

## **KOREKT**

**Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von  
Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven  
Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus einem  
HAW-Endlager in Kristallingestein**

**BGE TEC 2020-28**



## **KOREKT**

# **Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus einem HAW-Endlager in Kristallingestein**

**BGE TEC 2020-28**

Autoren	Philipp Herold Andreas Keller Juliane Leonhard Paola León Vargas Niklas Bertrams
Datum	23.07.2021
Auftraggeber	Projektträger Karlsruhe (KIT) im Auftrag des BMWi
Förderkennzeichen	02E11728

Dieser Bericht wurde erstellt im Rahmen des FuE-Projektes  
*"Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus einem HAW-Endlager in Kristallingestein (KOREKT)"*

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 in Zusammenarbeit mit BGR und GRS durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.



## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	3
2	Generelle Rückholungsstrategie.....	5
3	Selektive Rückholung .....	9
4	Rückholungskonzept für das Endlagersystem überlagernder einschlusswirksamer Gebirgsbereich (üewG) .....	13
4.1	Übersicht zum Endlager- und Einlagerungskonzept .....	13
4.2	Grundkonzept der Rückholung/Selektive Rückholung .....	21
4.3	Technische Umsetzung der Rückholung für POLLUX®- und CASTOR®- Behälter.....	26
4.3.1	Aufnahme von Behältern und Transport zum Schacht.....	27
4.3.2	Freilegen von Behältern .....	28
4.3.3	Rückbau des Widerlagers einer ELS.....	38
4.3.4	Aufwältigung von Querschlägen.....	39
4.3.5	Rückbau des Widerlagers eines Querschlages .....	41
4.3.6	Aufwältigung von Richtstrecken .....	41
4.4	Technische Umsetzung der Rückholung für MOSAIK®-Behälter.....	43
4.4.1	Aufnahme von Behältern und Transport zum Schacht.....	44
4.4.2	Freilegen von Behältern .....	45
4.5	Zeitschätzung der Rückholung .....	49
4.5.1	Teilprozesse in der POLLUX®-ELS .....	50
4.5.2	Teilprozesse in den MOSAIK®-ELS.....	51
4.5.3	Teilprozesse im Querschlag .....	52
4.5.4	Teilprozesse in den Richtstrecken.....	53
4.5.5	Zeitschätzung zur Rückholung aller Behälter .....	54
5	Rückholungskonzept für das Endlagersystem multiple einschlusswirksame Gebirgsbereiche .....	57
5.1	Übersicht zum Endlager- und Einlagerungskonzept .....	57
5.2	Selektive Rückholung im Konzept multipler ewG.....	63
5.3	Entnahme des Behälters .....	66
5.3.1	Analytische Untersuchung des Ziehens der Kokille .....	67
5.3.2	Numerische Untersuchung des Ziehens der Kokille .....	70
5.4	Entnahme des Sandversatzes.....	74
5.5	Freilegen des Bohrloches – Rückbau des Widerlagers und des Dichtelementes.....	78
5.6	Bohrloch für Entnahme vorbereiten .....	79
5.7	Wiederauffahrung für eine Rückholung.....	80
5.8	Einteilung in Strahlenschutzbereiche .....	82
5.9	Konturbehandlung/Umgang mit Ausbau .....	83
5.10	Wettertechnik und Klimavorausbetrachtung.....	84
5.10.1	Wetterführung im Normalbetrieb bzw. Einlagerungsbetrieb.....	84
5.10.2	Klimavorausberechnung für eine Bohrlochüberfahrungsstrecke.....	85

---

5.10.3	Bewetterungs- und Kühlkonzept in einem Einlagerungsfeld .....	91
6	Rückholungskonzept für das modifizierte KBS-3 Konzept .....	95
6.1	Übersicht zum Endlager- und Einlagerungskonzept .....	95
6.2	Rückholungskonzepte im skandinavischen Grundkonzept .....	97
6.2.1	Schweden (SKB) .....	97
6.2.2	Finnland (Posiva) .....	102
6.2.3	Rückholbarkeit in ähnliche Konzepten - Japan (NUMO) .....	104
6.3	Selektive Rückholung .....	109
6.4	Entnahme des Behälters .....	112
6.5	Rückbau des Bentonitbuffers .....	112
6.5.1	Niederdruckverfahren .....	116
6.5.2	Hochdruckverfahren .....	116
6.5.3	Mechanische Verfahren .....	117
6.5.4	Mechanisches Lösen mit pneumatischer Förderung .....	122
6.6	Freilegen des Bohrloches – Rückbau des Widerlagers .....	122
6.7	Wiederauffahrung für eine Rückholung .....	123
6.8	Wettertechnik und Klimavorausbetrachtung .....	123
7	Zusammenfassung .....	127
	Quellenverzeichnis .....	129
	Abbildungsverzeichnis .....	135
	Tabellenverzeichnis .....	140
	Abkürzungsverzeichnis .....	141

## 1 Einleitung

Die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ist der von der Bundesregierung vorgesehene Weg zur Entsorgung von hochradioaktiven Abfällen. Ziel ist es, diese dauerhaft sicher von der Biosphäre abzutrennen und damit Mensch und Umwelt vor den schädlichen Auswirkungen der ionisierenden Strahlung sowie toxischen Bestandteilen zu schützen. Für die Phasen der Erkundung, Planung, Genehmigung, Errichtung, des Betriebs und Verschlusses 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. Die Anforderung einer Rückholbarkeit eingelagerter hochradioaktiver Abfälle ist seit der Novellierung der Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010) Genehmigungsvoraussetzung und ebenso Bestandteil der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV, 2020).

Um zu gewährleisten, dass die *„Endlagergebilde, die in das Endlager eingelagert wurden, [...] bis zum Beginn der Stilllegung des Endlagers...“* (EndlSiAnfV, 2020) rückholbar gelagert sind, sind bereits frühzeitig entsprechende technische Konzepte zu entwickeln und in die Endlagerkonzeption einzubinden. Mit dem vorliegenden Vorhaben erfolgte die Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern hochradioaktiver Abfälle für aktuelle Endlagerkonzepte im Kristallingestein.





## 2 Generelle Rückholungsstrategie

Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen stellt in Deutschland und anderen Ländern den bevorzugten Weg der Entsorgung dieser Stoffe dar. Die Einlagerung innerhalb einer geologischen Formation und der zielgerichtete Verschluss sollen einen langfristig sicheren Einschluss ermöglichen. Über das passive Sicherheitssystem der geologischen Barriere erfolgt eine Abtrennung der Abfälle von der Biosphäre. Die Barrierefunktion des Wirtsgesteins erlaubt langfristig eine wartungs- und nachsorgefreie Endlagerung. Mit der Umsetzung dieses Entsorgungskonzeptes in der Gegenwart und der Gewährleistung der Wartungs- und Nachsorgefreiheit wird die Last und Verantwortung der Entsorgung zukünftigen Generationen abgenommen. Die Entsorgung wird von der verursachenden Generation wahrgenommen.

Der beschriebene Entsorgungsansatz wurde in den letzten Jahrzehnten innerhