten. Die Rückholbarkeit als zusätzliche Handlungsoption erhöht im Allgemeinen die Akzeptanz der Endlagerung. Mit der Rückholbarkeit entsteht eine Korrekturmöglichkeit für den Fall, dass zukünftig Fehler festgestellt werden oder aber ein alternativer Umgang bzw. eine alternative Nutzung der eingelagerten Abfälle und ausgedienten Brennelemente angestrebt wird. Die Rückholbarkeit verleiht dem Jahrzehnte dauernden Prozess der Endlagerung zusätzliche Flexibilität und würde auch der nachfolgenden Generation Handlungsfreiheit einräumen. Die Beurteilung zur Notwendigkeit einer Rückholung obliegt dieser zukünftigen Generation. Aus der Handlungsoption erwächst allerdings auch die Möglichkeit eines Missbrauchs. Die Sicherstellung der Kernmaterialüberwachung und somit die Vermeidung einer Proliferation wird mit der Rückholbarkeitsoption erschwert. Die Umsetzung der Rückholbarkeitsoption in der Endlagerauslegung kann auch die betriebliche Sicherheit sowie die Langzeitsicherheit des Endlagers negativ beeinflussen. Damit wäre letztlich auch das primäre Schutzziel des Endlagers beeinträchtigt und somit auch die Erbringung eines Sicherheitsnachweises zumindest erschwert. In Summe können aus der Berücksichtigung der Handlungsoption Rückholbarkeit auch ohne Rückholung erhebliche Zusatzkosten erwachsen. (IAEA, 2009)

Aus der Diskussion um die Vor- und Nachteile der Rückholbarkeit entwickelte sich in den letzten Jahren mehr und mehr der gesellschaftliche Konsens, dass eine Rückholbarkeitsoption der eingelagerten Abfallbehälter in die Endlagerauslegung mit aufgenommen werden sollte. Diese Meinung wird in der Novellierung des "Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle" (StandAG, 2017) und den "Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle" (BMU, 2010), untermauert. Die Endlagerung mit Rückholungsoption stellt die Vorzugsvariante für den Umgang mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen in Deutschland dar.

Die Sicherheitsanforderungen des BMU ersetzen die früheren Sicherheitskriterien aus dem Jahr 1983. Mit den neuen Sicherheitsanforderungen wird festgelegt, welches Sicherheitsni-

veau für ein solches Endlager nachweislich einzuhalten ist. Über die Festlegung von Auslegungsanforderungen wird in Deutschland erstmals auch die Rückholbarkeit der Behälter *"in der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen..."* (BMU, 2010) fest vorgeschrieben. Die Sicherheitsanforderungen des BMU sind für den Antragsteller bei allen wesentlichen Teilschritten zur Planung, Errichtung, Betrieb und Stilllegung eines Endlagers und für die Genehmigungsbehörden bei der Planfeststellung bindend. Die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen des BMU bildet somit eine Genehmigungsvoraussetzung. Dritte, die auf eine Genehmigungsfähigkeit hinarbeiten, müssen diese berücksichtigen (BMU, 2010).

Die Sicherheitsanforderungen des BMU sind bisher nicht im Bundesgesetzblatt veröffentlicht. In ihrem Charakter entsprechen sie einer das Atomgesetz konkretisierenden Verwaltungsvorschrift zur Feststellung der Genehmigungsfähigkeit. Daraus folgt, dass alle Maßnahmen die zur *„... Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage...“* § 7 II Nr. 3 (AtG, 2018) getroffen werden, dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen müssen. Dementsprechend müssen auch *„geplante technische Maßnahmen“* (BMU, 2010) zur Gewährleistung einer Rückholbarkeit den Stand von Wissenschaft und Technik nachweislich einhalten.

Hinter der Techniklausel "Stand von Wissenschaft und Technik" verbirgt sich ein aktueller Wissensstand entsprechend den gegenwärtigen Erkenntnissen in einem bestimmten Fachgebiet oder zu einer Fragestellung mit der Berücksichtigung der wissenschaftlich denkbaren Risiken. Der Stand von Wissenschaft und Technik beschreibt damit das höchste technisch-wissenschaftliche Niveau und geht über die den Stand der Technik hinaus. Übertragen auf die Rückholung müssen die anzuwendenden Technologien erprobt sein und mögliche, aus ihrer Anwendung erwachsende Risiken entsprechend dem aktuellen Wissensstand beurteilt werden. Im Rahmen weiterführender vertiefender Arbeiten zur Umsetzung der Rückholbarkeitsanforderung ist ein Machbarkeitsnachweis entsprechend allgemein anerkannter wissenschaftlich/technischer Methoden zu führen. Der für eine Genehmigungsfähigkeit nötige Umfang zur Darstellung der Machbarkeit liegt jedoch im Ermessen der Genehmigungsbehörde und ist zukünftig noch zu definieren.

Für die Überführung der Anforderung einer Rückholbarkeit in konkrete technische Konzepte müssen auch die weiteren Auslegungsanforderungen an das Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente berücksichtigt werden: So dürfen *"Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung oder Bergung getroffen werden, [...] die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen."* (BMU, 2010) Für die zu errichtenden Grubenbaue und Durchörterungen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gilt ein Minimierungsgebot. Des Weiteren wird festgelegt, dass die *"... Anzahl der offenen Einlagerungsbereiche [...] gering zu halten"* ist und diese zügig *"... zu beladen, anschließend zu verfüllen und sicher gegen das Grubengebäude zu verschließen"* sind (BMU, 2010).

Aus den Definitionen und ergänzenden Vorgaben wird deutlich, dass die Rückholbarkeit während der Betriebszeit nicht alleine die Einlagerungsphase umfasst. Auch der Zeitraum des Versatzes der Einlagerungsbereiche und die Verfüllung aller Strecken müssen in die

Überlegungen zur Rückholbarkeit eingezogen werden. In Abbildung 2-1 erfolgt die Zuordnung der Rückholbarkeit zu den typischen Entwicklungsstufen eines Endlagers. Mit dieser Zuordnung wird auch der Begriff der Bergung aufgegriffen. Bergung als Notfallmaßnahme und weitere Sonderform der Reversibilität umfasst die Entnahme der Behälter aus dem bereits verschlossenen Endlager und ist nach (BMU, 2010) auf 500 Jahre nach dem Verschluss begrenzt. Alle weiteren zukünftigen Entwicklungen sind von den Überlegungen zur Reversibilität ausgenommen.

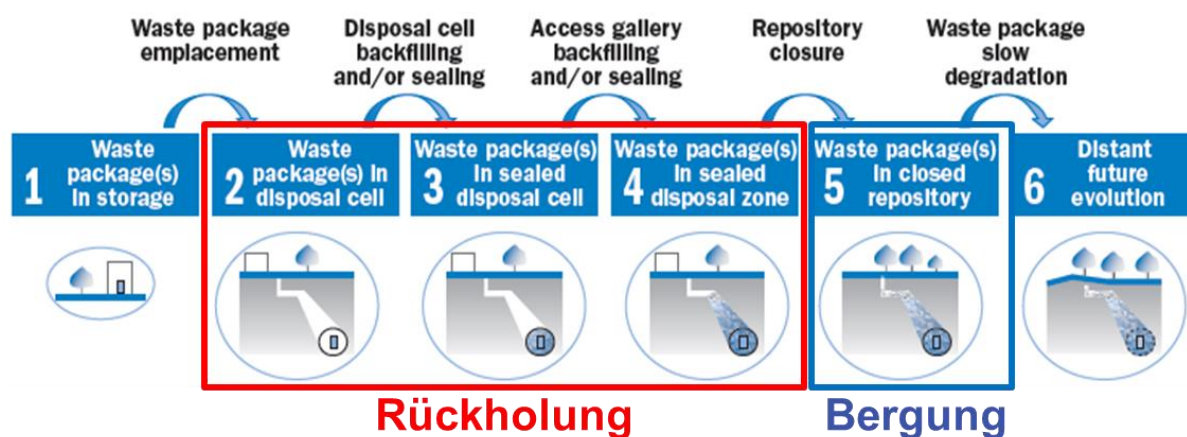


Abbildung 2-1: Einordnung der Begriffsdefinitionen Rückholbarkeit und Bergung gemäß (BMU, 2010) in typische Entwicklungsstufen eines Endlagers gemäß dem internationalen Verständnis zur Reversibilität, nach (NEA, 2011)

Die Betriebsphase eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente wird in Deutschland auf bis zu 40 Jahre abgeschätzt. In den bekannten deutschen Endlagerkonzeptionen finden die genannten Entwicklungsstufen – Einlagerung, Versatz, Verschluss – entsprechend des Einlagerungsfortschrittes parallel statt. Die Behälter werden zügig nach der Einlagerung versetzt. Die passive Sicherheit des Endlagers wird, in Übereinstimmung mit den Sicherheitsanforderungen des BMU schrittweise erhöht. Die Behälter befinden sich damit nicht mehr in der aktiven Kontrolle durch den Mensch. Eine schrittweise Umsetzung der drei Hauptprozesse ist ebenso denkbar, würde aber nicht den bereitgenannten Auslegungsanforderungen entsprechen und damit im Widerspruch zu (BMU, 2010) stehen.

Für die Gewährleistung einer Rückholbarkeit der Behälter müssen somit Strategien entwickelt werden, die alle drei Arbeitsschritte abdecken. Eine Rückholbarkeit ist nicht allein durch eine Offenhaltung der Einlagerungsbereiche gegeben. Die Rückholbarkeit der Behälter muss die Entnahme dieser aus dem Gebirgsverbund erlauben. Mit der Rückholung werden Abfallbehälter aus dem passiven Sicherheitssystem des Endlagers entnommen und zurück in die menschliche Obhut überführt.

Aus den zugrundeliegenden Anforderungen an die Rückholbarkeit kann ein als "Re-Mining"-Strategie bezeichnetes Vorgehen als geeigneter Lösungsansatz für die technische Umsetzung der Rückholung beschrieben werden. Diese Strategie erlaubt die Einlagerung der Be-

hälter, deren zeitnahen Versatz und den Verschluss der Grubenteile entsprechend des Einlagerungsfortschrittes. Für eine Erleichterung der Rückholung können konzeptionelle und technische Anpassungen am Einlagerungskonzept erfolgen. Es ist auch möglich, Anpassungen zur Gewährleistung günstiger Bedingungen im erwarteten Rückholungszeitraum vorzunehmen. Wird während der laufenden Betriebszeit die Entscheidung zur Rückholung getroffen, erfolgt die Wiederauffahrung der bereits verfüllten Grubenteile und damit die Schaffung eines neuen Zugangs zu den Endlagerbehältern. Diese werden in geeigneter Weise freigelegt und mit entsprechender Technik aufgenommen. Der Transport in den Strecken und nach über Tage kann mit bestehenden Transport- und Fördersystemen erfolgen. Die Rückholungstätigkeit als *"der aktive Vorgang der Entnahme von Abfallbehältern aus dem Endlager"* (NEA, 2011) endet somit nach dem Transport nach über Tage.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist nicht bekannt, aus welchen Gründen eine Entscheidung zur Rückholung getroffen wird. Damit sind auch die genauen Randbedingungen zum Rückholungszeitpunkt ungewiss. Für die Erarbeitung geeigneter Rückholungskonzepte müssen daher verschiedene Annahmen getroffen werden. Für die nachfolgenden Untersuchungen wird stets angenommen, dass eine Rückholung zum spätestmöglichen Zeitpunkt erfolgt. Das bedeutet, alle Behälter sind bereits planmäßig eingelagert und die sie umgebenden Hohlräume versetzt. Die Hauptstrecken sind ebenso verfüllt und mit Streckenverschlüssen versehen. Zum spätestmöglichen Rückholungsbeginn stehen nur noch wenige Grubenbaue des Infrastrukturbereiches und die Schächte zur Verfügung. Diese Annahme deckt eine Vielzahl möglicher Rückholungsszenarien ab. Eine selektive Rückholung wird nicht betrachtet. Im Zuge der Rückholung werden alle bereits eingelagerten Behälter aus dem Endlager entnommen. Die Entwicklung von Rückholungskonzepten beschränkt sich zunächst nur auf die untertägigen Arbeiten. Diese werden mit dem Transport der zurückgeholten Behälter an die Tagesoberfläche abgeschlossen.

Es wird weiterhin angenommen, dass alle Einbauten aus den Strecken vor deren Versatz geraubt werden. Eine Entscheidung, ob Strecken(teile) aus dem jeweiligen Strahlenschutz-bereich (Kontroll- (KB) oder Überwachungsbereich (ÜB)) entlassen werden, wird erst in der Betriebsphase getroffen. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt erfolgt dazu keine Vorfestlegung.

Die Anforderung, Durchörterungen des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches zu minimieren (BMU, 2010) zielt auf den Schutz des ewG und die langfristige Erhaltung der Barrierefunktion des Wirtsgesteins ab. Mit der Entnahme aller Behälter aus dem Endlager ist die Einhaltung dieses Minimierungsgebotes zum Schutz des ewG nicht mehr notwendig. Gleichwohl werden die Sicherheitsabstände wie etwa zu den Salzflanken oder um Schächte herum entsprechend der geltenden bergbehördlichen Vorgaben eingehalten.

Für die Dauer der Rückholung kann in erster Näherung ein ähnlicher zeitlicher Aufwand wie für die Einlagerung beschrieben werden. Dies kann bei einer Rückholung aller eingelagerten Behälter zu einer Verdopplung der Betriebszeit führen. Dementsprechend ist eine geeignete Infrastruktur sowohl über als auch unter Tage vorzuhalten. Der weitere Umgang mit den Behältern und den enthaltenen wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen sowie ausgedienten Brennelementen ist stark von den Beweggründen, die zur Rückholung führen, abhängig. Für die Handhabung der rückgeholten Abfallbehälter werden ausreichende Zwischenlagerkapazitäten

zitäten und geeignete kerntechnische Anlagen zur Konditionierung der rückgeholten Abfälle und ausgedienten Brennelemente erforderlich werden. Weiterhin werden geeignete und in ausreichender Anzahl vorzuhaltende Behälter für die Zwischenlagerung und/oder den Transport und auch entsprechende Transportkapazitäten benötigt.

Einlagerungskonzept

Das Einlagerungskonzept für Brennstabkokillen in tiefe vertikale Bohrlöcher sowie die entsprechende Endlagerauslegung im Rahmen der "Vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG)" ist in (GRS, 2011a) und (GRS, 2012a) ausführlich beschrieben. Einlagerungskonzept und Endlagerauslegung dienten bereits in (DBE TEC, 2014) als Referenzkonzept für die Erarbeitung eines ersten Rückholungskonzeptes. Der folgende Abschnitt fasst das Einlagerungskonzept aus (GRS, 2011a) und (GRS, 2012a) kurz zusammen. In den anschließenden Abschnitten wird die vertiefende Planung zum Rückholungskonzept für die vertikale Bohrlochlagerung im Steinsalz beschrieben.

Die Bohrlochlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in tiefen vertikalen Bohrlöchern ist ein alternatives Einlagerungskonzept zur Streckenlagerung von POLLUX[®]-Behältern. Das ursprüngliche Einlagerungskonzept berücksichtigte die Handhabung drei unterschiedlicher Behältertypen. Diese waren Brennstabkokillen (BSK) für die Brennstäbe ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren und ausgediente Brennelemente/Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren, Triple-Packs für die Aufnahme von Kokillen mit Wiederaufarbeitungsabfällen und modifizierte BSK zur Aufnahme der AVR- und THTR-Brennelemente. Durch die Einbindung der Rückholbarkeit innerhalb der Planungen der VSG wurde das Behälterkonzept variiert. Im Zuge des angepassten Behälterkonzeptes wurde die Möglichkeit berücksichtigt, alle radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente in einem einheitlichen Behälter einzulagern. Die äußere Form der Behälter für radioaktive Abfällen, ausgedienten Brennelementen aus Leistungsreaktoren und ausgedienten Brennelementen aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie Forschungsreaktoren bleibt damit immer gleich. Dieses Konzept bedingt eine Umverpackung der AVR- und THTR-Brennelemente in Kokillen.

Die BSK sind nicht selbstabschirmend und müssen daher während des Transports nach Untertage bis zum Einlagerungsort in einem speziellen Transferbehälter transportiert werden (siehe Abbildung 2-3). Der untertägige Transport erfolgt gleisgebunden.

Im Rahmen der VSG (GRS, 2012a) wurde das Design der BSK an die veränderten Auslegungsanforderungen angepasst. Zur Erleichterung der Rückholbarkeit aus einem verfüllten Bohrloch kann die BSK mit einer konischen Außenform versehen werden, siehe Abbildung 2-2. Die veränderte Kokillenform wurde in der VSG als BSK-R benannt. Im Rahmen dieses Vorhabens wird auf die Unterscheidung zwischen zylindrischer Kokille (BSK) und konischer Kokille (BSK-R) verzichtet. Die Kokillen werden immer als BSK bezeichnet.

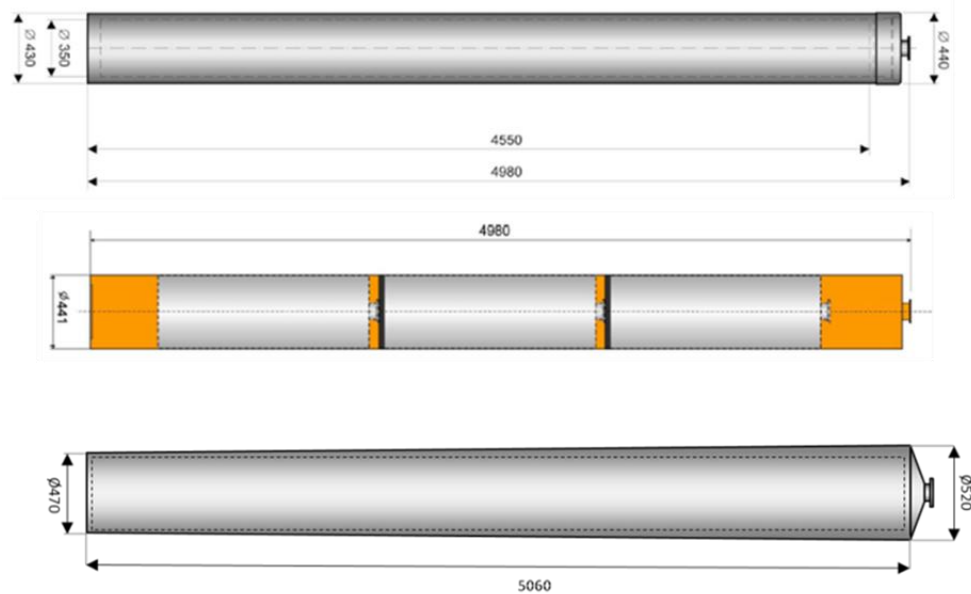


Abbildung 2-2: BSK nach (GRS, 2012a)

Die Bohrlochüberfahrungsstrecken haben eine Sohlenbreite von 6,0 m und eine Höhe von rund 5,7 m. Die Dimensionierung des Streckenquerschnittes wird unter Einhaltung notwendiger Sicherheitsabstände zu den Stößen von den Abmessungen der Einlagerungsvorrichtung (kurz ELV) beim gleisgebundenen Transport auf einem Plateauwagen bestimmt. Die in den Bohrlochüberfahrungsstrecken verlaufenden Gleisanlagen sind in entsprechende Schienenkanäle eingelassen, siehe Abbildung 2-4.



Abbildung 2-3: Mit dem Transferbehälter beladener Plateauwagen (GRS, 2011a)

Die Geometrie der Einlagerungsorte ist an die Anforderungen der Bohr- und Einlagerungstechnik angepasst (Abbildung 2-4). So ist bereits während der Bohrarbeiten ein vergrößerter Abstand zwischen Sohle und Firste nötig, um mit Standardbohrgestängen von 3 m Länge zu

arbeiten und Sicherungs- und Führungseinrichtungen, wie etwa einen Preventer, installieren zu können. An der Firste erfolgt ein Nachschnitt auf 6,42 m. An der Sohle wird ein Bohrlochkeller mit 2,2 m Breite, 7 m Länge und 2,85 m Tiefe errichtet. Für die Einlagerung der Kokillen wird ein 300 m tiefes Bohrloch geteuft. Um dem Plateauwagen das Überfahren der Bohrlochkeller und das Einfahren unter die ELV zu ermöglichen, ist der obere Bereich des Bohrlochkellers mit Trägern und Schienen versehen.

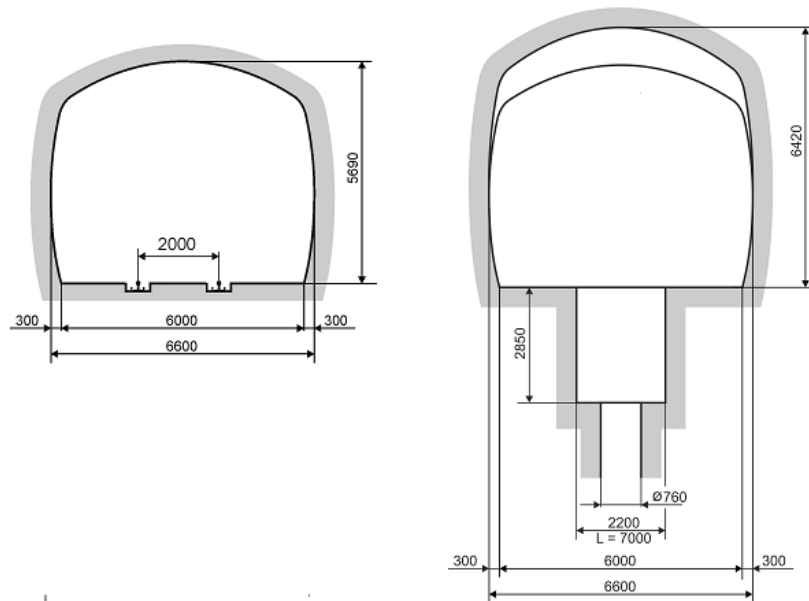


Abbildung 2-4: Links: Profil der Beschickungsstrecke, rechts: Profil des Einlagerungsortes, Angaben in mm (DBE TEC, 2014)

Die Auslegung des Grubengebäudes in (GRS, 2012a) umfasst einen zentralen Infrastrukturbereich mit zwei Tageszugängen und insgesamt drei Einlagerungsfelder, östlich dieser Doppelschachtanlage. Die Einlagerungsfelder werden über zwei Richtstrecken erschlossen. Zwischen den Richtstrecken erschließen die Bohrlochüberfahrungsstrecken querschlägig die Einlagerungsorte.

Die im Grubengebäude einzulagernden Behältermengen ergeben sich auf Basis des Abfallmengengerüsts. Die Behältermengen wurden gemäß dem Abfallmengengerüst der VSG (GRS, 2011b) berechnet:

- 4.660 BSK mit Brennstäben aus DWR-BE
- 1.734 BSK mit Brennstäben aus SWR-BE
- 674 BSK mit Brennstäben aus WWER-BE
- 1.245 BSK mit CSD-V
- 1.474 BSK mit CSD-C/-B
- 874 BSK mit Brennelement-Strukturteilen
- 518 BSK mit Brennelementen aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie Forschungsreaktoren

Für die Abfälle der Wiederaufarbeitung hat sich das Abfallmengengerüst im Vergleich zur VSG geändert (BMU, 2015). Für die CSD-V und CSD-B/-C sind nach (BMU, 2015) folgende Behältermengen zu berücksichtigen:

- 1.244 BSK mit CSD-V
- 1.415 BSK mit CSD-C/-B

Nach (GRS, 2012a) sind für die Unterbringung aller Endlagerbehälter in Summe 221 Bohrlöcher verteilt in 19 Bohrlochüberfahrungsstrecken erforderlich (siehe Abbildung 2-5). Die Einlagerung erfolgt im Rückbau, beginnend in den schachtfernen Überfahrungsstrecken. Durch die dreidimensionale Nutzung des Salzstockes verringert sich der Flächenbedarf des gesamten Endlagers gegenüber der Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern von ca. 2,1 km² auf ca. 1,1 km².

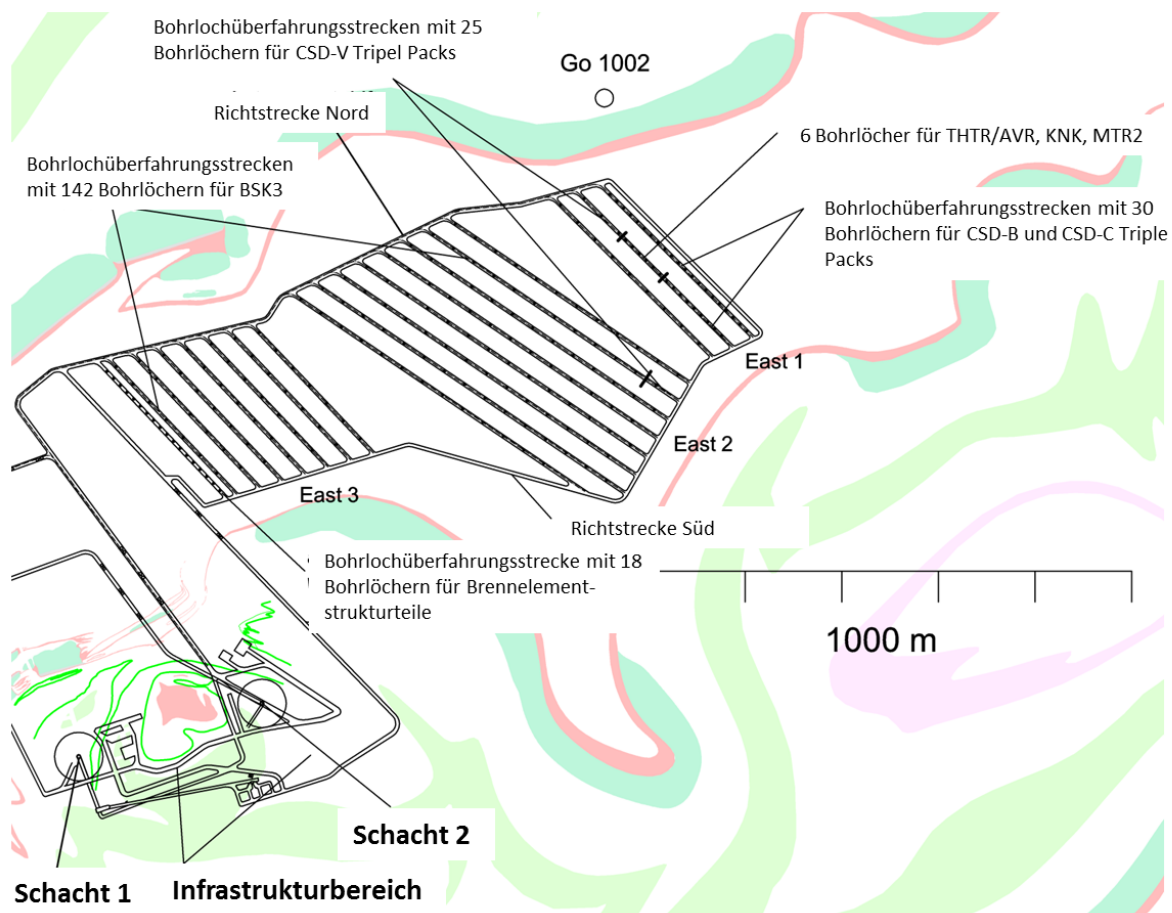


Abbildung 2-5: Grubengebäude und Einlagerungsfelder für die Bohrlochlagerung gemäß (GRS, 2012a)

Die längsten Bohrlochüberfahrungsstrecken sind ca. 700 m lang. Der Streckenquerschnitt bietet während der Auffahrung ausreichend Raum um einen Fluchtcontainer aufzustellen.

Die Bewetterung erfolgt einsöhlig. Über die Richtstrecke Süd ziehen die frischen Wetter in die jeweilige Überfahrungsstrecke und verlassen das Grubengebäude wieder über die

Richtstrecke Nord und den Schacht 2 (Transportschacht für Abfallbehälter). Für das zu erwartende Grubenklima gelten im Wesentlichen dieselben Rahmenbedingungen wie für die Streckenlagerung. Die Übergänge zwischen den Strahlenschutzbereichen liegen entsprechend dem Einlagerungsfortschritt in den Bohrlochüberfahrungsstrecken.

Die ELV für Brennstabkokillen und Triple-Packs wurde im Rahmen des FuE-Vorhabens „Optimization of the Direct Disposal Concept by Emplacing SF Canisters in Boreholes“ (DBE TEC, 2010) konzipiert, in Anlehnung an die Bestimmungen der KTA 3902 und 3903 hergestellt und in Demonstrationsversuchen auf ihre Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit hin erfolgreich getestet. Sie ist mit allen Handhabungseinrichtungen zur Übernahme des Transferbehälters vom Plateauwagen und zum Einlagern der Brennstabkokillen und Triple-Packs in das Bohrloch ausgerüstet. Abbildung 2-6 zeigt die ELV in der übertägigen Demonstrationsversuchsanlage. Die Energieversorgung erfolgt über die vor Ort installierte Stromversorgung. Die ELV setzt sich aus folgenden Baugruppen zusammen:

- Hubportal
- Seilwinde am Heck, mit Trommel, Antrieb und Rahmen
- Schwenkvorrichtung mit Klapprahmen
- Abschirmhaube
- Behältergreifer
- Versorgungs-, Steuerungs- und Kontrollsysteme
- Steuerstand

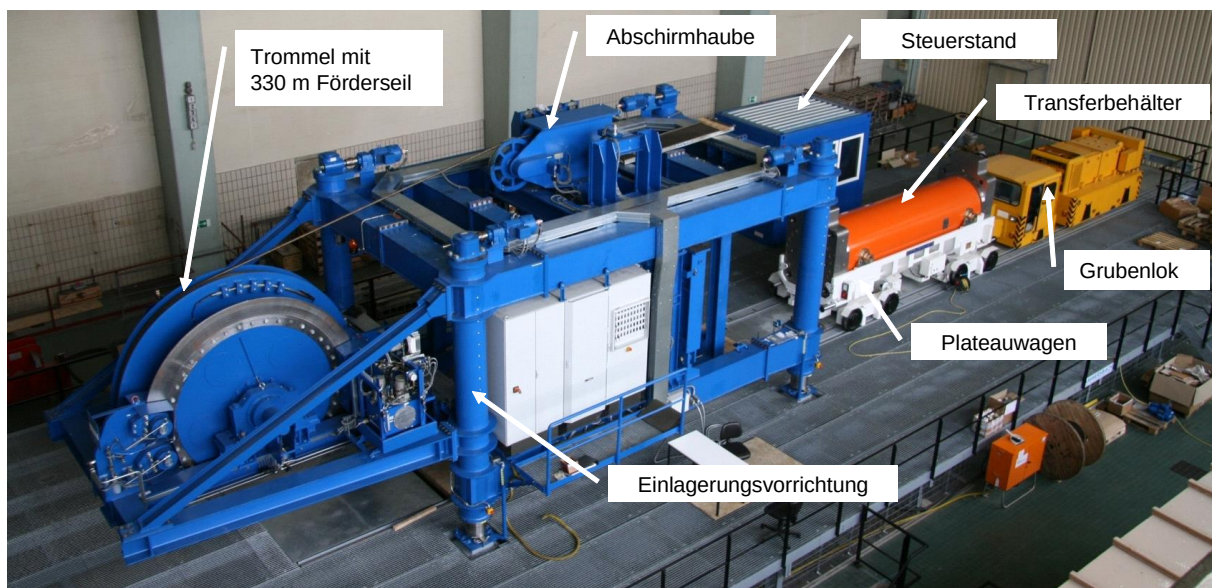


Abbildung 2-6: Einlagerungsvorrichtung (ELV) für Brennstabkokillen und Triple-Packs in der Demonstrationsanlage zur Erprobung der Einlagerungstechnik (GRS, 2011a)

Während der Einlagerungsphase ist das Bohrloch durch eine Bohrlochschleuse verschlossen. Für die Einlagerung der Kokillen wird zunächst der beladene Transferbehälter unter die ELV gefahren. Die ELV übernimmt den Transferbehälter und hebt diesen vom Plateauwa-

gen. Nach dem Ausfahren des Plateauwagens beginnt das Schwenken des Transferbehälters. Abschließend dockt dieser an die Bohrlochschleuse an (siehe Abbildung 2-7).



Abbildung 2-7: Einstellen des Transferbehälters auf die Bohrlochschleuse (GRS, 2011a)

Nach dem Andocken auf der Bohrlochschleuse setzt eine Abschirmhaube auf den Transferbehälter auf. Ist eine gesicherte Verbindung zwischen beiden hergestellt, kann die obere Schleuse des Transferbehälters geöffnet werden. Der in der Abschirmhaube integrierte Greifer kann die Kokille im Inneren des Behälters fassen und zunächst leicht anheben. Danach wird die Bohrlochschleuse parallel mit der unteren Schleuse des Transferbehälters geöffnet, und die Kokille kann in das Bohrloch abgelassen werden.

Im Rahmen der thermischen Auslegung des Grubengebäudes wurden die Beeinflussung benachbarter Behälter und Bohrlöcher, die spezifischen Wärmeleistungen der Abfallbehälter, die Zwischenlagerzeit und der Einlagerungszeitpunkt berücksichtigt. Daraus entstehen Aussagen zur erwartenden Temperaturverteilung im Einlagerungsbereich. Gebirgstemperaturen bis knapp unterhalb der Auslegungsgrenze von 200°C treten im Zentrum des Einlagerungsbereiches auf. Hier findet die größte Überlagerung der Wärmeeinträge statt. Zu den Grenzen der Einlagerungsfelder hin sinken die zu erwartenden Maximaltemperaturen. Da sich die Endlagerbehälter im Bereich unter der Überfahrungssohle befinden, treten in den Hauptstrecken moderate Temperaturen auf (siehe Abbildung 2-8). Entsprechend den Wärmeleitfähigkeiten der beteiligten Materialien treten die Maxima der Temperatur an diesen Standorten erst mehrere hundert Jahre nach der Einlagerung auf.

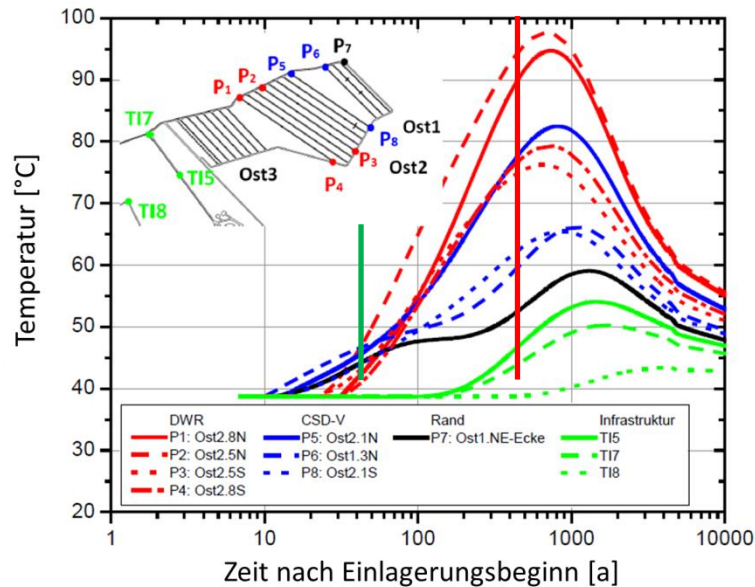


Abbildung 2-8: Zeitlicher Verlauf der Temperatur entlang der Umfahrung und im Infrastrukturbereich (GRS, 2012a)

Das Bohrlochinnere ist stets vom restlichen Grubengebäude getrennt. Nach der Befüllung eines Bohrlochs wird die Bohrlochschleuse zurückgebaut und die Verrohrung mit einem Stahldeckel verschlossen. Der Bohrlochkeller wird verfüllt. Nach Abschluss der Einlagerungstätigkeit in einer Bohrlochüberfahrungsstrecke, wird diese vollständig mit trockenem Salzgrus versetzt. Die Richtstrecken werden mit angefeuchtetem Salzgrus versetzt. In beiden Richtstrecken werden außerdem Streckenverschlüsse errichtet. Der Infrastrukturbereich wird mit Schotter verfüllt. Die Schächte sollen nach dem in (GRS, 2012b) beschriebenem Konzept verschlossen werden.

In der VSG (GRS, 2012a) wird durch Anpassungen des Einlagerungskonzeptes eine Rückholbarkeit der Behälter gemäß den Sicherheitsanforderungen BMU (BMU, 2010) gewährleistet. Alle Bohrlöcher werden vor der Einlagerung mit einer Verrohrung ausgestattet. Die Verrohrung muss dem erwarteten Gebirgsdruck standhalten. Die Kokillen werden weiterhin wechselweise eingelagert und versetzt. Statt eines arteigenen Materials soll ein möglichst nicht kompaktierender, gering kohäsiver Versatz eingebaut werden. Dies kann beispielsweise Quarzsand sein. Der Sand kann auch nach einer unbestimmten Einlagerungsdauer vergleichsweise einfach aus dem Bohrloch entfernt werden. Die Rückholung selbst entspricht im Wesentlichen einer Umkehrung der Einlagerung. Zur Erleichterung des Zugvorganges kann die Kokille mit einer konischen Außenform versehen werden.

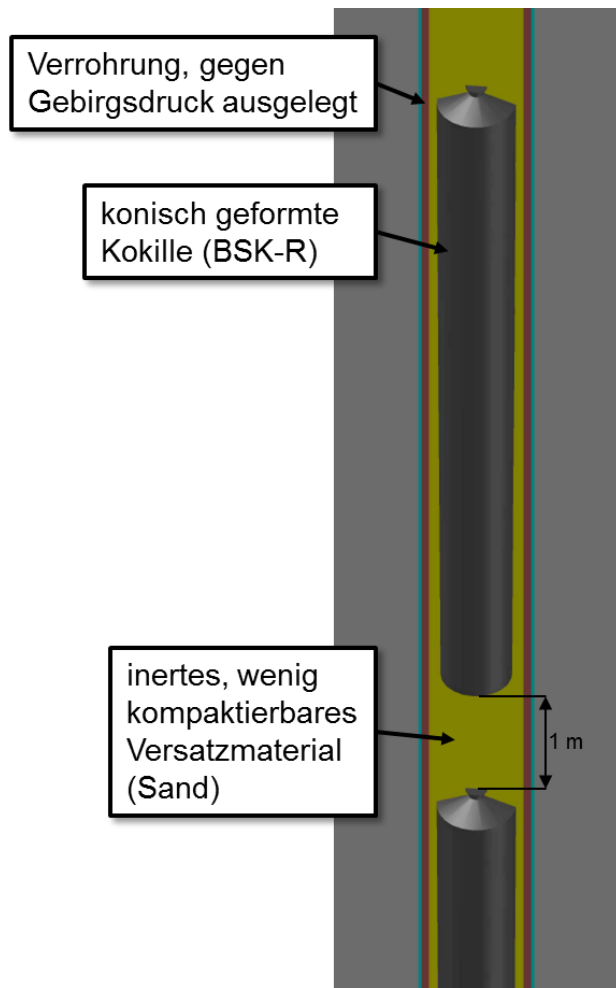


Abbildung 2-9: Schematische Darstellung des verrohrten und beladenen Bohrloches nach (GRS, 2012a)

Die Bohrlochsleuse wird nach der Einlagerung und dem vollständigen Versatz des Kopfbereiches von der Verrohrung entfernt. Der Kopfbereich der Verrohrung wird verschlossen. Im Anschluss an die Einlagerung wird der Bohrlochkeller verfüllt. Damit kann das Bohrloch in der verbleibenden Betriebszeit der Bohrlochüberfahrungsstrecke überfahren werden.

3 Betriebsablauf und Technik der Rückholung

3.1 Aus- und Vorrichtung am Beispiel des Grubengebäudes der VSG

Nach den Sicherheitsanforderungen des BMU sind "...Auffahrungen [...] gebirgsschonend auszuführen..." (BMU, 2010) und eine "...Durchörterung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [...] zu minimieren." (BMU, 2010) Für die Auffahrung aller Grubenbaue ist ein maschineller Vortrieb mit Teilschnittmaschinen (TSM) vorgesehen. Die Minimierung der Durchörterungen zielt auf den Schutz der geologischen Barriere und des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (ewG) ab. Mit dem Ziel, alle Endlagerbehälter mit radioaktivem, wärmeentwickelndem Abfall und ausgedienten Brennelementen zurückzuholen ist der Schutz der geologischen Barriere nicht mehr zwingend notwendig. Das Grubengebäude kann an die Erfordernisse des Rückholungsbetriebes angepasst werden. Konkret bedeutet dies die Einführung einer zusätzlichen Richtstrecke.

Die Auffahrung der Richtstrecken erfolgt zu beiden Seiten der Einlagerungsfelder. Die nördliche Richtstrecke wird mit einem Querschnitt von ca. 50 m² aufgefahren. Im südlichen Grubenbereich werden zur Optimierung der Bewetterung und der folgenden Betriebsabläufe zwei parallele Richtstrecken geschaffen. Die südlichen Richtstrecken sind je 1.400 m lang und in regelmäßigen Abständen querschlägig verbunden. Der Querschnitt beider Strecken beträgt je 23 m². Die Doppelstrecke mündet in eine Umfahungsstrecke, am schachtfernsten Punkt des Grubengebäudes. Alle Auffahrungen können mit einer schweren TSM erfolgen. Für die Auffahrungen der nördlichen und südlichen Hauptstrecken wird je ein Betriebspunkt vorgesehen. Während der Auffahrung der Hauptstrecken kann von Norden aus bereits eine erste Bohrlochüberfahrungsstrecke zur Verbesserung der Fluchtwegsituation aufgefahren werden.

Der Abtransport des Haufwerks erfolgt an beiden Betriebspunkten über eine Bandanlage. Die TSM kann direkt auf diese aufgeben oder Fahrlader fördern das Haufwerk an eine entsprechende Aufgabestelle. Das Haufwerk wird zu Bunkern unter Tage und Halden über Tage gebracht und kann nach erfolgter Rückholung teilweise als Verfüllmaterial genutzt werden. Das restliche Haufwerk muss entsorgt werden.

Unabhängig von der weiteren Nutzung muss das Haufwerk, das aus dem ehemaligen Kontrollbereich (KB) des Endlagers zu Bunkern im Überwachungsbereich (ÜB) bzw. zu Halden über Tage gebracht wird, gemäß § 44 StrlSchV (StrlSchV, 2017) auf Kontamination hin überprüft werden. Soll das Haufwerk als nicht radioaktiver Stoff verwendet werden, so ist es gemäß § 29 StrlSchV (StrlSchV, 2017) mittels einer Freimessanlage freizumessen. Die Freimessung des Haufwerkes kann sowohl unter Tage als auch über Tage stattfinden, je nachdem, wo die dafür vorgesehene Freimesseinrichtung aufgestellt wird. Bis zur Freimessung muss der gesamte Transportweg des Abraums Teil des Kontrollbereichs sein.

Nach der Auffahrung der Hauptstrecken werden alle Bohrlochüberfahrungsstrecken aufgefahren. Ziel ist es alle Bohrlochüberfahrungsstrecken möglich frühzeitig zu errichten. Dadurch sollen möglichst günstige Temperaturbedingungen in den Vortrieben und anschließend möglichst lange Kühlzeiten erreicht werden. Die Auffahrungs- und Rückholungsreihen-

folge kann an die erwarteten klimatischen Bedingungen angepasst werden. Die Auffahrung der Bohrlochüberfahrungsstrecken erfolgt zunächst in einem einheitlichen Querschnitt von ca. 35 m². Die Aufweitungen über den Bohrlöchern findet erst später, entsprechend des Rückholungsfortschrittes und vorrauseilend zur eigentlichen Rückholung statt. Abbildung 3-2 zeigt das vollständige Grubengebäude zur Rückholung aller Abfälle unter Berücksichtigung der Endlagerauslegung nach (GRS, 2012a).

Die Grubenräume des Endlagers werden gemäß § 36 StrlSchV (StrlSchV, 2017) in Überwachungs-, Kontroll- und Sperrbereich (Bohrloch) unterteilt, vgl. dazu Abbildung 3-1. Auffahrungen sollen soweit möglich im ÜB stattfinden, können bei Bedarf aber auch dem KB zugeordnet werden.

Die Bohrlochüberfahrungsstrecken sind während des Einlagerungsbetriebes dem KB zugeordnet. Nach Abschluss der Einlagerungstätigkeit in einer Bohrlochüberfahrungsstrecke wird diese versetzt. Die Strecke als Teil des KB wird somit verschlossen, ein Zugang ist nicht mehr möglich. Eine Entlassung aus dem Strahlenschutzbereich inkl. Freimessung ist nicht notwendig. Die Neuauffahrung der Hauptstrecken folgt teilweise dem alten Streckenverlauf der nördlichen und südlichen Richtstrecke. Die Neuauffahrung der Bohrlochüberfahrungsstrecken erfolgt entlang der alten Streckenachse aus dem Einlagerungsbetrieb. Im Zuge dieser Auffahrungen werden Grubenteile wieder geöffnet, die während des Einlagerungsbetriebes dem KB zugeordnet waren. In diesem Fall sind die Neuauffahrungen und alle (wetter-technisch) nachgeschalteten Strecken dem KB zuzuordnen, vgl. Abbildung 3-1.

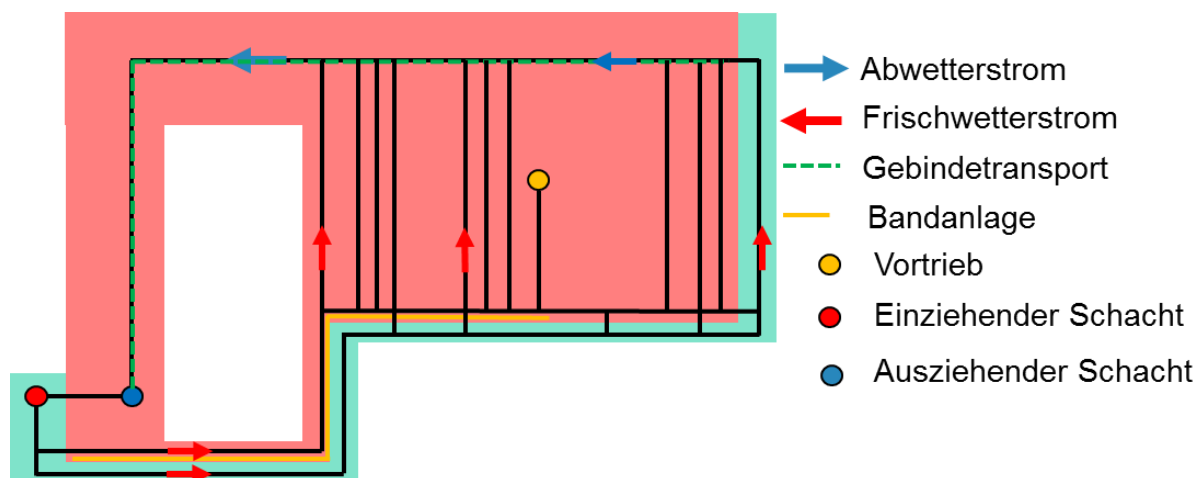


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der Auffahrung der Haupt- und Rückholungsstrecken mit möglichen Betriebspunkten (gelbe Punkte), sowie Kontroll- (roter Bereich) und Überwachungsbereich (grün)

Auffahrungstätigkeiten im KB sind während der Rückholungstätigkeit unumgänglich. Zur Erleichterung der Rückholungsarbeiten besteht theoretisch die Möglichkeit, die Bohrlochüberfahrungsstrecken oder die Hauptstrecken bei der Einlagerung vor dem Versatz aus dem KB zu entlassen. Dafür müssten eine potenzielle Kontaminationen oder Freisetzungen entlang der geplanten Strecken während der Rückholung ausgeschlossen werden können. Dieser Nachweis ist mit einem erheblichen zeitlichen und technischen Aufwand verbunden, würde

aber eine spätere Rückholung erleichtern. Zum heutigen Zeitpunkt und auch während eines zukünftigen Einlagerungsbetriebes ist nicht bekannt, ob eine Rückholung überhaupt umgesetzt wird bzw. warum eine Entscheidung zur Rückholung getroffen werden würde. Der Nutzen des Entlassens von Grubenteilen aus dem KB als vorsorglich getroffene Maßnahmen zur potenziellen Erleichterung der Rückholung ist im Vergleich zum notwendigen Aufwand daher äußerst fraglich.

Ein regulärer Übergang zwischen Kontroll- und Überwachungsbereich ist untertage nur im Infrastrukturbereich vorgesehen. Gemäß den Anforderungen aus § 44 StrlSchV (StrlSchV, 2017) sind alle Personen und beweglichen Gegenstände, die den Kontrollbereich verlassen, auf Kontamination zu prüfen. Bei den Gegenständen ist darüber hinaus noch zu überprüfen, ob sie aktiviert wurden. Wird an Personen eine Kontamination festgestellt, so sind direkt Maßnahmen zu treffen, um eine Strahlenexposition und eine Weiterverbreitung radioaktiver Stoffe zu verhindern. Gegenstände dürfen nur dann den Kontrollbereich verlassen, wenn ihre Aktivierung bzw. Kontamination die Werte für die uneingeschränkte Freigabe bzw. die Oberflächenkontamination aus Anhang III Tabelle 1 der StrlSchV (StrlSchV, 2017) unterschreiten. Für den Übergang vom Kontroll- in den Überwachungsbereich werden im Infrastrukturbereich Schleusen mit Monitoren aufgebaut, die Personal und Sachgüter auf Kontamination bzw. Aktivierung hin überprüfen. Für eine etwaige Dekontamination von Personen bzw. Sachgütern sind im Kontrollbereich Einrichtungen vorgesehen.

Darüber hinaus gibt es im Grubengebäude weitere Stellen, in denen Überwachungs- und Kontrollbereich ineinander übergehen. Diese Stellen sind jeweils der Übergang zwischen der einlagerungsnahen Strecke der beiden südlichen Doppelstrecken und den Rückholungsstrecken. Anders als im Einlagerungsbetrieb wandern die Übergänge nicht mit fortschreitender Rückholung. Während der Rückholungstätigkeit in einer Strecke bleibt die Abgrenzung der Strahlenschutzbereiche fest an einer Stelle. In den Schnittstellen zwischen Rückholungsstrecke und südlicher Richtstrecke ist kein regulärer Material- und Personenübergang vom Kontrollbereich in den Überwachungsbereich und umgekehrt vorgesehen. Um die Anforderungen an den § 44 StrlSchV (StrlSchV, 2017) bezüglich der Kontaminationsüberprüfung beim Verlassen des Kontrollbereiches erfüllen zu können, werden in diesen Übergänge wetterdurchlässige Absperrungen und Tore eingebaut. Weder für Mensch noch für Sachgüter ist im Normalfall ein Verlassen bzw. Betreten des Kontrollbereichs möglich. Damit dieser Bereich im Brand- und anderen Notfall als Fluchtweg genutzt werden kann, werden die Tore mit alarmgesicherten Fluchttüren ausgestattet. Diese Fluchttüren können neben der Alarmsicherung auch noch mittels Kamera überwacht werden, so dass ein unerkanntes Verlassen des Kontrollbereiches ausgeschlossen werden kann.

Für den Rückholungsbetrieb muss innerhalb der nördlichen Hauptstrecke und in den Bohrlochüberfahrungsstrecken eine neue Gleisanlage errichtet werden. Die Gleise dienen dem Transport der zurückgeholten Behälter mit der bereits existierenden Technik aus der Einlagerung, d.h. die Einlagerungsvorrichtung (ELV) wird für die Rückholung ebenfalls wiederverwendet. Der Transport der ELV zwischen den Bohrlochüberfahrungsstrecken und zwischen den Bohrlöchern erfolgt ebenfalls gleisgebunden.

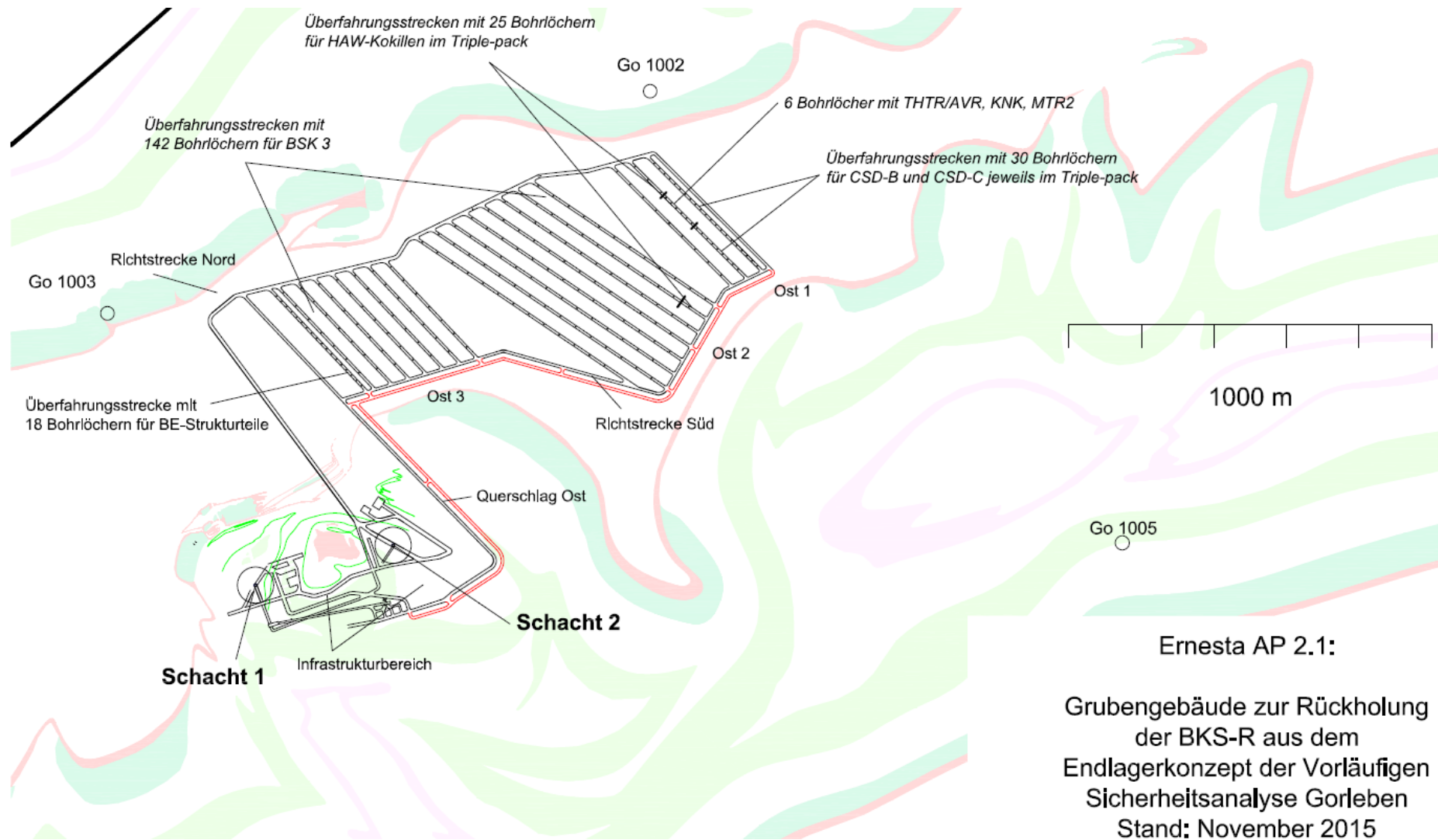


Abbildung 3-2: Grubengebäude während des möglichen Rückholungsbetriebes

3.2 Vorbereitung der Rückholung

Dem eigentlichen Rückholungsvorgang, der aktiven Entnahme der Behälter, sind verschiedene vorbereitende Tätigkeiten vorgeschaltet. Nach der Auffahrung der Rückholungsstrecke müssen für jedes Bohrloch folgende Teilschritte umgesetzt werden:

1. Nachschnitt der Firste
2. Erkundung der exakten Lage der Verrohrung und Kontaminationsprüfung
3. Errichtung des Bohrlochkellers
4. Setzen der Bohrlochschele

Der Nachschnitt des Firstbereiches dient der Aufweitung des Querschnittes am Bohrloch. Diese Arbeiten können vorausseilend zur Rückholung stattfinden. Während der Rückholung der Behälter aus einem Bohrloch ist kein weiterer Nachschnitt möglich. Die Konvergenz des Gebirges ist beim Nachschnitt zu berücksichtigen.

Der Bohrlochkeller wurde nach der Einlagerung mit Salzbeton verfüllt. Der verfüllte Bohrlochkeller ist damit bereits während der Auffahrung leicht vom gewachsenen Gebirge bzw. der versetzten Strecke zu unterscheiden.

Die Bestimmung der exakten Lage der Verrohrung kann durch zerstörungsfreie geophysikalische Messverfahren aus der Rückholstrecke erfolgen. Die Bestimmung der Tiefenlage unter Sohlenniveau kann mit Radarmessungen in einem Radarprofil erfolgen. Ist die horizontale Lage der Abdeckplatten nicht bekannt, sind zwei bis drei Radarprofile zur Bestimmung der 3-dimensionalen Lage notwendig. Ein entsprechender Test vor Beginn der eigentlichen Messungen kann über die Notwendigkeit von zwei oder drei Radarprofilen Aufschluss geben.

Bei Installation einer mehrkanaligen Radarantenne an einem Fahrzeug kann die gesamte Messkampagne, also die Lagebestimmung aller Verrohrungen einer Bohrlochüberfahrungsstrecke, in einer Streckendurchfahrt abgeschlossen werden. Derartige Messungen werden z.B. auf Autobahnen zur Untersuchung der Fahrbahndecke bei Fahrgeschwindigkeiten bis 80 km/h durchgeführt und erlauben Schichtaufbau und Inhomogenitäten im Untergrund zu detektieren, siehe Abbildung 3-3. Die Genauigkeit der Lagebestimmung liegt bei der Nutzung einer hochfrequenten Antenne im Bereich kleiner 0,1 m.

Der Salzbeton des Bohrlochkellers und der Metaldeckel der Verrohrung werden gemäß § 44 StrlSchV (StrlSchV, 2017) auf eine Kontamination hin überprüft. Dies ist der erste Schritt, um festzustellen, ob es innerhalb des Bohrloches Defekte an den Brennstabkaskillen gibt und ob ggf. radioaktive Nuklide aus ihnen freigesetzt wurden. Im Anschluss an alle Erkundungsarbeiten erfolgt die Herrichtung des neuen Bohrlochkellers. Die erforderlichen Abmessungen entsprechen dem Bohrlochkeller während der Einlagerung. Die Erstellung des Bohrlochkellers kann mit der gleichen Technik wie bei der Einlagerung erfolgen.

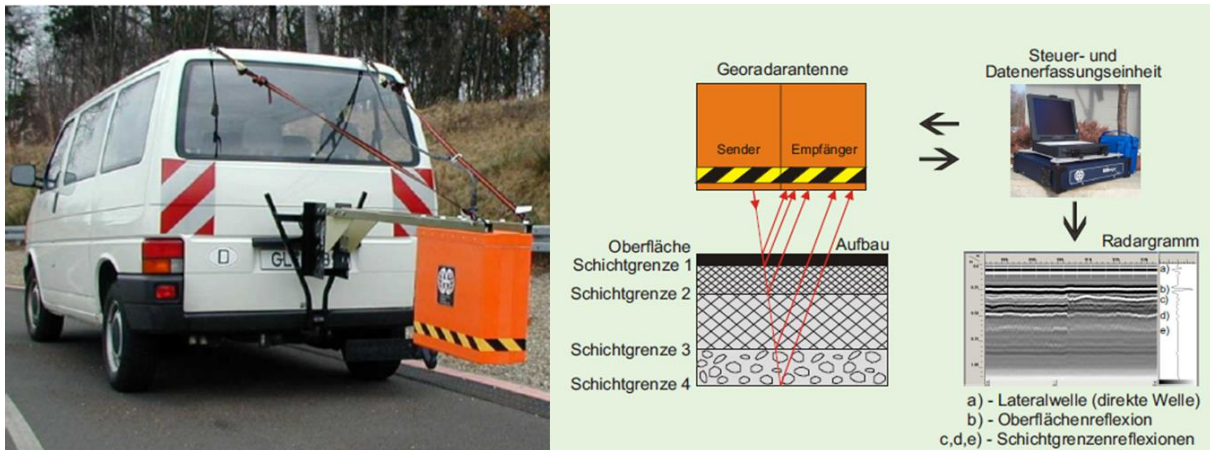
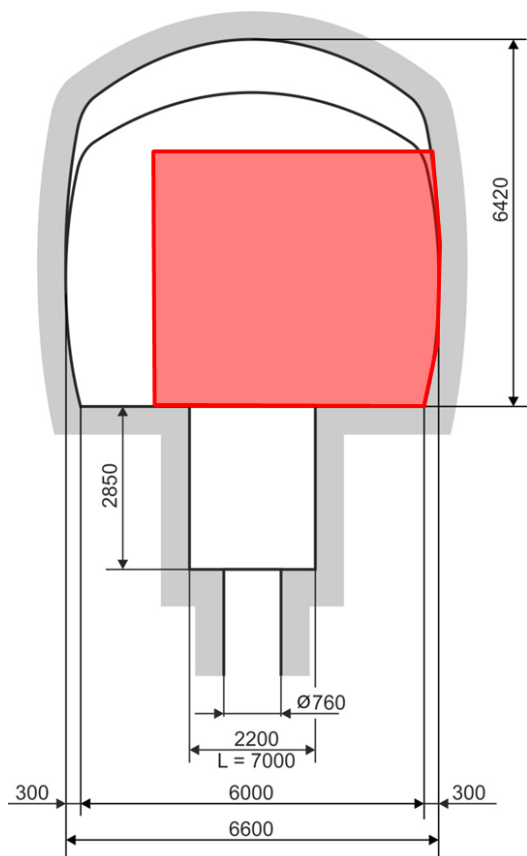


Abbildung 3-3: Beispiel eines Messfahrzeugs (links), Messprinzip einer Radarmessung zur zerstörungsfreien Fahrbahnuntersuchung (BAST, 2016)

Wurden Kontaminationen außerhalb der Verrohrung festgestellt, müssen alle Arbeiten zum Freilegen der Behälter und der Rückholung selbst in einer Einhausung durchgeführt werden. Unabhängig von einer detektierten Kontamination sollte eine Einhausung an allen Einlagebohrlöchern vorsorglich vor dem Öffnen der Verrohrung und dem Aufsetzen der Bohrlochschleuse installiert werden. Ziel der Einhausung ist die vorübergehende Abtrennung des Arbeitsbereiches vom restlichen KB und damit eine Vermeidung möglicher Kontaminationsverschleppungen. Gleichzeitig wird der durchgängige Wetterzug der Strecke nicht unterbrochen. Der Streckenquerschnitt bietet ausreichend Raum, um den Bohrlochkeller sowie den



zusätzlich benötigten Arbeitsbereich einzuhausen. Der Zugang zum Bohrlochkeller ist über einen Schleusenbereich möglich. Abbildung 3-4 zeigt die Anordnung der Einhausung im Querschnitt. Für die Dauer der Arbeiten an der offenen Verrohrung ist der eingehauste Bereich separat zu bewettern. Die Einhausung wird an eine kontinuierliche Raumluftüberwachung angeschlossen.

Abbildung 3-4: Querschnitt am Bohrloch und Bereich der Einhausung (rot)

Die Arbeitsschritte zum Öffnen der Verrohrung sind von der endgültig gewählten Verschluss-technik abhängig. Die Verrohrung kann verschraubt oder verschweißt werden. Eine Verschraubung kann grundsätzlich wieder gelöst werden. Verformungen oder Korrosion im Laufe der unbestimmten Einlagerungszeit können dies aber erschweren. In diesem Fall bilden Trennverfahren wie Trennschweißen oder Schneiden eine Alternative. Die Abdeckplatte kann mit Hilfe eines Manipulators fernbedient von der Verrohrung getrennt werden, entsprechende Techniken sind bereits aus dem Rückbau von Kernkraftwerken bekannt.

Nach dem Aufsetzen der Bohrlochschleuse kann die Einhausung zurück gebaut werden. Die Gleisanlage für die ELV und den Plateauwagen kann dann bis über das Bohrloch errichtet werden.

3.3 Versatzentnahme

Um den geforderten Abstand zwischen den Kokillen einzuhalten wird nach Einlagerung einer Kokille der entsprechende Bereich des Bohrloches mit einem gering kohäsiven, nicht kompaktierbaren Versatz (z. B.: Quarzsand) verfüllt. In gleicherweise wird auch der verbleibende Ringraum zwischen Endlagerbehälter und Bohrlochverrohrung verfüllt. Der Versatz besteht aus trockenem Quarzsand. Eine Verringerung des Kompaktionsvermögens ist durch die Auswahl eines möglichst runden Kornes und einer möglichst gleichförmigen Korngrößenverteilung denkbar. Bisher werden allerdings keine zusätzlichen Anforderungen an das Versatzmaterial gestellt. Bisherige Konzepte sehen den Einsatz handelsüblichen Sandes vor. Jedes Bohrloch wird mit ca. 41 m³ Versatz verfüllt. Das entspricht einem Anteil von ca. 0,8 m³ je Kokille.

Die Entnahme des Bohrlochversatzes im Rahmen der Rückholung erfolgt mit Hilfe einer Saugvorrichtung. Die Saugvorrichtung wird liegend in einem eigenen Transferbehälter zum Einsatzort befördert. Das Einsetzen der Vorrichtung in das Bohrloch entspricht dem Einlagerungsvorgang der Kokillen. Greifer und Saugvorrichtung werden über das Förderseil zum Einsatzort herabgelassen. Während des Saugvorganges ist das Bohrlochinnere stets von der Umgebung abgeschirmt. Das Bohrloch und der Transferbehälter bilden ein geschlossenes System. Das verfügbare Luftvolumen ist auf das Volumen in diesem geschlossenen System begrenzt. Während des Saugens muss die Saugvorrichtung die 1 m mächtige Verfüllung zwischen zwei BSK entfernen und den Kopfbereich der unteren BSK soweit freilegen, dass ein Ziehen der Kokille möglich ist. Die Entnahme des Sandes kann in mehreren Arbeitsschritten erfolgen. Ist der in die Saugvorrichtung integrierte Speicherraum mit Sand gefüllt, wird sie wieder aus dem Bohrloch entfernt. Das Herausziehen und Ablegen der Saugvorrichtung entspricht, wie auch die Behälterentnahme, einer Umkehrung des Einlagerungsvorgangs. Das Entleeren der Saugkokille erfolgt abseits des Rückholungsbetriebs in einem gesonderten Bereich. Dafür können im Infrastrukturbereich oder auch über Tage Räume vorgesehen werden. Denkbar ist auch der direkte Versatz des Sandes in bereits geräumte Bohrlöcher.

Wie schon im Kapitel 3.1 beschrieben, müssen alle Gegenstände, die aus dem Kontrollbereich entfernt werden gemäß § 44 StrlSchV (StrlSchV, 2017) auf Kontamination hin überprüft werden. Soll der Sand nicht als radioaktiver Abfall entsorgt werden, sondern anderweitig verwertet werden, muss er gemäß § 29 StrlSchV (StrlSchV, 2017) freigegeben werden. Die direkte Verwendung des Sandes als Versatz in bereits geräumte Bohrlöcher geht nur dann, wenn diese Bohrlöcher dauerhaft Kontrollbereich bleiben und das geleerte Endlager eine kerntechnische Anlage bzw. Kernanlage gemäß (AtG, 2018) bleibt und nicht aus dem Atomrecht entlassen wird. Die Freigabe des Sandes kann mittels einer Freimessanlage geschehen, die auch im Kernkraftwerk z.B. für die Freimessung von Bauschutt verwendet wird.

Nachdem die mit Sand gefüllte Saugkokille aus dem Bohrloch entfernt und wieder auf dem Plateauwagen abgelegt wurde, wird sie entweder in den Infrastrukturbereich oder nach über Tage befördert. Dieser Bereich/Raum gehört zum Kontrollbereich. Hier wird die Saugkokille vom Plateauwagen abgehoben und gedreht, so dass mit Sand gefüllte Bereich nach unten zeigt. Schließlich wird die Kokille auf einer Box abgestellt. Eine luftdichte Verbindung zwischen Kokille und Box ist vorgesehen, damit die beim Umfüllvorgang entstehenden Stäube minimiert werden. Eine zusätzliche Absaugung vor Ort ist ebenfalls vorgesehen. Nachdem Kokille und Box miteinander verbunden wurden, z.B. durch eine Flanschverbindung, wird der Schieber der Saugkokille bei laufender Absaugung geöffnet. Der Sand rieselt dann aufgrund der Schwerkraft in die Box. Nach dem Entleeren der Saugkokille wird der Schieber an der Kokille wieder geschlossen und die Flanschverbindung gelöst. Danach wird die Kokille abgehoben und wieder auf dem Plateauwagen abgelegt und zurück zum Bohrloch transportiert. Die Box wird ebenfalls verschlossen und die Absaugung wieder abgeschaltet. Die Box kann dann entweder direkt zur Freimessanlage transportiert werden oder aber zwischengelagert werden. Es ist auch möglich den Sand von mehreren Saugkokillen in einer Box zu sammeln. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass der Sand nicht aus mehreren Bohrlöchern miteinander vermischt wird, damit man eine eventuell detektierte Kontamination einem bestimmten Bohrloch zuordnen kann.

Die Saugvorrichtung muss kompakt gebaut sein, um in dem begrenzten Bohrlochquerschnitt eingesetzt werden zu können. Sie wird an dem seilgeführten Greifer der ELV in das Bohrloch herabgelassen. Die Abmessungen im und am Bohrloch sind:

Bohrlochdurchmesser	760 mm
Durchmesser Verrohrung außen	720 mm
Durchmesser Verrohrung innen:	620 mm
Vertikaler Behälterabstand:	1.000 mm

Die Gesamtlänge der Saugvorrichtung darf die Länge der BSK nicht überschreiten. Der Durchmesser der Saugvorrichtung ist an den maximalen Durchmesser der BSK anzupassen. Der Kopf der Saugvorrichtung ist mit dem gleichen Anschlag wie die BSK ausgestattet. So kann die Saugvorrichtung einerseits im Transferbehälter der BSK transportiert, andererseits von der ELV manipuliert werden.

Abbildung 3-5 zeigt einen Schnitt durch die Saugvorrichtung im Bohrloch. Die Saugvorrichtung besteht nach (Renger, 2015) aus den Baugruppen:

- Aufnahmekopf
- Hüllrohr
- Antriebsmotor
- Ventilatoreinheit
- Umlenkkupe
- Förderrohr
- Klemmvorrichtung
- Abdichtbereich
- Ansaugkopf

Das Hüllrohr mit $\varnothing$ 520 mm bildet das Stützgerüst der gesamten Saugvorrichtung und ist versehen mit Kühlschlitzen für die Belüftung des Antriebsmotors, mit Luftleitblechen für den Ventilator Ausgang, mit einem Gehäuse zur Aufnahme der Klemmung des Förderrohrs, mit dem Greifkopf und mit einem Ansaug- und Abdichtbereich für das Verschlussystem des Förderrohrs.

Der Speicherraum kann das halbe Sandvolumen (ca. 0,4 m³) zur Freilegung der Einzel-Kokille aufnehmen. Pro BSK sind somit zwei Saugvorgänge zu realisieren.

Auf ein zusätzliches Filtersystem innerhalb der Saugkokille wird verzichtet. Daraus erwachsen besonders hohe Anforderungen an die Schaufeln des Lüfters. Diese müssen der Abrasion durch noch im Luftstrom enthaltene Sandpartikel standhalten.

Auf Grund der sehr beengten Platzverhältnisse und als Ergebnis erster Saugversuche ist eine zweistufige Axialturbine mit zwei Radiallaufrädern und einem feststehenden Leitradssystem zwischen den beiden Laufrädern vorgesehen. Der Lüfter muss zum einen eine hinreichend hohe Strömungsgeschwindigkeit zur Mitnahme der Partikel erzeugen und zum anderen den Druckverlust innerhalb der Saugkokille überwinden. Der Antrieb ist mit 25 kW Nennleistung vorgesehen. Im Modell wurde ein 30kW Asynchronmotor als Antriebsmotor vorgesehen. Die an den Greifer angehängte Saugvorrichtung muss mit 400 V gespeist werden können, um den Antriebsmotor zu versorgen. Ebenso muss die Möglichkeit bestehen, die Ventilatoreinheit ein- und ausschalten zu können und bei Bedarf ein Videosignal von der Saugstelle zum Leitstand zu führen.

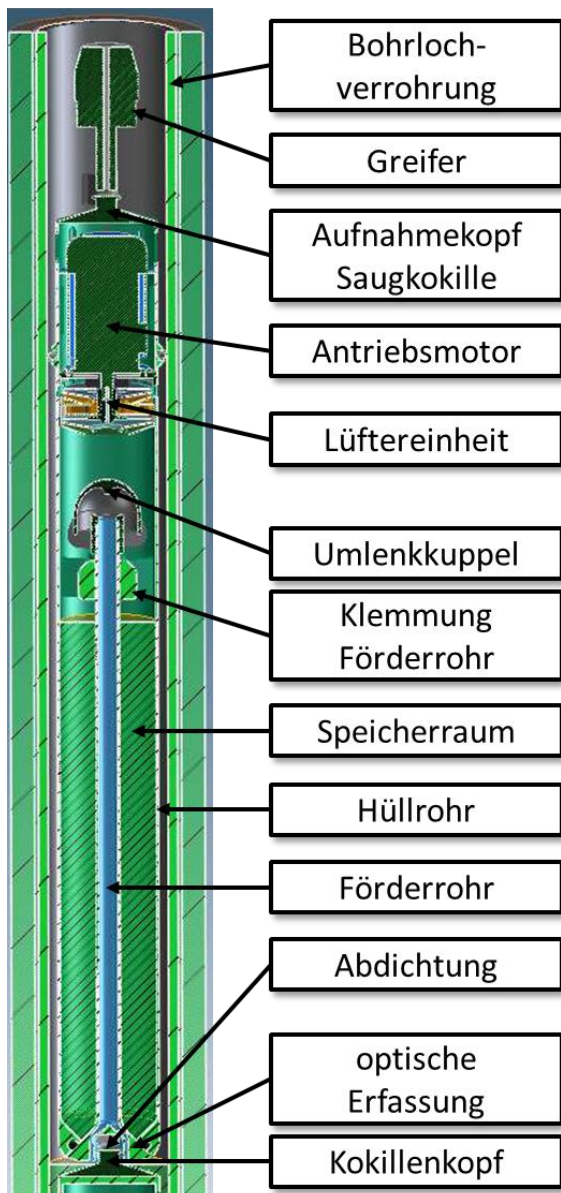


Abbildung 3-5: Schnittbild Saugvorrichtung im Bohrloch (Renger, 2015)

Das Förderrohr mit einem freien Innendurchmesser von 100 mm nimmt am unteren Ende den Saugstutzen mit Abdichtbereich auf (siehe Abbildung 3-6). Über einen Konus mit eingelegter Dichtung im Hüllrohr wird die Abdichtung zwischen Förderrohr und Hüllrohr im Saugprozess sichergestellt.

Zum Entleeren öffnet die Klemmung und das Förderrohr fällt durch das Eigengewicht und die Beladung um 40 mm nach unten und öffnet somit einen Ringspalt, über den der Quarzsand aus dem Behälter abfließen kann.

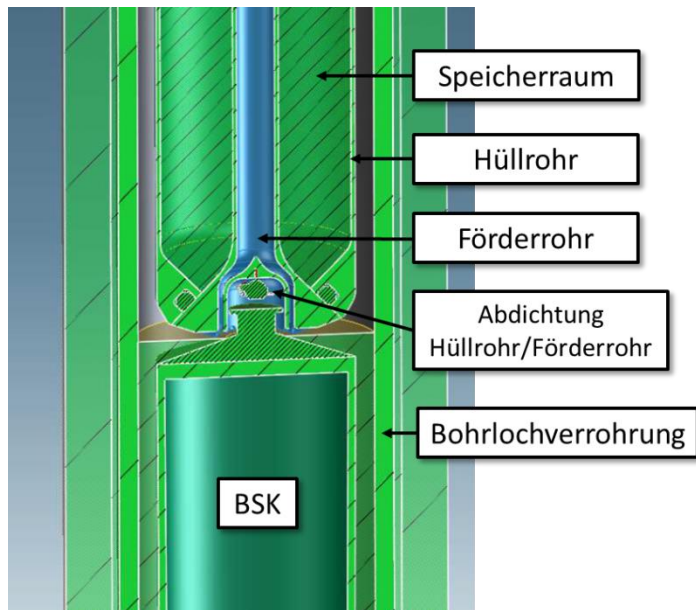


Abbildung 3-6: Schnitt durch Hüllrohr mit Förderrohr (blau) in geschlossener Stellung, zu sehen in der Position über dem Kopf des Endlagerbehälters zum Ende des Saugvorgangs vor der Behälterbergung (Renger, 2015)

Das Förderrohr wird über eine Kugel- oder Konusklemmung, die pneumatisch geöffnet werden kann, in den Positionen geöffnet oder geschlossen gehalten. Die Druckluftversorgung erfolgt über einen nachladbaren Drucklufttank in der Sauganlage.

Die Dauer des Saugvorganges hängt im Wesentlichen von der Leistung des gewählten Lüfters und dem Verhältnis des aufgenommenen Feststoffs in der Luft ab. Für den pneumatischen Transport kann ein typisches Verhältnis von 1 bis 10 kg Feststoff je kg Luft angenommen werden. Für die Befüllung des integrierten Speicherraumes von 0,4 m³ kann die Dauer des Saugvorganges somit auf ca. fünf Minuten abgeschätzt werden. Während des Saugvorganges wird das Luftvolumen stetig umgewälzt. Die Luft wird am Einlass eingesaugt, durchläuft die Saugvorrichtung, tritt im oberen Drittel der Konstruktion radial aus und strömt wieder nach unten. Damit wird dem Volumenstrom stetig Energie durch den Lüfter zugeführt, was zu einer weiteren Erwärmung der Luft führt, siehe Gl. 3-1.

$$\Delta T = \frac{\Delta p}{\rho_L * c_{pL} * \eta_{ges}} \quad \text{Gl. (3-1)}$$

ΔT	Temperaturerhöhung	K
Δp	Druckdifferenz am Lüfter	Pa
c_{pL}	spez. Wärmekapazität Luft	J/kg*K
η_{ges}	Gesamtwirkungsgrad Lüfter	-

Als Faustregel lässt sich aus Gl. 3-1 eine Temperaturerhöhung von 1 K je 1.000 Pa Druckdifferenz des Lüfters ableiten. Entsprechend dem Feststoff-Luft-Verhältnis im Luftstrom wird für den Saugvorgang ein Luftvolumen von bis zu mehreren hundert m³ benötigt. Das begrenzte Volumen innerhalb der Verrohrung wird somit stetig umgewälzt und vom Lüfter erwärmt. Diese zusätzliche Erwärmung muss bei der Auswahl eines geeigneten Lüfters und des Antriebs mit berücksichtigt werden.

Der direkte Einsatz einer digitalen Kamera nahe der Strahlenquelle sollte vermieden werden, da elektromagnetische Strahlung im „Gammaspektrum“ starke Störsignale und sogar Beschädigungen der Photozellen verursachen kann. Es empfiehlt sich ein optisches Endoskop einzusetzen, welches den für den Menschen sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums an eine Photozelle weiterleitet, für den Sub-Nanometerwellenlängenbereich (Gammastrahlung) aber nicht passierbar ist. Auch die Ausleuchtung des zu inspizierenden Objektes kann mittels eines Endoskops geschehen.

Die Elektronik ist im Kopfbereich der Saugkokille angeordnet. Aufgrund der konservativ abgeschätzten Abschirmung von 968 mm wird eine Beeinflussung der Elektronik durch Alpha- und Betastrahler aus einer geschlossenen radioaktiven Quelle (BSK) ausgeschlossen. Zur vollständigen Abschirmung von Alpha und Betastrahlern reicht eine Stahlschichtdicke von wenigen Zentimetern aus. Diese ist durch das Hüllrohr der Saugvorrichtung gewährleistet.

Die Strahlenbelastung aus der Gammastrahlung kann über den Energiegehalt der Strahlung und die Halbwertsdicke der Werkstoffe abgeschätzt werden. Die Halbwertsdicke ist die Dicke einer abschirmenden Schicht, welche die von einer Quelle ausgehende Gamma- Dosisleistung nach Durchquerung halbiert. Die Halbwertsdicke ist abhängig von der Gammastrahlenenergie und dem Material (hier Stahl). Zur Bestimmung der Gammastrahlenenergie für eine Berechnung der Halbwertsdicke werden ausgewählte Zerfallsschemata von energiereichen Gammastrahlern untersucht, vgl. Abbildung 3-7. Von den berücksichtigten Isotopen weist das ^{60}Co -Zerfallsschema mit ca. 1,332 MeV die höchste Energiespitze für Gammastrahlung auf.

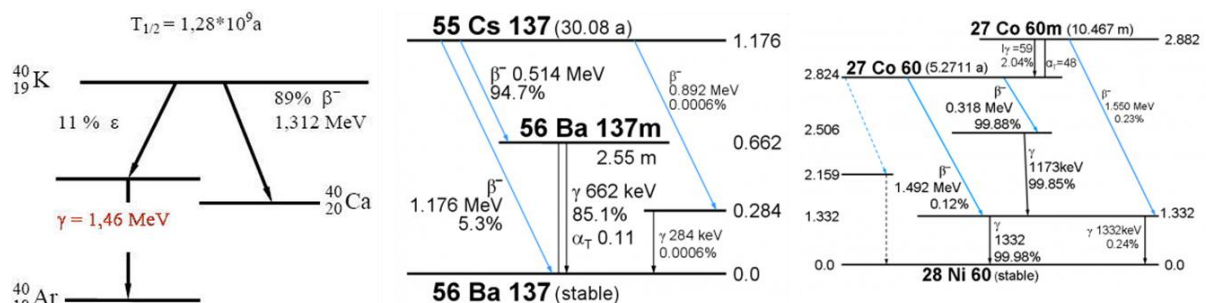


Abbildung 3-7: Zerfallsschema von ^{40}K (links), ^{137}Cs (mitte) und ^{60}Co (rechts) (Krieger, 2009)

Mit Hilfe der Energiespitze des ^{60}Co -Zerfallsschematas ergibt sich aus Abbildung 3-8 eine Halbwertsdicke $d_{1/2}$ von 17,4 mm für solide Stahlbauteile.

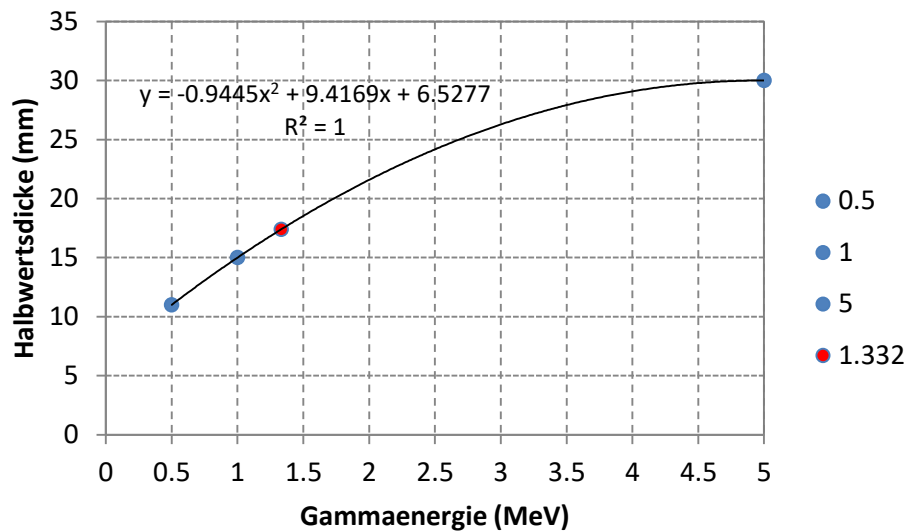


Abbildung 3-8: Halbwertsdicke für Eisen, nach (Krieger, 2009)

Die abgeschirmte Dosisleistung $\dot{H}_u$ kann nach (Vogt & Schulz, 2011) gemäß Gl. (3-1) bestimmt werden.

$$\dot{H}_u = \dot{H}_o * e^{-\ln(2) * \frac{d}{d_{1/2}}} \quad \text{Gl. (3-1)}$$

Die zu erwartende Dosis bzw. Dosisleistung der Kokillen hängt stark von deren Beladung und dem Einlagerungszeitpunkt ab. Nach (GRS, 1997) und (RSK, 2006) beträgt die mittlere Dosisleistung ca. 500 Gy/h. Bis zu einer möglichen Endlagerung kann nach (RSK, 2006) nahezu von einer Halbierung der Dosisleistung angenommen werden. Für eine einzelne CSD-V Kokille wird deshalb zu Beginn der Einlagerung eine Dosisleistung $\dot{H}_o$ von 300 Gy/h abgeschätzt. Die zusätzliche Abschirmung der BSK wird für die vereinfachte Abschätzung vernachlässigt. Die aus der Abschirmdicke ($d = 968$ mm) folgende abgeschirmte Dosis $\dot{H}_u$ beträgt somit $5,4 \cdot 10^{-15}$ Gy (Femtogray) und kann als unbedenklich (nicht messbar) eingestuft werden. Eine Beeinflussung der Elektronik durch Gammastrahlung ist damit nicht zu erwarten.

3.4 Rückholungstätigkeit

Die Rückholungstätigkeit entspricht im Wesentlichen einer Umkehrung des Einlagerungsvorganges. Die Einlagerungstechnik soll deshalb auch für den Rückholungsvorgang genutzt werden. Aus (GRS, 2012a) ist bereits bekannt, dass der bestehende Prototyp der ELV an einigen Punkten weiterentwickelt werden muss. Mit der Ergänzung eines zweiten Hubseils wird gemäß KTA 3902 und 3903 volle Kompatibilität zum kerntechnischen Regelwerk erreicht. Beide Förderseile sowie die Seiltrommel sollten außerdem eingehaust sein. Als zusätzliche Optimierung sollte ein Rüttelmotor am Kokillengreifer das Lösen der BSK aus dem Versatz erleichtern.

Die Betriebsabläufe am Bohrloch umfassen die Versatzentnahme und die Entnahme der Kokillen. Nach der Positionierung der ELV über dem Bohrloch muss zunächst der Bohrlochversatz bis zur ersten Kokille entfernt werden. Aufbau und Funktionsweise der Saugkokille werden im nachfolgenden erläutert. Die Arbeitsschritte zur Versatzentnahme sind:

1. Transportwagen mit Transferbehälter-Saugkokille fährt unter ELV
2. ELV hebt Transferbehälter-Saugkokille
3. leerer Transportwagen fährt aus ELV
4. ELV schwenkt Transferbehälter-Saugkokille
5. ELV setzt Transferbehälter-Saugkokille auf Bohrlochsleuse
6. Abschirmhaube setzt auf Transferbehälter-Saugkokille auf
7. Abschirmhaube und obere Leuse Transferbehälter-Saugkokille öffnet
8. Greifer schlägt an Saugkokille an
9. Greifer hebt Saugkokille
10. Bohrlochsleuse und untere Leuse Transferbehälter-Saugkokille öffnet
11. Greifer senkt Saugkokille bis auf Versatzoberkante
12. Saugvorgang
13. Greifer hebt Saugkokille zurück in Transferbehälter-Saugkokille
14. Bohrlochsleuse und untere Leuse Transferbehälter-Saugkokille schließt
15. Greifer legt Saugkokille ab
16. Greifer löst von Saugkokille
17. Greifer fährt in Ausgangsposition
18. Abschirmhaube und obere Leuse Transferbehälter-Saugkokille schließt
19. Abschirmhaube hebt von Transferbehälter-Saugkokille ab
20. ELV hebt Transferbehälter-Saugkokille von Bohrlochsleuse
21. ELV schwenkt Transferbehälter-Saugkokille
22. leerer Transportwagen fährt unter ELV
23. ELV setzt Transferbehälter-Saugkokille auf Transportwagen

Die Entladung der Saugvorrichtung findet an einem geeigneten Ort innerhalb des Endlagers statt. Der Transport des Transferbehälters für die Saugvorrichtung erfolgt analog dem Behältertransport mit dem Zugverband, bestehend aus Lok und Plateauwagen. Im Anschluss an das Entfernen des Versatzes erfolgt der eigentliche Rückholungsvorgang, die Entnahme der Kokille.

Die Arbeitsschritte während der Entnahme der Kokille sind:

1. Transportwagen mit leerem Transferbehälter fährt unter ELV
2. ELV hebt Transferbehälter
3. leerer Transportwagen fährt aus ELV
4. ELV schwenkt Transferbehälter
5. ELV setzt Transferbehälter auf Bohrlochsleuse
6. Abschirmhaube setzt auf Transferbehälter auf
7. Abschirmhaube und obere Schleuse Transferbehälter öffnet
8. Bohrlochsleuse und untere Schleuse Transferbehälter öffnet
9. Greifer senkt sich bis zum Tragpilz
10. Greifer fasst Tragpilz
11. Greifer hebt Kokille zurück in Transferbehälter; u.U. Rüttelvorgang zum Lösen der Kokille aus dem Versatz
12. Bohrlochsleuse und untere Schleuse Transferbehälter schließt
13. Greifer stellt Kokille ab
14. Greifer löst von Kokille
15. Greifer fährt in Ausgangsposition
16. Abschirmhaube und obere Schleuse Transferbehälter schließt
17. Abschirmhaube hebt von Transferbehälter-Saugkokille ab
18. ELV hebt Transferbehälter von Bohrlochsleuse
19. ELV schwenkt Transferbehälter
20. leerer Transportwagen fährt unter ELV
21. ELV setzt Transferbehälter auf Transportwagen

Im Anschluss kann mit der erneuten Versatzentnahme ein weiterer Rückholungszyklus beginnen. Der Zyklus wird so oft wiederholt bis der letzte Behälter aus einem Bohrloch rückgeholt ist. Im Anschluss werden die Behälter aus dem nächsten Bohrloch rückgeholt.

Der Zugverband fährt den beladenen Transferbehälter zurück zum Transportschacht. Die Schachtförderung des beladenen Transferbehälters nach über Tage erfolgt mit der vorhandenen Schachtfördertechnik.

3.5 Automatisierungspotential während der Rückholung

Im folgenden Abschnitt wird kurz zusammengefasst welches Automatisierungspotential entsprechend dem Stand der Technik an den einzelnen Betriebspunkten zu erwarten ist. Ziel ist es zu analysieren in wie weit die Anforderungen der ESK-Leitlinie "Betrieb" (ESK, 2015) nach einer weitgehend automatisierten Einlagerung auch auf den Rückholungsbetrieb übertragen werden kann. Im Rückholungsbergwerk lassen sich im Grubengebäude außerhalb der Schächte den unterschiedlichen Arbeitsprozessen während der Auffahrung und Rückholung konkrete Maschinentypen zuordnen, siehe dazu Tabelle 3-1

Tabelle 3-1: Arbeitsprozesse und Arbeitsgeräte im Rückholungsbetrieb

Arbeitsprozess	Arbeitsgeräte
Auffahrung der Strecken unter Tage	Teilschnittmaschine
Laden und Fördern des Abraums	Lader und Bandanlage
Setzen von Ankern	Ankerbohrwagen bzw. Ankerbohrlafette auf TSM
Personentransport/Sondertransport	andere bereifte Fahrzeuge
Transport der Abfallbehälter	Elektrolokomotive und Plateauwagen
Freilegung Bohrloch	Hydraulikbagger/Abbruchroboter
Öffnung des Bohrlochverschlusses	Trennroboter
Förderung Bohrlochversatz	Saugkokille
Rückholung	Einlagerungsvorrichtung

In einem Rückholungsbergwerk wird das Ziel der Arbeitssicherheit und des Gesundheitsschutzes gegenüber anderen möglichen Vorteilen der Automatisierung als prioritär eingestuft. Zusätzlich zu den herkömmlichen Gefährdungen des Bergbaus sind es vor allem klimatische Extreme und Strahlenbelastung, die betrachtet werden müssen. Im Folgenden werden dies also die Hauptkriterien darstellen.

Nach (BMU, 2010) ist in einem Endlager für radioaktive Abfälle weiterhin die Handhabung von Abfallbehältern von den bergmännischen Arbeiten möglichst vollständig zu trennen. Diese Sicherheitsanforderung ist sinngemäß auch in einem Rückholungsbergwerk anwendbar, auch wenn das Re-mining Konzept bergtechnische Arbeiten in der Nähe der Abfallbehälter zwingend erfordert. Auch bei der Betrachtung des Automatisierungspotentials der Maschinen im Rückholungsbergwerk fällt diese Trennung ins Gewicht. Die entsprechende Beurteilung fällt in Hinblick auf die bergtechnischen und die direkt an der Freilegung und Handhabung der Behälter beteiligten Maschinen recht unterschiedlich aus. Dies hat zwei wesentliche Gründe: Im bergtechnischen Umfeld sind häufig manuelle Arbeiten nötig, die grundsätzlich Personal erfordern, unabhängig vom Automatisierungsgrad der Hauptmaschine der Baustelle. Damit kann Personal nur begrenzt durch Automatisierung aus der direkten Baustellenumgebung entfernt werden. Bei der Handhabung von Abfallbehältern sind die Handhabungsschritte sehr klar definiert, was das Automatisierungspotential erhöht. Außerdem steht im Vordergrund, die Strahlenbelastung für das Personal auch unterhalb der Grenzwerte zu minimieren (StrlSchV, 2017).

3.5.1 Teilschnittmaschinen (TSM)

Der Streckenvortrieb im Rückholungsbergwerk soll ausschließlich durch TSM realisiert werden. Sie fahren sämtliche Infrastruktur-, Richt- und Bohrlochüberfahrungsstrecken sowie die Querschläge auf. Damit sind sie mit den maximalen Gebirgstemperaturen des Rückholungsbergwerks konfrontiert, da das Gebirge noch nicht lange frei liegt und wenig Zeit hatte zum Abkühlen. Die Bedingungen am Arbeitsplatz Teilschnittmaschine sind demnach in bestimmten Teilen des Grubengebäudes aus klimatischer Sicht die vermutlich anspruchsvollsten im gesamten Rückholungsbetrieb.

Grundsätzlich ist die Nutzung von TSM nach aktuellem Stand der Technik, d.h. weitgehend automatisiert, zu empfehlen. Allerdings kann auf Personal nicht vollständig verzichtet werden. Die Erstpositionierung der TSM am Stoß, Wartungs- und Überwachungsmaßnahmen erfordern nach wie vor menschliche Anwesenheit. Auch für das regelmäßige Nachziehen der Bandanlage und Stromversorgung, sowie der Sonderbewetterung ist diese notwendig.

Im Regelbetrieb, d.h. während des Schneidvorgangs, erscheint allerdings eine Fernüberwachung der TSM sinnvoll, um den Aufenthalt von Personal in heißem Klima zu minimieren. So könnte es sich z.B. in einem klimatisierten oder zumindest im Hauptwetterstrom befindlichen Überwachungsstand (z.B. im Infrastrukturbereich) aufhalten. Auch ein als Steuerstand ausgerüstetes klimatisiertes Fahrzeug in der Nähe der TSM wäre denkbar. Nur für die oben beschriebenen Arbeiten an der TSM wäre dann Personal am Stoß erforderlich. Diese könnten in Kampagnen erfolgen. Im Bergbau ist dies allerdings nicht üblich. Demnach ist eine Anpassung des TSM Technik und insbesondere der Baustellenorganisation empfehlenswert.

3.5.2 Lader

Grundsätzlich sind zwei Aufgabengebiete für Radlader im Rückholungsbergwerk denkbar. Dies ist einerseits der Abraumtransport zwischen TSM und Bandanlage, andererseits das kurzfristig geplante Bewegen von Lasten und Haufwerk, wie es in einem Bergwerk üblicherweise im Tagesgeschäft auftritt. Nur für die erste Aufgabe ist eine Automatisierung sinnvoll, da die zweite zu unvorhersehbar ist, um sie automatisch zu betreiben.

Voraussetzung für eine sinnvolle Automatisierung der Radlader ist, dass die Teilschnittmaschinen über ihren Ausleger nicht sofort die Bandanlage mit Abraum bedienen, sondern ein Radlader diesen aufnimmt und zur Bandanlage transportiert. Gerade innerhalb der verhältnismäßig kurzen Querschläge könnte diese Lösung sinnvoller sein, als die Bandanlage inklusive Übergabestelle in die Querschläge hineinzubauen. Wenn die Radladerschaufel nie einen Eingriff in loses Haufwerk durchführen muss, sondern unter dem Auslegerende der TSM zur Abraumaufnahme positioniert wird. Die größte Schwierigkeit im Automatisierungsprozess eines Radladers fällt weg. Mit einer Kombination von Reflektoren an der TSM und Sensoren am Radlader sollte es so möglich sein, auch das Laden des Radladers zu automatisieren. Diese Art von Radladerbetrieb ist also vollständig autonom möglich und wird von einem Steuerstand über Tage mit integrierter Teleoperation kontrolliert. Ein Geräteführer könnte durchaus mehrere Radlader gleichzeitig überwachen.

Im Vergleich mit einem Bergwerk zur Gewinnung von Wertmineralien wird allerdings der Aufwand dem Nutzen nicht gerecht, da die notwendigen Transportleistungen im Rückholungsbergwerk sehr gering ausfallen. Insbesondere, da auch einzelne Radlader klassischerweise für eine Vielzahl von weiteren betrieblichen Tätigkeiten eingesetzt werden, ist für Arbeiten solcher Art ein Fahrer vor Ort die beste Variante. Dieser kann sich um Vorgänge wie An- und Abkuppeln kümmern, sich von Kollegen einweisen lassen und direkt mit ihnen kommunizieren. Außerdem kann er variable Routen im Bergwerk befahren. Start-, Endpunkt und Route der Fahrt können also nach den u.U. spontanen Bedürfnissen des Bergwerks gewählt werden.

Der bemannten Fahrt wird hier also der Vorzug vor der Teleoperation gegeben. Eventuell auftretende extreme klimatische Bedingungen können durch eine Klimatisierung der Fahrerkabine gemindert werden.

3.5.3 Ankerbohrwagen

Die Betriebsabläufe beim Setzen von Ankern sind unterschiedlich zu betrachten, je nachdem, ob Anker regelmäßig im Vortrieb gesetzt werden oder an lokalen Schwachstellen im Gebirge.

Im Salz ist das Ankern eine vergleichsweise selten nötige und wenn, nur lokale Form des Ausbaus, da das in Deutschland für die Endlagerung diskutierte Zechsteinsalz in der Regel sehr standfest ist. Dementsprechend ist die direkte Kombination aus TSM mit Manipulator zum Bohren und Setzen der Anker vermutlich überflüssig und würde nur die Wartung der kaum genutzten Bohr- und Setzlauffetten erschweren. Selbst bei lokal notwendiger Verankerung dürfte das Ankern nicht so zeitkritisch sein, dass das Setzen von Ankern direkt in den Vortriebszyklus integriert sein müsste. Dementsprechend böte sich ein kleiner mobiler Bohrwagen an, der bei Bedarf an beliebiger Stelle Anker setzen kann. Aufgrund der nur in bestimmten Streckenabschnitten (wenn überhaupt) vorgesehen Verankerung, fällt diese nicht systematisch aus. Damit wäre sie auch nur aufwendig für den jeweiligen Einzelfall zu programmieren. Ein Ankerbohrwagen mit einer klimatisierten Fahrerkabine mit langem Ausleger ist also nach aktuellem Stand der Technik eine sichere und sinnvolle Lösung für ein Rückholungsbergwerk in Salz.

Für den Fall einer systematisch in jeder Strecke stattfindenden Verankerung wird in den Vortrieb integriert. Ausgesprochen günstig stellt sich die Kombination der Funktion des Ankerbohrwagens mit der TSM dar, die in diesem Fall über eine eigene Ankerbohrlafette verfügt. Auch eine Automatisierung des Ankersetzens über ein digitales Ankerschema ist zur Qualitätssicherung sinnvoll. Sowohl der Nachschub von Verbrauchsmitteln, als auch das Anbringen von Netzen an Firste und Stößen, muss allerdings nach heutigem Stand von Personal realisiert werden. Für die Steuerung der Maschine gilt gleiches wie in der Beschreibung zur TSM.

Grundsätzlich ist die Teleoperation eines Ankerbohrwagens von der Oberfläche oder dem Infrastrukturbereich aus vorstellbar. Manuelle Arbeiten, wie das Nachladen von Verbrauchs-

material, könnten weitestgehend im Infrastrukturbereich erledigt werden. Da allerdings im Vortrieb immer auch manuelle Arbeit anfällt, rechtfertigt der Aufwand den Nutzen nicht.

3.5.4 Andere bereifte Fahrzeuge

In einem Rückholungsbergwerk ist nicht zu erwarten, dass Förderung bzw. Transport in größerem und regelmäßigem Umfang mit bereiften Fahrzeugen außer den bisher genannten auftritt. Vorstellbar sind immer Sondertransporte auf z.B. Pick-up Trucks oder Gabelstaplern, sowie Befahrungen mit PKW und der Transport von Personal zum Arbeitsplatz. Eine Automatisierung in Form von Teleoperation oder sogar eine Vollautomatisierung scheint in diesem Aufgabenspektrum ausgesprochen aufwendig und wenig erfolgversprechend. Gewinnbringender können stattdessen im Fahrzeug integrierte Hilfssysteme sein wie sie auch im öffentlichen Straßenverkehr schon existieren. Diese könnten z.B. Maximalgeschwindigkeiten festlegen und Kollisionen durch Annäherungsalarm und Notbremsung vermeiden. Anstelle eines Zugriffs auf GNSS bräuchte es dann ein untertägliches Referenzsystem zur Positionsbestimmung. Ein solches System ist für alle bereiften Fahrzeuge des Bergwerks empfehlenswert.

3.5.5 Hydraulikbagger

Hydraulikbagger sind im Falle der Rückholung in der Variante Bohrlochlagerung für das Ausheben der Bohrlochkeller vorgesehen. Die Bohrlochkeller sind in Bezug auf ihre Ausmaße und ihren Standort klar definiert. Obwohl die Aufgabe keine komplexeren Abläufe enthält und klar zu definieren ist, ist zu prüfen, ob eine Automatisierung sinnvoll ist.

Eine Teleoperation des Hydraulikbaggers wird insbesondere auf Grund des „ALARA“ (As low as reasonably achievable) Prinzips aus dem Strahlenschutz empfohlen (§6 (StrlSchV, 2017)):

Der Geräteführer arbeitet verhältnismäßig nah an den Abfallbehältern und entfernt mit seiner Arbeit einen Teil des abschirmenden Haufwerks. Um eine unbeabsichtigte Beschädigung des Bohrlochverschlusses zu vermeiden, ist eine sensorbasierte Unterstützung des Geräteführers denkbar, z.B. in Form eines Annäherungs-Alarms bei der Schaufel an den Bohrlochverschluss. Diese Art von Bagger wäre eine Sonderanfertigung, deren Eigenschaften aber im Stand von Wissenschaft und Technik wiederzufinden sind.

3.5.6 Schweißroboter

Grundsätzlich sind per Teleoperation verfahrbare Roboter Stand der Technik. Ein auf Raupenketten fahrender Roboter mit Schweißarm, der zur Rückholung der Kokillen in der Variante Bohrlochlagerung den Bohrlochverschluss öffnet, wäre auf Grund des vorhandenen Strahlungsfeldes sinnvoll. Ein vergleichbares, industrielles Beispiel existiert allerdings nicht.

Eine Spezialanfertigung/Neuentwicklung für den konkreten Fall ist denkbar. Diese könnte z.B. ferngesteuert über das Bohrloch gefahren werden, um dann mit einem Laserscanner die

Form des ggf. durch Gebirgsdruck verformten Bohrlochdeckels auszumessen und darauf basierend, automatisch die Trennplanung und das Trennen selbst durchführen.

3.5.7 Zugbetrieb

In allen betrachteten Einlagerungsvarianten erfolgt der Transport der Abfallbehälter unter Tage gleisgebunden. POLLUX®-Behälter (Streckenlagerung) oder Transferbehälter (Bohrlochlager) werden auf einem geeigneten Plateauwagen von einer angekoppelten Batterie-Lokomotive bewegt. Der Gleisverlauf bleibt dabei über längere Zeit konstant, da die Lokomotive nur zwischen Behältertransportschacht und Eingang Rückholungsstrecke oder Bohrloch pendeln muss. Ziel jeglichen Umgangs mit den Abfallbehältern muss ein Maximum an Betriebssicherheit sein. Daran hat sich auch der Automatisierungsgrad zu messen. In einer Betriebsart, in der der Geräteführer jegliche Fahrbefehle steuert, ist ein Fehler des Geräteführers direkt ein potentieller Unfall. Bei Vollautomation ist die menschliche Fehleranfälligkeit eliminiert. Eine Kombination aus menschlicher Überwachung und automatisierter Überwachung und Steuerung wie im zivilen Zugverkehr ermöglicht ein Höchstmaß an betrieblicher Sicherheit. Möglich wäre z.B., dass der Beladevorgang des Plateauwagens sowohl durch die Automatik gesteuert, als ferngesteuert vom Geräteführer überwacht wird. Erst wenn die Automatik den Beladevorgang des Plateauwagens als abgeschlossen meldet, kann der Geräteführer den Fahrbefehl für die Lokomotive geben. Diese fährt dann selbstständig zum Schacht, wobei der Geräteführer, der über Kameras die gesamte Gleisstrecke gleichzeitig im Blick behält, jederzeit durch Teleoperation eingreifen kann. Die Automatik muss mit redundanten Sicherheitssystemen ausgerüstet sein, um alle denkbaren Unfälle in eine beherrschbare Betriebssituation überführen zu können.

3.5.8 Einlagerungsvorrichtung

Die in (DBE TEC, 2010) in den Stand der Technik überführte Einlagerungsvorrichtung soll auch für den Rückholungsvorgang genutzt werden. Die Bedienung der Vorrichtung erfolgt ferngesteuert aus einem Steuerstand. Dieser kann in sicherer Entfernung zur Vorrichtung aufgestellt werden und muss nicht zwingend in der Bohrlochüberfahrungsstrecke aufgestellt werden. Eine Fernsteuerung von einem zentralen (überträgigen) Leitstand ist ebenso möglich.. Die Überwachung der einzelnen Arbeitsschritte erfolgt über Videokameras. Die Anwesenheit von Personal ist aber nur für wenige infrastrukturelle Arbeiten in der Rückholungsstrecke notwendig. Zur weiteren Minimierung der Strahlenexposition wären eine größere Entfernung des Bedieners zur Vorrichtung, und damit eine Teleoperation, sinnvoll. Die technischen Voraussetzungen sind an der Einlagerungsvorrichtung grundsätzlich gegeben. Zusätzlich zur bestehenden Infrastruktur müsste das Grubengebäude mit einer geeigneten Technik zur Datenübertragung zwischen Einlagerungsvorrichtung und den Steuerstand ausgestattet werden.

Im Fall der Saugkokille als Lösung für die Entfernung des Bohrlochversatzes ist eine vollständige Neuentwicklung notwendig. Ihr Automatisierungspotential ist ohne Festlegung auf ein Maschinenkonzept noch nicht abzuschätzen. Empfehlenswert wären ein identischer Automatisierungsgrad zur ELV und eine gemeinsame Steuerung.

3.5.9 Betriebsüberwachung

Die Gesamtüberwachung des Endlagerbergwerks unter Berücksichtigung des Betriebspersonals unter Tage ist aus mehreren Gründen empfehlenswert.

Zum einen erleichtert dies die Kontroll- und Überwachungsaufgaben der Betriebsführung und der bestellten Aufsichtspersonen über sämtliche Betriebsprozesse. Das bedeutet, dass jeder Betriebspunkt und jede Maschine Statusmeldungen an das Leitsystem abgeben müssen.

Zum anderen ist die kurzfristige Planung von Betriebsmitteleinsätzen so effizienter möglich. Der wichtigste Vorteil besteht allerdings im Bereich der Betriebssicherheit und des Strahlenschutzes: Durch die Positionsanzeige jedes einzelnen Mitarbeiters unter Tage ist im Ernstfall ein zielgerichtetes Notfallmanagement möglich. Dieses kann die Verteilung und mögliche Nutzung von Personal und Betriebsmitteln direkt, z.B. für einen Verletztentransport, einbeziehen. Auch sind der Eintritt, der Aufenthalt und das Verlassen von Strahlenschutzbereichen mit dieser Maßnahme gut zu überwachen. Es kann also sichergestellt werden, dass sich nur befugtes Personal an entsprechenden Betriebspunkten aufhält. Gleiches kann für das Bedienen von untertägigem Gerät gelten. Hier sollten Mitarbeiter über bspw. Transponder an der Maschine registriert werden. Nur, entsprechend geschultes und freigeschaltetes Personal dürfte so die fragliche Maschine bedienen. Bei nicht autorisierten Mitarbeitern würde sie keine Befehle annehmen (außer Bremsen und Stillsetzen/Not-Aus).

3.5.10 Schlussfolgerungen der Betrachtung des Automatisierungspotentials

Grundsätzlich lassen sich in einem Rückholungsbergwerk viele maschinelle Abläufe in Teilen oder sogar in Gänze nach aktuellem Stand der Technik automatisieren. Eine Vollautomatisierung wäre in den zwei wesentlichen Bereichen des Rückholungsbergwerks empfehlenswert:

- Im bergtechnischen Bereich, insbesondere im Streckenvortrieb, läge der Vorteil darin, Personal vor den klimatischen Bedingungen des Rückholungsbergwerks zu schützen.
- Bei der Handhabung der Abfallbehälter ginge es darum, Personal vor Strahlung zu schützen.

Im bergtechnischen Bereich ist festzustellen, dass auch bei Vollautomatisierung der Maschinen dennoch immer wieder manuelle Arbeiten auftreten, die sich nach Stand von Wissenschaft und Technik nicht automatisieren lassen. Dies dürfte ein wesentlicher Grund sein, warum Vollautomatisierung einzelner Maschinen nur in wenigen Fällen im Bergbau zum Einsatz kommt, obwohl sie rein technisch für die meisten Maschinen machbar erscheint. Zweck der Automatisierung im Streckenvortrieb muss demnach die Minimierung der Aufenthaltszeit von Personal im Grubenklima sein. Dies gelingt durch das Bereitstellen von klimatisierten Fahrerständen, die der Geräteführer nur für wenige Arbeiten außerhalb seines Fahrzeugs verlassen muss.

Im Umfeld der Abfallbehälter sind vergleichbare manuelle Arbeiten, die den Wert einer Vollautomatisierung mindern, kaum notwendig. Zusätzlich sind die einzelnen Arbeitsschritte in der Handhabung dieser Behälter sehr klar definierbar und damit gut zu automatisieren. Für viele der beteiligten Maschinen existiert, nach Stand der Technik, auch schon die Möglichkeit der Fernsteuerung. Demnach wäre ein nächster sinnvoller Schritt die Weiterentwicklung zur Teleoperation dieser Maschinen von einem Steuerstand über Tage aus. Zusätzlich bedürfen die Schnittstellen zwischen den Handhabungsschritten des Behältertransportes einer besonderen Beachtung.

Eine Betriebsüberwachung, die alle wesentlichen Prozesse unter Tage gleichzeitig im Blick behalten kann, dient gleichzeitig der besseren Kontrolle über diese Abläufe, der Betriebssicherheit und dem Strahlenschutz.

Auch wenn sich diese Kapitel mit dem Automatisierungspotential der Maschinen eines Rückholungsbergwerks befassen, lassen sich die Erkenntnisse auch auf ein Einlagerungsbergwerk und grundsätzlich auch auf die Tagesanlagen übertragen.

3.6 Bewetterung und Klimavorausberechnung

3.6.1 Bewetterungssystem

Das bestehende Endlagerkonzept der Bohrlochlagerung in Salzformationen beinhaltet eine einsöhlige Wetterführung. Die Versorgung des Grubengebäudes mit Frischwettern soll allein über die für die Einlagerung notwendigen Strecken erfolgen. Die frischen Wetter ziehen über den einziehenden Schacht der zentralen Doppelschachanlage in das Grubengebäude. Die Wetterströme können innerhalb des Endlagers durch Wetterbauwerke gesteuert und Blindstrecken durch Sonderbewetterung versorgt werden. Alle Abwetterströme werden in der nördlichen Richtstrecke gesammelt und zum ausziehenden Schacht geleitet. Es entsteht eine umläufige Wetterführung. Mit dem Verzicht auf zusätzliche Abwetterstrecken und Wetterbohrlöcher reduziert sich der Auffahrungsaufwand während der Betriebszeit deutlich. Damit wird entsprechend der Sicherheitsanforderungen des BMU *"die Durchörterung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches mit Schächten, Auffahrungen oder Bohrungen"* (BMU, 2010) minimiert.

Die Brennstabkokillen sind nicht selbstabschirmend. Die BSK sind gemäß den gestellten Anforderungen gas- und aerosoldicht. Dementsprechend treten im Normalbetrieb sowie im Störfall keine Gase oder Aerosole aus. Im Endlagerbetrieb werden sie ausschließlich in den Transferbehältern oder im Bohrloch gehandhabt. Nach der Einlagerung sind die Kokillen durch die fest im Gebirge eingespannte Verrohrung und die Bohrlochschleuse vom Grubengebäude getrennt. Das innere der Verrohrung wird dem Sperrbereich zugeordnet. Jedes Bohrloch wird nach der Einlagerung aller Kokillen mit einem Deckel verschlossen. Der Bohrlochkeller wird ebenfalls verfüllt. Die Kokille ist damit stets vom Wetterstrom getrennt. Die radiologische Belastung im Umfeld der Abfallbehälter und eine mögliche Kontaminationsverschleppung werden durch die strikte Trennung auf ein Minimum reduziert.

Das Prinzip einer einsöhligen Bewetterung soll auch während der Rückholung angewendet werden. Der Aufbau der Bewetterung unterscheidet sich vom Einlagerungsbetrieb durch ein verändertes Grubengebäude und die deutlich unterschiedlichen Umgebungsbedingungen.

Da während der Rückholung die Langzeitsicherheit des Endlagerbereiches nur noch eine untergeordnete Bedeutung hat, richten sich die einzuhaltenden Sicherheitsanforderungen primär nach den geltenden bergbehördlichen Vorgaben. Das bedeutet Sicherheitsabstände müssen während der Rückholung nicht zwingend nach den Gesichtspunkten der Langzeitsicherheit gewählt werden und eine Minimierung des Auffahrungsaufwandes ist nicht mehr zwingend notwendig. Mit der Auffahrung zusätzlicher Strecken kann der nutzbare Wetterstrom vergrößert und somit günstigere klimatische Bedingungen unter Tage geschaffen werden. Dies ist besonders mit Blick auf den zusätzlichen Wärmeeintrag aus den eingelagerten wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen wichtig. Eine ausreichende Bewetterung ist stets auch die Grundlage für einen effizienten und sicheren Grubenbetrieb.

Die Doppelstrecke im Süden des Grubengebäudes dient als Frischwetterstrecke (siehe Abbildung 3-9). Teilströme werden bedarfsgerecht in die Bohrlochüberfahrungsstrecken geleitet.

Der nutzbare Volumenstrom wird durch den Streckenquerschnitt und die zulässige Wettergeschwindigkeit von maximal 6 m/s in regelmäßig befahrenen Strecken begrenzt. Die Abwetter der einzelnen Teilfelder werden in der nördlichen Richtstrecke gesammelt und zum ausziehenden Schacht geleitet. Die nördliche Richtstrecke (Abwetterstrecke) kann mit einem Querschnitt von 50 m² bis zu 300 m³/s oder 18.000 m³/min fassen.

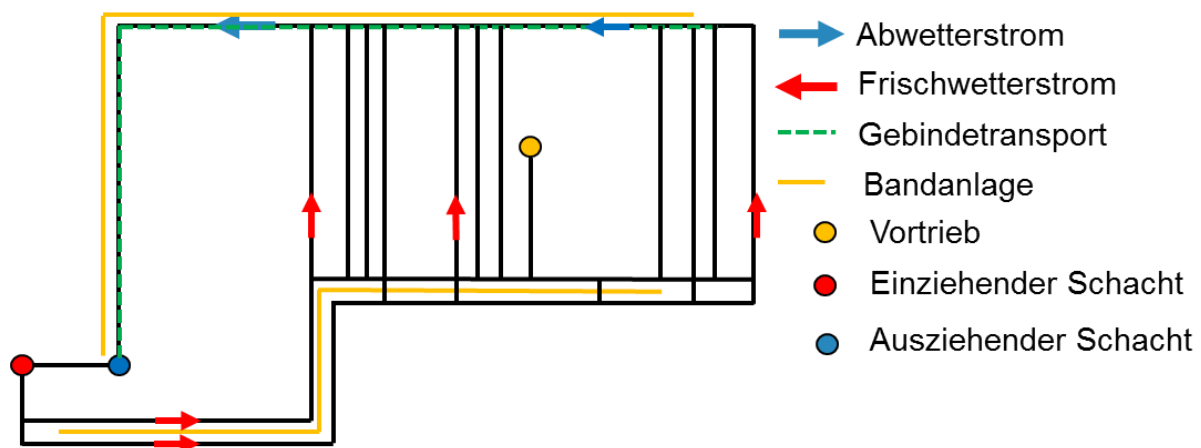


Abbildung 3-9: Bewetterungsschema während der Rückholung

Alle Bohrlochüberfahrungsstrecken liegen querschlägig zwischen den Richtstrecken. Die Sonderbewetterung der Streckenvortriebe erfolgt aus den Richtstrecken. Die Wetterströme werden durch entsprechende Wetterbauwerke (Wettertüren, Schleusen etc.) gesteuert.

Der benötigte Wetterbedarf richtet sich nach den Verbrauchern und den einzuhaltenden Wettergeschwindigkeiten. Die wesentlichen Betriebspunkte mit dem erwarteten Wetterbedarf sind in Tabelle 3-2 zusammengefasst. Zusätzlich zu diesen Arbeiten finden Befahrungen und Nebenarbeiten wie beispielsweise Anker- und Beraubearbeiten oder auch der Fahrbahnbau statt. Da diese Tätigkeiten nicht ständig stattfinden, können sie zu einem Verbraucher mit einem Wetterstrom von 600 m³/min zusammengefasst werden. Beim Einsatz jeweils eines Betriebspunktes ergibt sich ein Wetterbedarf von ca. 1.800 m³/min im ÜB und 4.800 m³/min im KB.

Tabelle 3-2: Wetterbedarf der verschiedenen Betriebspunkte

Betriebspunkt	Wetterbedarf [m³/min]	Verbraucher
Streckenvortrieb	1.200	Belegschaft, schwere Teilschnittmaschine, Fahrlader, Entstaubungsanlage
Gleisbau	800	Belegschaft, Fräse, Fahrlader, Transportfahrzeug
Freilegen/Herrichtung des Bohrloches	800	Belegschaft, Bagger, Fahrlader, Entstaubungsanlage, Schneid-/Trennanlage
Rückholung	600	Belegschaft, ELV
Versatz	800	Belegschaft, gleisgebundenes Versatztransportfahrzeug, Entstaubungsanlage

Zusätzlich zu den Rückholungsfeldern ist auch der Infrastrukturbereich zu bewettern. Dafür werden nach (GRS, 2012a) 10.000 m³/min berücksichtigt. Der Mindestwetterbedarf liegt somit bei 16.600 m³/min. Mit weiteren Betriebspunkten steigt auch der Mindestwetterbedarf.

3.6.2 Temperaturentwicklung im Gebirge bis zum Beginn der Rückholung

Die nachfolgende Analyse der Temperaturentwicklung in und um die Einlagerungsbereiche basiert auf den thermo-mechanischen Berechnungen aus (GRS, 2012a). Die dort durchgeführte Endlagerauslegung bildet die Referenz für das Rückholungskonzept.

Alle Behälter und damit auch die für die Temperaturberechnungen modellierten Wärmequellen liegen unterhalb der Einlagerungs- bzw. Rückholungssohle. Der Wärmeeintrag der Behälter führt zuerst zu einer Erwärmung des Bohrloches und der umliegenden Gebirgsbereiche. Temperaturen nahe der Auslegungsgrenze sind zunächst auf diese Bereiche begrenzt. Die Erwärmung der Einlagerungs- bzw. Rückholungssohle erfolgt deutlich langsamer als die Erwärmung der direkten Umgebung der Behälter. Die zu erwartende Gebirgstemperatur in den Grubenbauen hängt von der Position im jeweiligen Einlagerungsfeld und dem zeitlichen Abstand zwischen Einlagerung und Rückholung ab. Abbildung 3-10 veranschaulicht dies anhand fünf ausgewählter Beobachtungspunkte im schachtnahen Einlagerungsfeld. Die Einlagerung in diesem Feld beginnt in der schachtfürnsten Strecke des Feldes, ca. 30 Jahre nach Beginn des Endlagerbetriebs. Im Anschluss an die Einlagerung setzt eine Erwärmung der Gebirgstemperatur in diesem Einlagerungsfeld ein. Im Vergleich dazu kommt es in der schachtnächsten Einlagerungsstrecke erst kurz vor Ende der Betriebszeit des Endlagers zu einer Erwärmung, da diese Strecke als letzte befüllt wird. Abbildung 3-10 verdeutlicht auch, dass im Zentrum des Einlagerungsfeldes die höchsten Temperaturen zu erwarten sind.

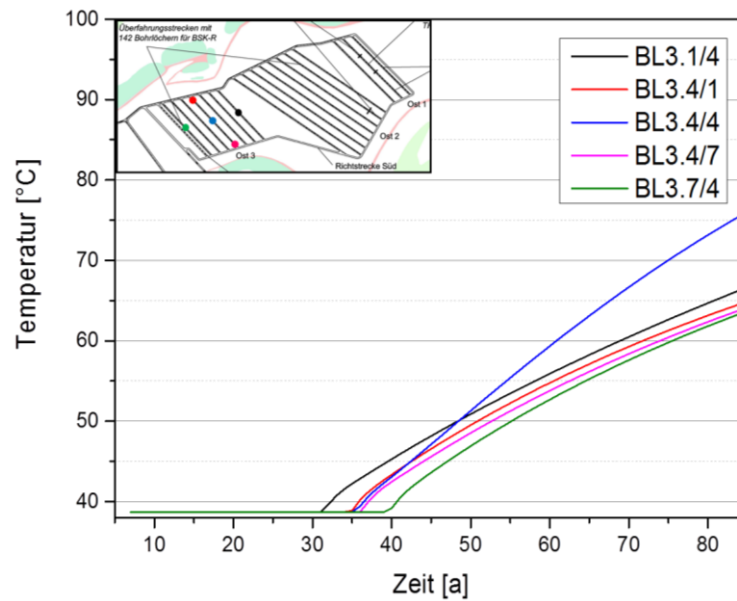


Abbildung 3-10: Temperaturentwicklung an ausgewählten Punkten im schachtnächsten Einlagerungsfeld Ost 3 während der Betriebszeit des Endlagers

Im zentralen Einlagerungsfeld Ost 2 sind zu Beginn der Rückholung Gebirgstemperaturen zwischen 46°C und 59 °C zu erwarten. Wie im Feld Ost 3 schwanken die Temperaturen auch hier über die Streckenlänge. Direkt über den verfüllten Bohrlöchern liegen die Temperaturen im Schnitt 2 K höher als im Rest der Strecke, siehe Abbildung 3-11.

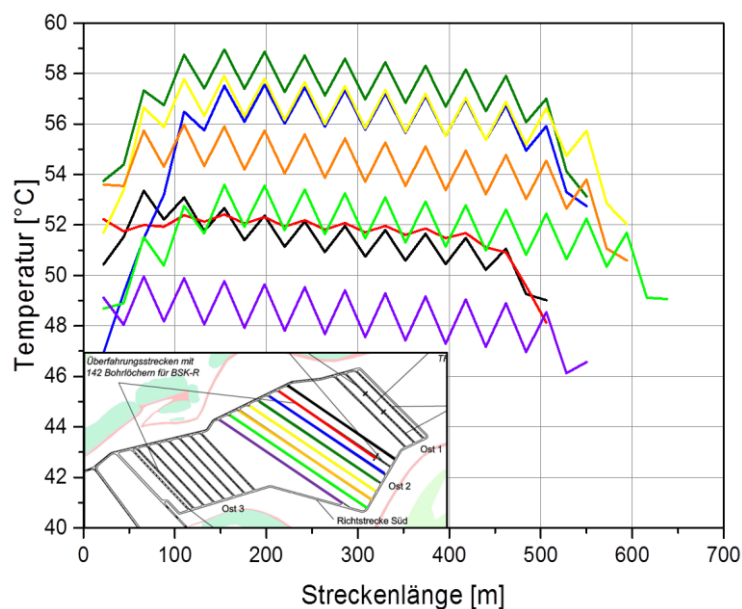


Abbildung 3-11: Temperaturverlauf längs der Bohrlochüberfahrungsstrecken des Feldes Ost 2 zu Beginn der Rückholung (43 a nach Einlagerungsbeginn)

Der Temperaturanstieg während des potenziellen Rückholungszeitraumes verläuft im gesamten Grubengebäude annähernd linear. Ohne Rückholung treten 40 Jahre nach Ende der Einlagerung in den Bohrlochüberfahrungsstrecken Temperaturen bis maximal 82°C auf, siehe Abbildung 3-12. Diese hohen Temperaturen werden nur in den zentralen Bohrlochüberfahrungsstrecken des Feldes Ost 2 erwartet. Abbildung 3-13 zeigt die Temperaturentwicklung entlang der Streckenachse der heißesten Bohrlochüberfahrungsstrecke (Strecke 5 in Ost 2). In den Randbereichen des Einlagerungsfeldes Ost 2 steigen die Temperaturen nur im Einzelfall über 65°C. Im schachtnahen Einlagerungsfeld Ost 3 steigen die Temperaturen bis auf maximal 74°C an. Das Feld Ost 1 erfährt eine Erwärmung bis maximal 56°C. Der Beobachtungspunkt liegt dabei stets auf der Streckensohle.

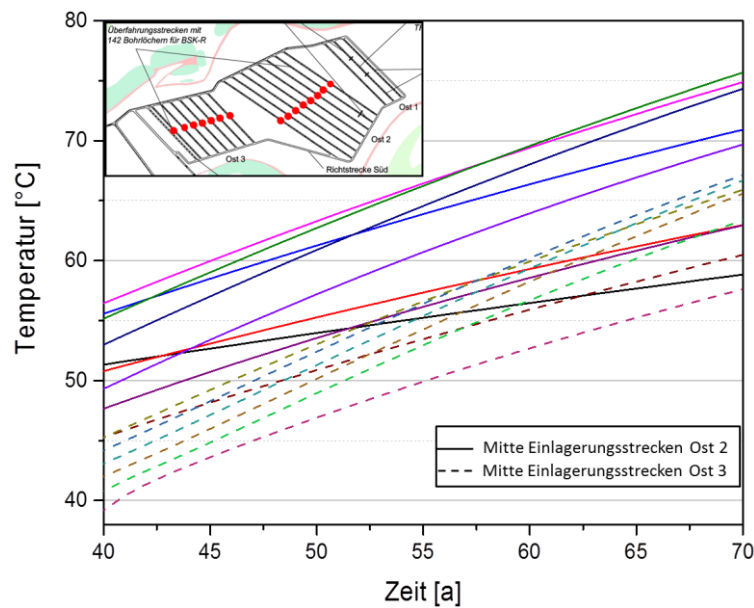


Abbildung 3-12: Temperaturentwicklung in den wärmsten Bereichen (Streckenmitte) der Bohrlochüberfahrungsstrecken in Ost 2 und 3 während der Rückholungsphase

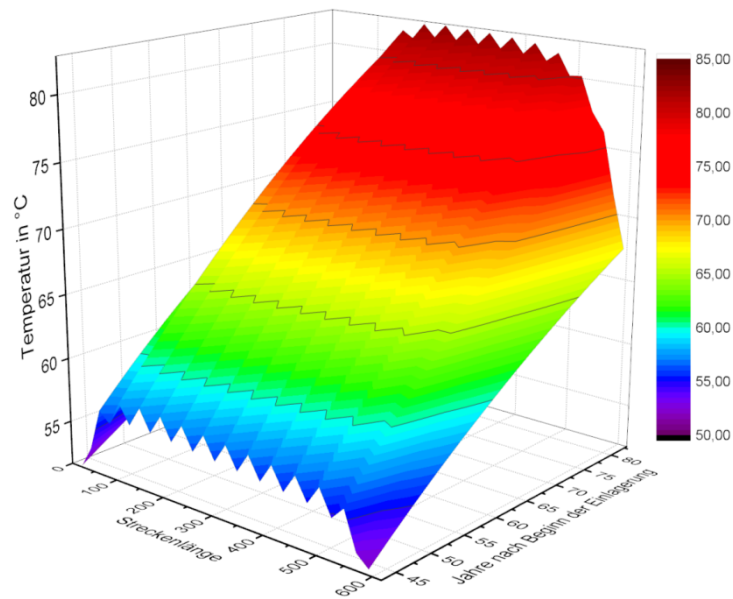


Abbildung 3-13: Temperaturentwicklung entlang der Einlagerungsrecke Ost 2.5 (Mitte des größten Einlagerungsfeldes)

3.6.3 Temperaturentwicklung im Gebirge nach der Entnahme der Behälter

Entsprechend der getroffenen Annahmen wird von einem Beginn der Rückholung 40 Jahre nach Einlagerungsbeginn ausgegangen. Die Rückholung der Behälter entspricht im Modell einer Entnahme der Wärmequellen aus den Einlagerungsbereichen. Die weitere Erwärmung des Gebirges wird unterbrochen. Der bis dahin erfolgte Wärmeeintrag verteilt sich weiter im Gebirge und wird teilweise über die Wetter abgeführt. Um die Gebirgstemperaturen möglichst exakt abzubilden wurde eine zusätzliche Berechnung durchgeführt, in der die Wärmequellen in Abhängigkeit des Einlagerungsfortschrittes aktiviert und anschließend entsprechend des angenommenen Rückholungsfortschrittes schrittweise wieder deaktiviert wurden. Die Modellrechnung unterliegt der Annahme, dass die Rückholung in umgekehrter Reihenfolge zur Einlagerung erfolgt. Die resultierenden Temperaturen fließen in die Modellbildung ein. Abbildung 3-14 zeigt die Temperaturentwicklung nach Rückholung für ausgewählte Punkte im Grubengebäude. Kühleffekte der Wetter sind an dieser Stelle noch nicht berücksichtigt.

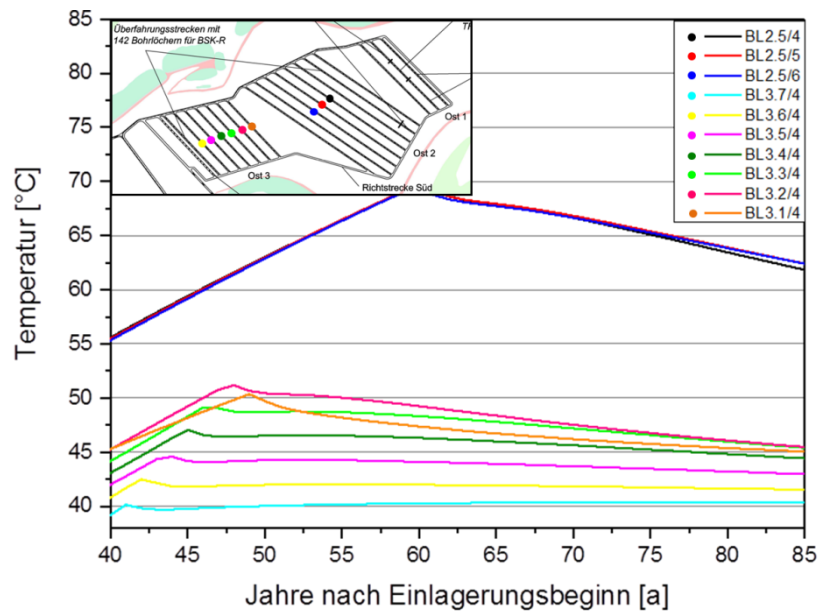


Abbildung 3-14: Temperaturentwicklung nach der Rückholung ohne Wettereinwirkung (Punkte identisch zu Abbildung 2-9)

Die Entnahme der Wärmequellen (Rückholung der Behälter) ist in der Temperaturentwicklung deutlich durch den unterbrochenen Temperaturanstieg und die einsetzende Abkühlung zu erkennen. In allen Bohrlochüberfahrungsstrecken kann der stetige Anstieg der Gebirgstemperatur unterbrochen werden. Die Berechnung zeigt auch, dass durch eine schnelle Auffahrung und Rückholung im Feld Ost 2 die Temperaturentwicklung in diesem heißesten Gebirgsbereich deutlich eingeschränkt werden kann. Über den Rückholungszeitraum muss trotzdem in allen Teilen des neuen Grubengebäudes auch nach erfolgter Rückholung mit erhöhten Temperaturen gerechnet werden. Die Temperatur sinkt nur langsam auf das natürliche Niveau ab. Die Kühlwirkung der Wetter wird diesen Prozess beschleunigen.

3.6.4 Modellbildung und Klimavorausberechnung

Die Wetternetz- und Klimavorausberechnung erfolgte mit der Software VentSim Visual™ 3. Das Programm erlaubt die dreidimensionale Darstellung der Wetterwege (Grubenbaue) und die Simulation der thermo-dynamischen Zustände. Die verschiedenen Entwicklungsphasen des Rückholungsbergwerkes wurden durch einzelne Modelle abgedeckt.

Der Rückholungszeitraum wird durch sieben Teilmodelle abgedeckt, siehe Abbildung 3-15. Mit diesen Modellen werden die Rückholungs- und Auffahrungstätigkeiten in einzelnen Bohrlochüberfahrungsstrecken dargestellt. Die Auffahrung der Aus- und Vorrichtungsstrecken erfolgt zunächst parallel zu den Rückholungsarbeiten. Die Teilmodelle repräsentieren folgende Zustände:

- | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| • Modell 1: Umfahrung | 42 Jahre nach Beginn der Betriebszeit |
| • Modell 2: Auffahrung Ost 3.4 | 43 Jahre nach Beginn der Betriebszeit |
| • Modell 3: Auffahrung Ost 3.1 | 44 Jahre nach Beginn der Betriebszeit |
| • Modell 4: Auffahrung Ost 2.5 | 45 Jahre nach Beginn der Betriebszeit |
| • Modell 5: Auffahrung Ost 2.1 | 46 Jahre nach Beginn der Betriebszeit |
| • Modell 6: Auffahrung Ost 1.1 | 47 Jahre nach Beginn der Betriebszeit |
| • Modell 7: Versatz Ost 3.4 | 50 Jahre nach Beginn der Betriebszeit |

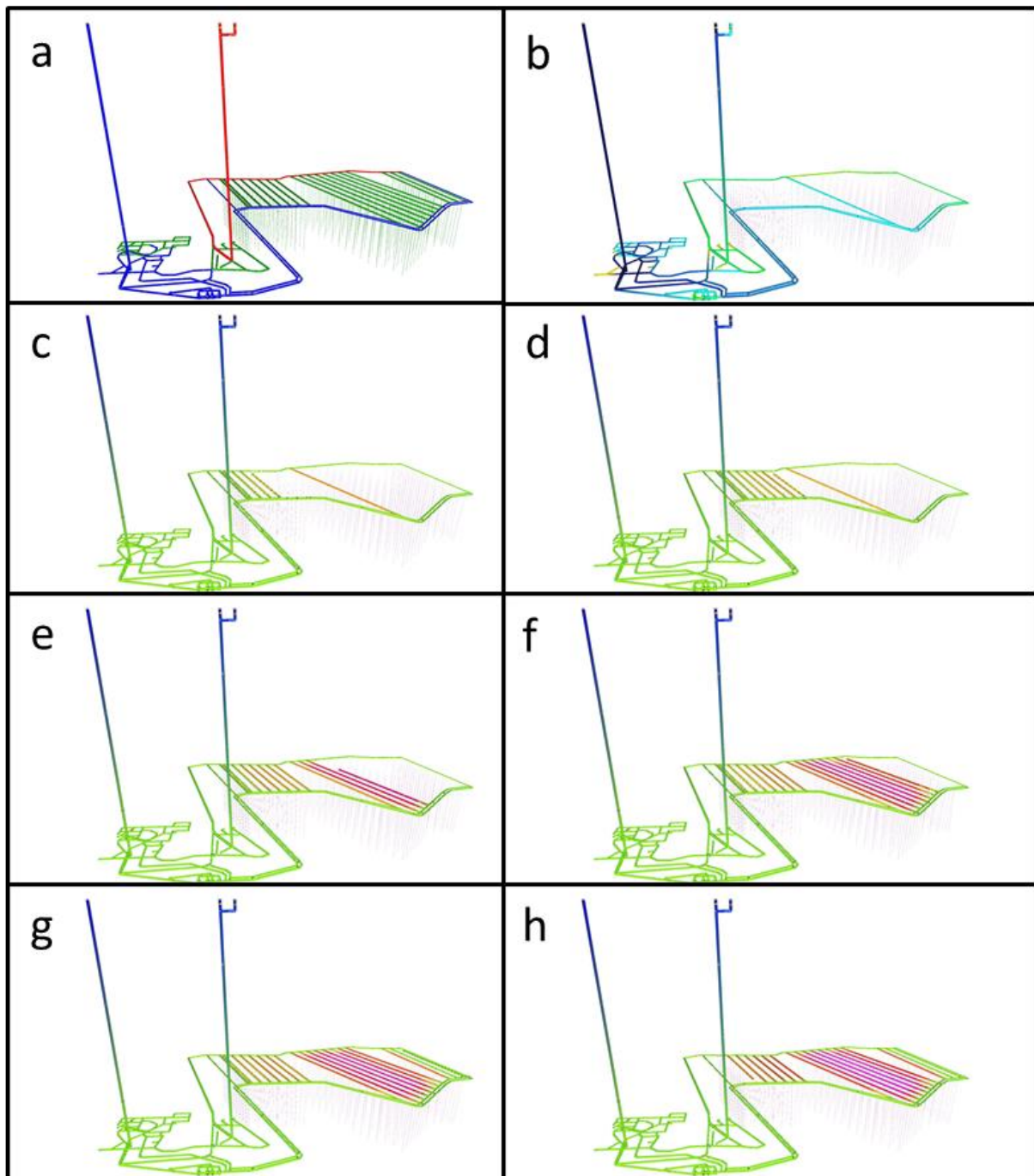


Abbildung 3-15: Modelle zur Bohrlochlagerung, (a) zeigt die Einteilung der Grubenbaue in Frischwetterstrecken (blau), Abwetterstrecken (rot) und Bohrlochüberfahrungsstrecken (grün), (b) bis (h) zeigt die erwartete Temperaturverteilung im Gebirge

Allen Strecken wird eine ursprüngliche Gebirgstemperatur zugeordnet, wie sie zuvor in den thermo-mechanischen Berechnungen ermittelt wurde. Über das Alter der Streckenteile wird die Kühlwirkung der Wetter berücksichtigt. Alle Modelle beinhalten die Betriebspunkte Vortrieb, Erstellung Bohrloch, Gleisbau, Rückholung und Versatz. Die wetter- und klimatechnisch sensibelsten Punkte sind stets die Vortriebe.

An den Vortriebspunkten treffen die hohen Gebirgstemperaturen des erneuten Aufschlusses und die zusätzliche Wärmeleistung der Maschinen auf die begrenzten Möglichkeiten der Sonderbewetterung. Die Rückholbarkeit der Abfälle hängt maßgeblich von der Realisierbarkeit dieser Streckenvortriebe ab. Ziel ist es, über die gesamte Vortriebslänge L nach (KlimaBergV 1983) akzeptable klimatische Bedingungen zu schaffen. Die Endtemperatur der Wetter T_{E2} wird von den verschiedenen Wärmequellen beeinflusst, vgl. Abbildung 3-16. Der Wärmestrom vom Gebirge zu den Wettern ist an den neu aufgefahren Abschnitten (Ortsbrust) am höchsten. Die Einhaltung der Grenzwerte erfordert neben dem Einsatz zusätzlicher Kühltechnik, eine Begrenzung der täglichen Vortriebslänge z und regelmäßige Kühlpausen. Der Vortrieb wird daher auf eine Schicht pro Tag begrenzt. Für alle Leistungsermittlungen wird stets eine nach (KlimaBergV 1983) verkürzte Arbeitszeit von 6,5 h angenommen. Damit ergibt sich für die Vortriebe eine Nettoarbeitszeit von 5 h pro Tag.

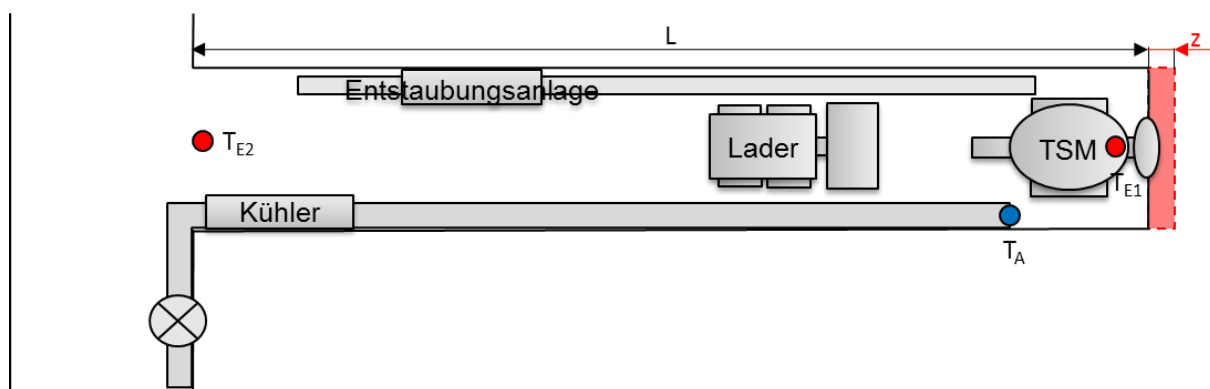


Abbildung 3-16: Schematische Darstellung des Vortriebes

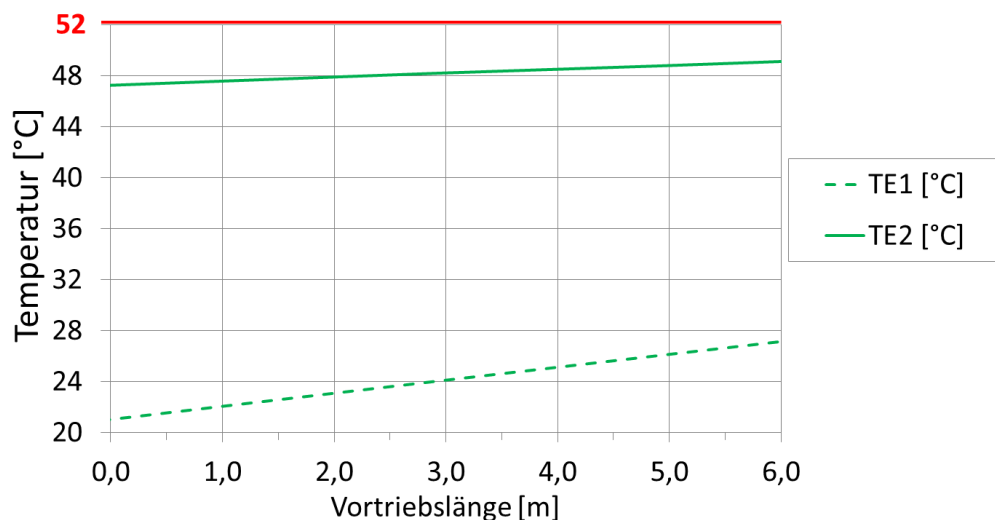


Abbildung 3-17: Temperatur an der TSM (Beobachtungspunkt T_{E1}) und am Streckenende (Beobachtungspunkt T_{E2}) bei Auffahrung der Rückholungsstrecken, Gebirgstemperatur $T_G = 58^\circ\text{C}$

Die eingelagerten wärmeentwickelnden Abfälle und ausgedienten Brennelemente erhöhen den Gesamtwärmeeintrag in das Grubengebäude deutlich. Abbildung 3-18 veranschaulicht

dies beispielhaft am Vergleich des Gesamtwärmeeintrags während des Einlagerungsbetriebes und dem Gesamtwärmeeintrag in Modell 5 (vgl. Abbildung 3-15 f). Im Modell 5 sind die Rückholungstrecken der Felder Ost 3 und Ost 2 weitgehend errichtet. Die eingesetzte Technik ist in beiden Fällen vergleichbar. Der künstliche Wärmeeintrag der Maschinen ist daher gleich groß (absolut). Der Wärmeeintrag aus dem Gebirge ist im Modell 5 aufgrund dessen Aufheizung durch die wärmeentwickelnden Abfälle um 30% größer als er bei der Einlagerung zu erwarten ist.

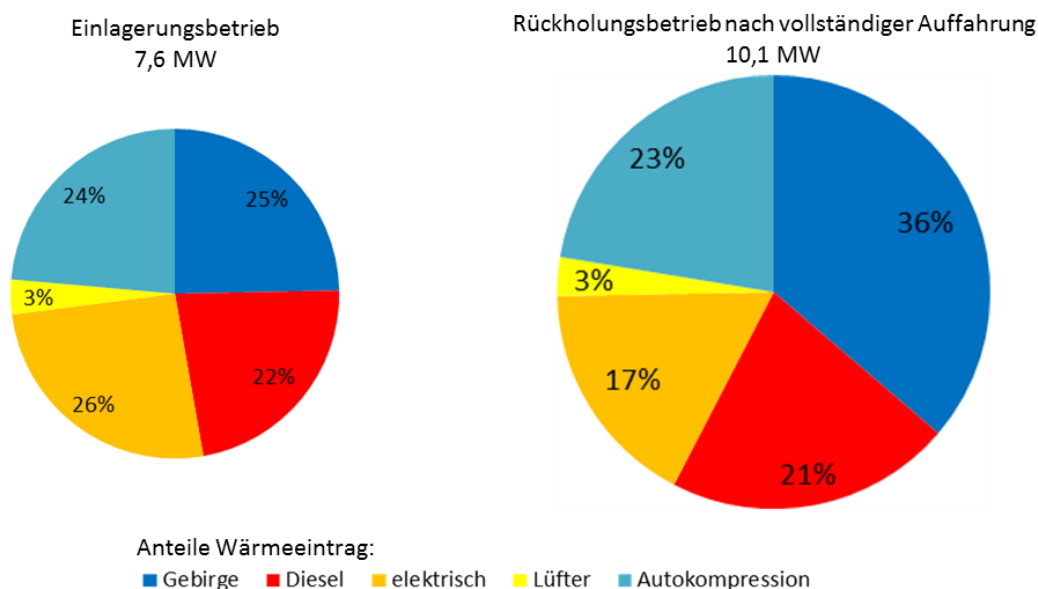


Abbildung 3-18: Vergleich erwarteter Wärmeeinträge während des Einlagerungsbetriebes und der Rückholung (46 Jahre nach Einlagerungsbeginn, Modell 5)

3.6.5 Erkenntnisse aus der Klimavorausberechnung

Die Gebirgstemperatur über dem Einlagerungsbereich steigt im potenziellen Rückholungszeitraum stetig an. Durch eine zügige Auffahrung aller Rückholungstrecken können diese Vortriebstätigkeiten unter vergleichsweise moderaten Gebirgstemperaturen erfolgen. Während der ersten 5 Jahre nach der Einlagerung des letzten Behälters steigen die Temperaturen in den Bohrlochüberfahrungsstrecken nicht über 60°C. Dies entspricht auch im konventionellen Bergbau technisch/wirtschaftlich beherrschbaren Bedingungen.

Aus den Kenndaten der schweren TSM ergibt sich eine Vortriebsleistung von 5,5 m pro Schicht. Die Firstserhöhung an den Bohrlöchern wird gesondert geschnitten. Die erhöhte Gebirgstemperatur machte eine zusätzliche Kühlung aller sonderbewetterten Grubenbaue und besonders der Vortriebe unerlässlich, um die Vorgaben gemäß (KlimaBergV 1983) einhalten zu können. Ungünstig wirkt sich hier auch die Länge der Sonderbewetterung in den Querschlägen von bis zu 700 m aus. Im gesamten Rückholungsbergwerk müssen bis zu 1,3 MW Kühlleistung installiert werden. Die Kühlleistung muss bedarfsgerecht an die einzelnen Betriebspunkte verteilt werden. Die benötigte Kühlleistung kann zentral an einem Punkt über oder unter Tage erzeugt werden. Zur Verteilung der Kühlleistung muss ein entsprechendes

Leitungsnetz errichtet werden. Kühlbedarf kann ebenso in Blindstrecken während des Versatzvorgangs oder in den Einhausungen der Bohrlochkeller entstehen. Die Wärmetauscher der dezentralen Anlagen müssen dann im Hauptwetterstrom aufgestellt werden.

Die durchschlägige Bewetterung führt nach Auffahrung der Strecken zu einer Verzögerung des Temperaturanstieges. Der Anstieg kann aber nur durch die Rückholung ganz gestoppt werden. Zur Begrenzung des Temperaturanstieges wird daher empfohlen, die Bohrlöcher in den wärmsten Teilen des Endlagers als erstes zu räumen. Die höchsten Gebirgstemperaturen treten im Rückholungszeitraum in den Bohrlochüberfahrungsstrecken Ost 2.4 bis Ost 2.6 auf. Im Anschluss können die verbleibenden Strecken des Einlagerungsfeldes Ost 2 zurückgeholt werden. Zur Begrenzung des Temperaturanstiegs kann auch das Einlagerungsfeld Ost 3 in der Reihenfolge der Einlagerung geräumt werden. Eine mögliche angepasste Rückholungsreihenfolge ist:

Ost2.4 → Ost2.5 → Ost2.6 → Ost2.7 → Ost2.8 → Ost2.3 → Ost2.2 → Ost2.1

Ost3.1 → Ost3.2 → Ost3.3 → Ost3.4 → Ost3.5 → Ost3.6 → Ost3.7 → Ost3.8

Ost1.1 → Ost1.2 → Ost1.3

3.7 Verschluss und Umgang mit dem geräumten Endlager

Die Auffahrung aller Hauptstrecken findet vorseilend zur Rückholung statt. Alle Hauptstrecken werden im ÜB errichtet. Es entsteht ein Haufwerksvolumen von 163.000 m³. Mit der Auffahrung der Rückholungsstrecken entstehen weitere 440.000 m³ Haufwerk. Die Bohrlochüberfahrungsstrecken werden entlang der alten Streckenachse errichtet und schneiden somit den früheren KB an. Der Vortrieb dieser Strecken muss somit im KB stattfinden. Der Versatz der Bohrlochüberfahrungsstrecken ist erst nach der Rückholung aller Behälter aus einer Strecke möglich. Große Teile des Haufwerks müssen daher über Tage auf einer Halde gelagert werden. Alle Materialströme die den KB verlassen müssen gemäß §44 StrlSchV auf eine Kontamination/Aktivierung hin geprüft werden. Während der Rückholungstätigkeit entstehen durch den Nachschnitt der Firste über den Bohrlöchern und die Errichtung des Bohrlochkellers weitere 20.000 m³ Haufwerk.

Bei einem Endlager handelt es sich gemäß Anlage 1 Atomgesetz (AtG, 2018) um eine Kernanlage. Das Endlager wird nach § 9 (AtG, 2018) genehmigt. Nach der Rückholung aller in das Endlager eingelagerte radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente ist es vorgesehen, dass Endlager aus dem Atomrecht zu entlassen und es nach Bundesberggesetz (BbergG) zu verwahren. Um das Endlager aus dem Atomrecht entlassen zu können müssen die Anforderungen an eine Freigabe gemäß § 29 StrlSchV (StrlSchV, 2017) erfüllt sein. Das heißt alle Gegenstände aus dem Kontrollbereich müssen freigemessen oder als radioaktiver Abfall separat entsorgt werden. Grubengebäude im Kontrollbereich müssen auf eine Kontamination und eine Aktivierung hin geprüft werden. Dies betrifft auch die im Gebirge verbleibende Verrohrung. Die Verrohrungen der Bohrlöcher kann in Teilen eine Aktivierung erfahren haben oder kontaminiert sein. Eine Kontamination setzt einen Defekt einer oder mehrerer Kokillen voraus. Wird beim Freimessen eine Aktivierung oder Kontamination festgestellt muss die Verrohrung in geeigneter Weise dekontaminiert werden. Nach der vollständigen Freimessung kann die Entscheidung zur Verfüllung und Verschluss gemäß geltender bergbehördlicher Vorgaben, wie (LBEG, 2007) getroffen werden. Dabei ist jedes Bohrloch einzeln zu bewerten.

Gelingt Freigabe gemäß § 29 StrlSchV (StrlSchV, 2017) für einzelne Teile des Grubengebäudes nicht, kann das geräumte Endlager nicht aus dem Atomrecht entlassen werden. Entsprechend des verbleibenden Inventars würde das geräumte Grubengebäude damit weiter als Endlager bzw. kerntechnische Anlage gelten und müsste unter Einbehaltung der geltenden atom- und auch bergrechtlichen Vorgaben verschlossen werden.

4 Zeit- und Kostenschätzung

Der Lebenszyklus eines Endlagers reicht von der Standortauswahl über die Genehmigungsphase, Errichtung, den Betrieb, den Verschluss und die Nachverschlussphase. In Summe dauern diese Projektphasen typischerweise mehrere Jahrzehnte. Die Abschätzung zeitlicher Abläufe und Kosten für den gesamten Lebenszyklus ist aufgrund der langen Zeiträume mit erheblichen Ungewissheiten verbunden. Ein Deutsches Endlager für insbesondere wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente steht nach dem Neustart der Endlagersuche am Anfang dieses Lebenszyklus, vgl. Abbildung 4-1.

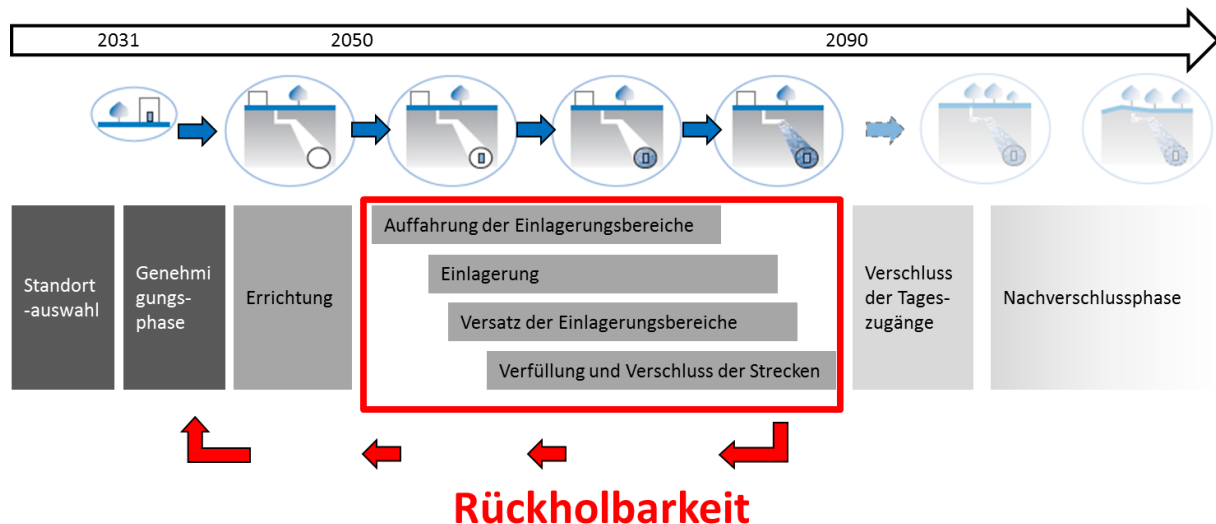


Abbildung 4-1: Lebenszyklus eines Endlagers und möglicher Rückholungszeitraum

Für Überlegungen zur technischen Umsetzung der Rückholbarkeit gelten die genannten Unsicherheiten besonders, da die Rückholung ein von der Normalentwicklung abweichendes Szenario darstellt. Der Zeitraum in dem entsprechend den geltenden Sicherheitsanforderungen eine Rückholbarkeit zu gewährleisten ist, liegt mehrere Jahrzehnte in der Zukunft und umfasst außerdem eine Zeitspanne von mehreren Jahrzehnten. Basierend auf dem prognostizierten Abfallmengengerüst und den bekannten Endlagerkonzepten wird eine Betriebszeit von mind. 40 Jahren erwartet. Während dieser Zeit ist eine Rückholbarkeit zu gewährleisten. Der genaue Zeitpunkt und die Gründe die zur Entscheidung einer Rückholung führen, sind heute aber unbekannt. Daraus ergeben sich, wie bereits im Abschnitt 2 erläutert, erhebliche Unsicherheiten zu den anzutreffenden Randbedingungen.

Entsprechend der Empfehlungen der IAEA (IAEA, 2017) sollte eine Zeit- und Kostenschätzung mit Hilfe von Analogien zu weiterentwickelten Endlagerprojekten erstellt werden. Gegenüber einer Abschätzung von Zeit- und Kostenaufwand über die Beurteilung von Einzelprozessen und beispielsweise mit im Bergbau und der Bauwirtschaft üblichen Schätzfaktoren scheint eine Schätzung über Analogien geeigneter um die mit der Endlaegrung verbundenen Unsicherheiten zu berücksichtigen. Als beispiel für ein solches Vorgehen kann aus (DBE TEC, 2017) verwiesen werden. Dort wurde für neuentwickelte Endlagerkonzepte im Kristallin

das weit fortgeschrittene und gut dokumentierte Endlagerprojekt Schwedens als Analogie genutzt.

Die Rückholbarkeit ist in den Sicherheitsanforderungen des BMU (BMU, 2010) als Auslegungsanforderung festgelegt. Im internationalen Vergleich wird Rückholbarkeit teils deutlich anders definiert als im deutschen Regelwerk. Dementsprechend existieren in den verschiedenen Endlagerprojekten unterschiedliche Vorgaben wie eine Rückholbarkeit zu berücksichtigen ist. Beispiele für die unterschiedlichen Ansätze zur Rückholbarkeit sind in (DBE TEC, 2014) beschrieben. Gegenwärtig sind in keinem der weiterentwickelten Endlagerprojekte vergleichbare Planungsansätze zur Rückholung zu finden, die eine Zeit- und Kostenschätzung über einen Analogieschluss vereinfachen würden. Die in (BMU, 2010) definierte Begrifflichkeiten Rückholbarkeit ist am ehesten mit den Schweizer Vorgaben einer "Rückholung ohne großen Aufwand" vergleichbar. Nach (ENSI, 2009) muss *"bis zu einem allfälligen Verschluss des Lagers [...] die Rückholung der radioaktiven Abfälle ohne grossen Aufwand möglich sein (Art. 37 KEG)." Diese Anforderung ist nach (ENSI, 2009) durch eine mechanische Beständigkeit der Lagercontainer sicherzustellen. Weitere "Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Rückholung getroffen werden, dürfen die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen. Das Konzept für eine allfällige Rückholung der Abfälle ist mit dem Baubewilligungsgesuch für das geologische Tiefenlager dem ENSI zur Prüfung und Genehmigung vorzulegen."* (ENSI, 2009) Der Nachweis einer technischen Machbarkeit ist nicht zu erbringen. Im Entsorgungsnachweis (NAGRA, 2002) ist dazu ein Grobkonzept für die Freilegung und Entnahme der bereits eingelagerten und versetzten Behälter beschrieben. Bereits verfüllte Strecken bzw. Zugangsstollen sollen mit vorhandener Technik wieder errichtet und gesichert werden. Vertiefende Arbeiten zur technischen Umsetzung wurden bisher nicht durchgeführt. Es existieren bisher keine Untersuchungen die einen Analogieschluss zur Zeit- und Kostenschätzung zulassen.

Generell bleibt festzuhalten, dass im deutschen Regelwerk durch die Festlegung der Rückholbarkeit als Auslegungsanforderung diese auch feste Genehmigungsvoraussetzung wird. Der Nachweis der technischen Machbarkeit einer Rückholung während der Betriebszeit ist für diese Genehmigung zu erbringen. Dies ist letztlich auch die Motivation für das vorliegende Vorhaben. Vergleichbare Vorschriften sind in anderen internationalen Endlagerprojekten nicht zu finden. Eine Zeit- und Kostenschätzung der Rückholung mit Hilfe von Analogieschlüssen ist daher nicht oder nur begrenzt möglich.

Für die Zeit- und Kostenschätzung einer potenziellen Rückholung von POLLUX®-Behälter im Konzept der horizontalen Streckenlagerung wird ein zweigeteilter Ansatz verfolgt. Auf Grund der Einzigartigkeit der Rückholungsforderung erfolgt die Zeitermittlung für die Rückholung über eine Abschätzung der notwendigen Teilprozesse, wie sie in den vorangegangenen Abschnitten erarbeitet wurden. Die bereits genannten Unwägbarkeiten finden durch entsprechende Annahmen Berücksichtigung. Aufbauend auf dieser Zeitschätzung soll der Aufwand für den Betrieb des Rückholungsbergwerkes an Hand bestehender Planungen anderer Endlagerprojekte erfolgen. Im Fokus stehen dabei vor allem der Betrieb der Tagesanlagen.

4.1 Zeitschätzung

Die Rückholbarkeit der Behälter ist während der gesamten Betriebsphase, bis zum Verschluss der Schächte zu gewährleisten. Der Start der Rückholungsphase aus dem Endlager ist frühestens mit der Einlagerung des ersten Behälters möglich. Zum letztmöglichen Zeitpunkt sind dagegen alle Behälter eingelagert, versetzt und die Zugangstrecken verfüllt und verschlossen. Zwischen beiden Szenarien liegen ca. 40 Jahre Betriebszeit mit stetig wechselndem Einlagerungsfortschritt. Im Rahmen der Zeitschätzung soll eine Rückholung zum spätestmöglichen Zeitpunkt berücksichtigt werden. Weiterhin wird angenommen, dass der Rückholungsablauf allein durch die untertägigen Arbeiten bestimmt wird. Alle dafür benötigten Planungen, Genehmigungen, Einrichtungen und Ausrüstungen stehen zur Verfügung. Die Rückholung wird nach dem in Abschnitt 3 beschriebenen Konzept durchgeführt.

Alle durchgeführten Untersuchungen zur Rückholbarkeit der eingelagerten ausgedienten Brennelemente und wärmentwickelnden radioaktiven Abfälle liegt die Annahme einer spätestmöglichen Rückholung und die Anwendung der Re-Mining-Strategie zugrunde. Die Rückholung als aktive Maßnahme der Behälterentnahme bildet den Hauptprozess der Rückholungstätigkeit. Dieser ist in verschiedene vorbereitende und unterstützende Tätigkeiten eingebettet. Für eine vorläufige Zeit- und Kostenschätzung der Rückholung müssen folgende Haupt- und Nebenprozesse berücksichtigt werden:

- Neuauffahrung
 - Auffahrung Richtstrecke Nord
 - Auffahrung Doppelstrecke Süd
 - Auffahrung Bohrlochüberfahrungsstrecken
 - Gleisbau
- Errichtung Zugang zum Einlagerungsort
 - Erkundung
 - Aufweitung Firste
 - Errichtung Bohrlochkeller
 - Gleisbau
 - Auf- und Abbau Einhausung
 - Auf- und Abbau Bohrlochscheule
- Rückholung
 - Versatzentnahme
 - Rückholung
 - Transport
- Versatz
- Verschluss

Zwischen den verschiedenen Prozessen existieren Abhängigkeiten. Eine Parallelisierung der Tätigkeiten ist nicht immer möglich.

Die Auffahrung der Richtstrecken soll möglichst zügig umgesetzt werden. Die Auffahrung aller drei Hauptstrecken kann mit leistungsstarker Vortriebstechnik an zwei Betriebspunkten und einem Mehrschichtsystem innerhalb eines Jahres erfolgen. Die Vortriebstechnik ist auch

für die Auffahrung der Rückholungstrecken einsetzbar. Insgesamt werden 4,5 km Hauptstrecken und 10,4 km Rückholungstrecken benötigt. Unter Berücksichtigung der Vortriebsleistung sowie notwendiger Umbau- und Wartungszeiten wird die Auffahrung dieser Grubenteile fast ca. 9 Jahre dauern. Die genaue Auffahrungsreihenfolge kann nach unterschiedlichen Gesichtspunkten festgelegt werden, vgl. dazu auch Abschnitt 3.6.5. Die Aufweitung der Firs- te erfolgt stets bedarfsweise und ist Teil der Instandhaltungsmaßnahmen (Beraubetätigkeit, Sohlschnitt, Nachschnitt).

Sobald die ersten Rückholungstrecken errichtet sind, können parallel dazu die Erkundung der exakten Bohrlochlage und die Vorbereitung der eigentlichen Rückholungstätigkeit erfolgen. Zu dieser Vorbereitung soll auch die Einhausung des Bereiches um das jeweilige Bohrloch dienen. Die aktive Rückholung der BSK kann nach der Errichtung aller benötigten Komponenten (Bohrlochkeller und Bohrlochsleuse) erfolgen.

Die vorläufige Zeitschätzung unterliegt der Annahme, dass alle Tätigkeiten außer der Auffahrung der Hauptstrecken im Einschichtbetrieb durchgeführt werden. Es wird zunächst nur ein Betriebspunkt je Teilprozess berücksichtigt. Unter dieser Annahme wurde der Einbau der Bohrlochsleuse inkl. Auf- und Abbau der Einhausung als zeitaufwendigster Teilprozess identifiziert. Die Umsetzung dieser Tätigkeiten an allen Bohrlöchern dauert in Summe 27,5 Jahre. Die Errichtung aller Bohrkeller (1 Jahr) und auch der Gleisbau in den Rückholungstrecken (ca. 4 Jahre) kann in Abhängigkeit des Rückholungsfortschrittes umgesetzt werden. Die Versatzentnahme und die Rückholung der BSK dauern ca. 25 Jahre. Alle Teilprozesse der Herrichtung der Bohrlochkeller und der eigentlichen Rückholungstätigkeit können parallel an verschiedenen Betriebspunkten umgesetzt werden. Auch der Versatz der bereits geräumten Bohrlöcher und Strecken kann parallel zur Rückholung erfolgen. Ohne Berücksichtigung einer Planungs- und Genehmigungsphase sowie einem möglichen Verschluss des Rückholungsbergwerkes wird so für die Umsetzung der Rückholung ein Zeitraum von mindestens 32 Jahren erwartet. Abbildung 4-2 fasst die zeitlichen Abläufe schematisch zusammen.

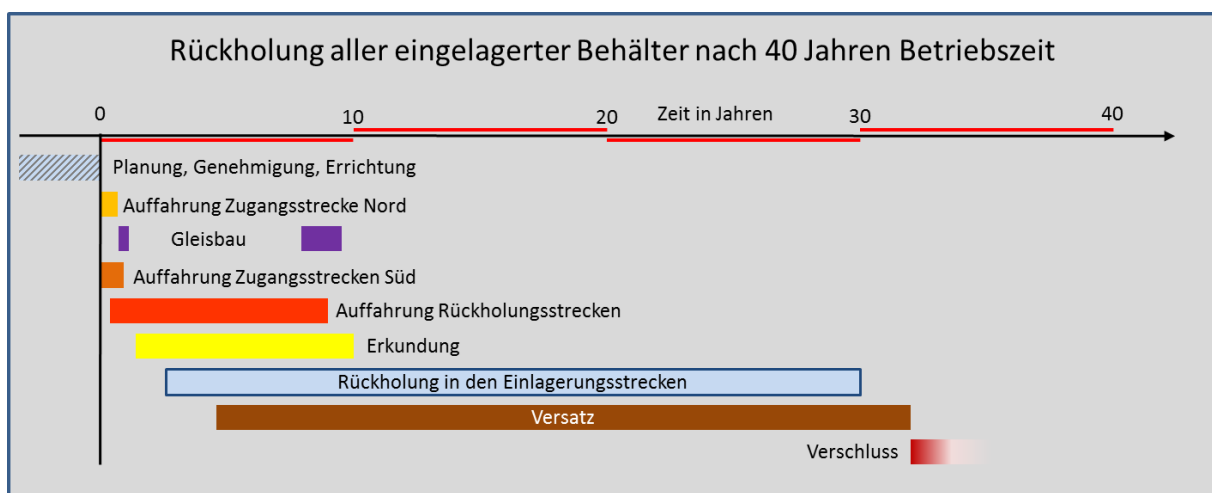


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung des zeitlichen Ablaufs der Rückholung

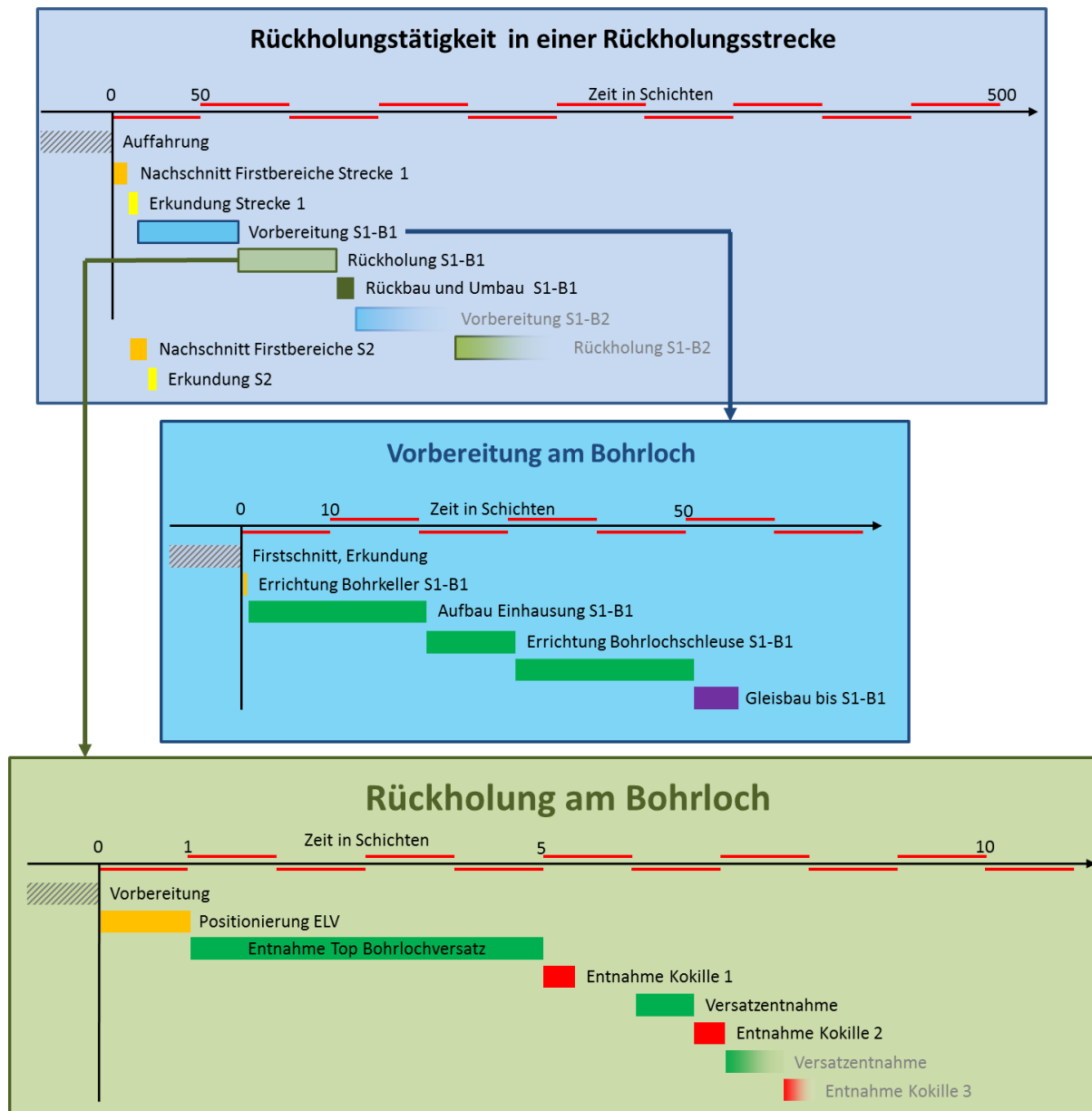


Abbildung 4-3: Schematische Darstellung der Abläufe innerhalb einer Bohrlochüberfahrungsstrecke und am Bohrloch während der Rückholung, S1-B1 = Strecke 1 – Bohrloch 1, S1-B2 = Strecke 1 – Bohrloch 2

4.2 Kosten

Aus der Beschreibung der Betriebsabläufe und der damit verbundenen Abschätzung der Rückholdauer wird deutlich, dass eine Rückholung mit einem erheblichen materiellen, personellen und zeitlichen Aufwand verbunden ist. Nachfolgend wird auf Basis der bisherigen Planung eine erste Schätzung der erwarteten Kosten für die Rückholung durchgeführt. Diese Schätzung unterliegt folgenden grundlegenden Annahmen:

- Die Kostenschätzung umfasst alle Rückholungstätigkeiten und die direkt damit verbundenen Anlagen.
- Alle Tagesanlagen stehen auch während der Rückholung zur Verfügung und können vollständig genutzt werden. Dies schließt auch die Nutzung des Eingangslagers als Rückholungslager ein.
- Eine wesentliche Ergänzung der Tagesanlagen stellt die Errichtung der Kühlanlage dar. Die Anschaffung der nötigen Anlagen und deren Betrieb fließt in die Kostenschätzung ein. Darüber hinaus beschränkt sich die Kostenschätzung auf die reinen Betriebskosten des Endlagers während der Rückholung.
- Das Ende der Rückholung wird durch den Eingang der Behälter in das Lager markiert. Nachfolgende Aufwendungen für Konditionierung, Transport etc. werden nicht berücksichtigt.
- Die Kosten für den übertägigen Betrieb sowie auch die Verwaltung werden unter der Position "Unterhaltung/Betrieb allgemein" zusammengefasst.
- Die Rückholbarkeit ist Genehmigungsvoraussetzung und als solche im Planfeststellungsbeschluss enthalten. Für die Rückholung selbst wird eine gesonderte Genehmigung inkl. Inbetriebnahmeerlaubnis des Rückholungsbetriebes mit entsprechender Genehmigungsplanung notwendig. Darauf aufbauend muss eine Ausführungsplanung erstellt werden. Diese Kosten sind in der Kostenschätzung nicht enthalten.
- Kosten für den Verschluss werden nicht der Rückholung zugeordnet, da dieser auch für ein Endlager in der "normalen Entwicklung" nötig wäre.
- Die Schätzung erfolgt auf der Basis heute üblicher Preise und Kennzahlen.

Die Kosten während der Betriebsdauer der Rückholung sind:

- Kosten für die Auffahrung der südlichen Doppelstrecke
- Kosten für die Auffahrung der nördlichen Richtstrecke
- Kosten für die Auffahrung der Rückholdungsstrecken
- Kosten für den Gleisbau
- Kosten für die Erkundung
- Kosten für die Herrichtung der Bohrlöcher
- Kosten für die eigentliche Rückholung
- Kosten für den Versatz
- Kosten für die Kühlung/Bewetterung
- Kosten für Unterhaltung und den Betrieb der gesamten Anlage

Die Kostenschätzung basiert auf den geplanten Betriebsabläufen. Für die einzelnen Teilprozesse werden folgende Kosten berücksichtigt:

- Anschaffungskosten
- Betriebskosten
- Wartungskosten
- Personalkosten

Kosten für den Betrieb der Tagesanlagen und des Rückholungsbergwerkes allgemein werden auf Basis der Kostenschätzung für das schwedische Endlager ermittelt (SKB, 2017). Für Betrieb, Wartung und Reinvestitionen werden dort Kosten von insgesamt 7.400 Mio. SEK über eine 40-jährige Betriebszeit erwartet. Nach dem in (DBE TEC, 2017) angewendeten Schema zur Umrechnung auf das deutsche Abfallmengengerüst entspricht dies Gesamtkosten von ca. 1.676 Mio. € oder aber 41,9 Mio. € pro Jahr.

Tabelle 4-1: Kostenschätzung zur Rückholung der Bohrlochlagerung

Position	Kosten	Einheit
Auffahrung Doppelstrecke (Süd)	3.200.000	€
Gleisbau	19.200.000	€
Auffahrung Richtstrecke Nord	2.100.000	€
Auffahrung Rückholungsstrecken	23.200.000	€
Entnahme der Behälter	114.300.000	€
Versatz	4.500.000	€
Erkundung	2.900.000	
Kühlung/Bewetterung	147.200.000	€
Zwischensumme	322.200.000	€
Erwartete Betriebsdauer	32	a
Unterhaltung/Betrieb allgemein	41.900.000	€/a
jährliche Kosten	52.000.000	€/a

Ohne die Berücksichtigung einer Preissteigerung ergeben sich aus den erwarteten jährlichen Kosten von ca. 52,0 Mio. € insgesamt 1,66 Mrd. € über die gesamte geplante Rückholdungsdauer.

5 Zusammenfassung

Das Rückholungskonzept der vertikalen Bohrlochlagerung von BSK wurde durch eine vertiefende Planung weiterentwickelt. Dies umfasst die Beschreibung der Betriebsabläufe im Endlager, eine Konkretisierung der benötigten Technik, eine Neuentwicklung der Versatzentnahmetechnik aus den verrohrten Bohrlöchern, eine Klimavorausberechnung zur Vorhersage der zu erwartenden Bedingungen im Grubengebäude und eine erste Schätzung der zu erwartenden Dauern und Kosten für die Rückholung.

Entsprechend der zugrundeliegenden allgemeinen Rückholungsstrategie ist für die Rückholung der eingelagerten Behälter eine Neuauffahrung des Grubengebäudes nötig. Für die Auffahrung der Haupt- und Bohrlochüberfahrungsstrecken wurden geeignete technische Konzepte beschrieben und zu beachtende Aspekte besonders mit Blick auf den betrieblichen Strahlenschutz hervorgehoben. Für zusätzlich nötige Arbeitsprozesse, wie eine Erkundung der Bohrlochlage oder die Errichtung der Bohrlochkeller wurden ebenso technische Konzepte beschrieben.

Das eigentliche Rückholungskonzept zur Entnahme der Behälter basiert im Wesentlichen auf einer Umkehrung des Einlagerungsvorganges. Aus den Randbedingungen während der Rückholung erwachsen Anforderungen an die Rückholungstechnik. Zur Ertüchtigung des bestehenden Prototyps der Einlagerungsvorrichtung für die Rückholung wurden notwendige technische Änderungen benannt. Die Entnahme des Versatzes im Einlagerungsbohrloch stellt die wesentliche technische Herausforderung während der Rückholung dar. Im Rahmen einer ersten Machbarkeitsstudie wurde ein technisches Konzept zur Umsetzung der Versatzentnahme erarbeitet. Mit Hilfe einer speziellen Saugkokille kann der Sandversatz abschnittsweise aus dem Bohrloch entfernt werden.

Mit der Analyse der Temperaturentwicklung nach der Einlagerung und einer Klimavorausberechnung konnten die Bedingungen im Grubengebäude während der Rückholung ermittelt werden. Der große räumliche Abstand zwischen den eingelagerten BSK und dem Grubengebäude aufgrund der Bohrlochlagerung führt zu einem zeitlich verzögerten aber stetigen Temperaturanstieg in den Bohrlochüberfahrungsstrecken. Die zugrundeliegende Auslegungstemperatur von 200°C wird im Nahbereich der Bohrlöcher erreicht. Innerhalb des Grubengebäudes, mit mehreren Metern vertikalen Abstand zu den Behältern sind deutlich geringere Umgebungstemperaturen zu erwarten. Die Bedingungen im Grubengebäude sind mit Hilfe zusätzlicher technischer Kühlmaßnahmen beherrschbar, erfordern aber die Errichtung einer entsprechenden Infrastruktur zur Kühlung der Vortriebsstrecken. Eine weitere Optimierung der Umgebungsbedingungen während der Rückholung ist durch ein angepasstes Auffahrungsschema und Kühlpausen möglich.

Das beschriebene Rückholungskonzept scheint für die Entnahme aller eingelagerten Behälter aus dem Endlager geeignet. Der vollständige technische Nachweis der Machbarkeit steht noch aus.

Quellenverzeichnis

- (AtG, 2018) Atomgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 10. Juli 2018 (BGBl. I S. 1122) geändert worden ist
- (BAST, 2016) Bundesanstalt für Straßenwesen: Merkblatt Georadar, http://www.bast.de/DE/Strassenbau/Technik/Georadar.pdf?__blob=publicationFile&v=5, gelesen am 04.02.2016
- (BMU, 2010) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Berlin, 2010
- (BMU, 2015) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm), August 2015
- (DBE TEC, 2010) DBE TECHNOLOGY GmbH: Optimization of the Direct Disposal Concept by Emplacing SF Canisters in Boreholes (ES-DRED/DENKMAL) - Final Report, Peine, 2010
- (DBE TEC, 2014) DBE TECHNOLOGY GmbH: Auswirkungen der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte, Abschlussbericht, Peine, 2014
- (DBE TEC, 2017) DBE TECHNOLOGY GmbH: Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland, Abschlussbericht, Peine, 2017
- (ENSI, 2009) Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis ENSI-G03, 2009
- (ESK, 2011) Entsorgungskommission (ESK): Rückholung / Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle aus einem Endlager – ein Diskussionspapier, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, 2011
- (ESK, 2015) Entsorgungskommission: Leitlinie zum sicheren Betrieb eines Endlagers für insbesondere Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle, 10.12.2015

- (GRS, 1997) Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
„Realistische Abschätzung der Strahlenschädigung von Steinsalz bei Einlagerung von HAW in Bohrlöchern“, GRS – 142, Juni 1997
- (GRS, 2011a) Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS): Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Arbeitspaket 5 - Abschlussbericht, GRS-Bericht GRS-272, Köln, 2011
- (GRS, 2011b) Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS): Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Arbeitspaket 3 – Abfallspezifikation und Mengengerüst - Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung, GRS-Bericht GRS-278, Köln, 2011
- (GRS, 2012a) Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS): Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Arbeitspaket 6 - Abschlussbericht, GRS-Bericht GRS-281, Köln, 2012
- (GRS, 2012b) Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS): Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Arbeitspaket 9.2 - Integrität geotechnischer Barrieren, Teil 1 Vorbemessung, GRS-Bericht GRS-287, Köln, 2012
- (IAEA, 2009) International Atomic Energy Agency (IAEA): Geological Disposal of Radioactive Waste: Technological Implications for Retrievability NW-T-1.19, Wien, 2009
- (IAEA, 2017) International Atomic Energy Agency (IAEA): TecDoc Entwurf "Costing methods and funding schemes for radioactive waste disposal programmes", Vienna 2017 (noch nicht veröffentlicht)
- KlimabergV Klima-Bergverordnung vom 9. Juni 1983 (BGBl. I S. 685)
- (Krieger, 2009) H. Krieger: Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes, 3. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009
- (LBEG, 2007) Landesbergamt für Bergbau, Energie und Geologie : Leitfaden des Landesbergamtes für Bergbau, Energie und Geologie des Landes Niedersachsen für das Verwahren von Tagesschächten, Stand: 19.12.2007
- (Nagra, 2002) Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, Technischer Bericht 02-02, Wettingen, 2002

- | | |
|-----------------------|---|
| (NEA, 2011) | Nuclear Energy Agency (NEA): Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel - Final Report, Paris, 2011 |
| (Renger, 2015) | Machbarkeitsstudie RSP, unveröffentlicht |
| (RSK, 2006) | Reaktor-Sicherheitskommission, Stellungnahme, Strahlenschäden im Steinsalz, 09.03.2006, 391. Sitzung |
| (StandAG, 2017) | Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist |
| (SKB, 2017) | SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB: Costs from and including 2018 for the radioactive residual products from nuclear power, Basis for fees and guarantees for the period 2018–2020, TR-17-02, Stockholm, 2017 |
| (StrlSchV, 2017) | Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), die zuletzt durch nach Maßgabe des Artikel 10 durch Artikel 6 des Gesetzes vom 27. Januar 2017 (BGBl. I S. 114, 1222) geändert worden ist |
| (Vogt & Schulz, 2011) | H.-G. Vogt; H. Schultz: Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes. 6. Auflage. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2011 |

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Einordnung der Begriffsdefinitionen Rückholbarkeit und Bergung gemäß (BMU, 2010) in typische Entwicklungsstufen eines Endlagers gemäß dem internationalen Verständnis zur Reversibilität, nach (NEA, 2011)	5
Abbildung 2-2:	BSK nach (GRS, 2012a)	10
Abbildung 2-3:	Mit dem Transferbehälter beladener Plateauwagen (GRS, 2011a)	10
Abbildung 2-4:	Links: Profil der Beschickungsstrecke, rechts: Profil des Einlagerungsortes, Angaben in mm (DBE TEC, 2014)	11
Abbildung 2-5:	Grubengebäude und Einlagerungsfelder für die Bohrlochlagerung gemäß (GRS, 2012a)	12
Abbildung 2-6:	Einlagerungsvorrichtung (ELV) für Brennstabkokillen und Triple-Packs in der Demonstrationsanlage zur Erprobung der Einlagerungstechnik (GRS, 2011a)	13
Abbildung 2-7:	Einstellen des Transferbehälters auf die Bohrlochsleuse (GRS, 2011a)	14
Abbildung 2-8:	Zeitlicher Verlauf der Temperatur entlang der Umfahrung und im Infrastrukturbereich (GRS, 2012a)	15
Abbildung 2-9:	Schematische Darstellung des verrohrten und beladenen Bohrloches nach (GRS, 2012a)	16
Abbildung 3-1:	Schematische Darstellung der Auffahrung der Haupt- und Rückholungsstrecken mit möglichen Betriebspunkten (gelbe Punkte), sowie Kontroll- (roter Bereich) und Überwachungsbereich (grün)	18
Abbildung 3-2:	Grubengebäude während des möglichen Rückholungsbetriebes	20
Abbildung 3-3:	Beispiel eines Messfahrzeugs (links), Messprinzip einer Radarmessung zur zerstörungsfreien Fahrbahnuntersuchung (BAST, 2016)	22
Abbildung 3-4:	Querschnitt am Bohrloch und Bereich der Einhausung (rot)	22
Abbildung 3-5:	Schnittbild Saugvorrichtung im Bohrloch (Renger, 2015)	26
Abbildung 3-6:	Schnitt durch Hüllrohr mit Förderrohr (blau) in geschlossener Stellung, zu sehen in der Position über dem Kopf des Endlagerbehälters zum Ende des Saugvorgangs vor der Behälterbergung (Renger, 2015)	27
Abbildung 3-7:	Zerfallsschema von ^{40}K (links), ^{137}Cs (mitte) und ^{60}Co (rechts) (Krieger, 2009)	28
Abbildung 3-8:	Halbwertsdicke für Eisen, nach (Krieger, 2009)	29
Abbildung 3-9:	Bewetterungsschema während der Rückholung	40
Abbildung 3-10:	Temperaturentwicklung an ausgewählten Punkten im schachtnächsten Einlagerungsfeld Ost 3 während der Betriebszeit des Endlagers	42
Abbildung 3-11:	Temperaturverlauf längs der Bohrlochüberfahrungsstrecken des Feldes Ost 2 zu Beginn der Rückholung (43 a nach Einlagerungsbeginn)	42

Abbildung 3-12: Temperaturentwicklung in den wärmsten Bereichen (Streckenmitte) der Bohrlochüberfahrungsstrecken in Ost 2 und 3 während der Rückholungsphase	43
Abbildung 3-13: Temperaturentwicklung entlang der Einlagerungsstrecke Ost 2.5 (Mitte des größten Einlagerungsfeldes)	44
Abbildung 3-14: Temperaturentwicklung nach der Rückholung ohne Wettereinwirkung (Punkte identisch zu Abbildung 2-9)	45
Abbildung 3-15: Modelle zur Bohrlochlagerung, (a) zeigt die Einteilung der Grubenbaue in Frischwetterstrecken (blau), Abwetterstrecken (rot) und Bohrlochüberfahrungsstrecken (grün), (b) bis (h) zeigt die erwartete Temperaturverteilung im Gebirge	47
Abbildung 3-16: Schematische Darstellung des Vortriebes	48
Abbildung 3-17: Temperatur an der TSM (Beobachtungspunkt T_{E1}) und am Streckenende (Beobachtungspunkt T_{E2}) bei Auffahrung der Rückholungsstrecken, Gebirgstempertur $T_G = 58^\circ\text{C}$	48
Abbildung 3-18: Vergleich erwarteter Wärmeeinträge während des Einlagerungsbetriebes und der Rückholung (46 Jahre nach Einlagerungsbeginn, Modell 5)	49
Abbildung 4-1: Lebenszyklus eines Endlagers und möglicher Rückholungszeitraum	52
Abbildung 4-2: Schematische Darstellung des zeitlichen Ablaufs der Rückholung	55
Abbildung 4-3: Schematische Darstellung der Abläufe innerhalb einer Bohrlochüberfahrungsstrecke und am Bohrloch während der Rückholung, S1-B1 = Strecke 1 – Bohrloch 1, S1-B2 = Strecke 1 – Bohrloch 2	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Arbeitsprozesse und Arbeitsgeräte im Rückholungsbetrieb	32
Tabelle 4-2:	Wetterbedarf der verschiebenen Betriebspunkte	41
Tabelle 5-1:	Kostenschätzung zur Rückholung der Bohrlochlagerung	58

BGE TECHNOLOGY GmbH

Eschenstraße 55

31224 Peine – Germany

T + 49 5171 43-1520

F + 49 5171 43-1506

info@bge-technology.de

www.bge-technology.de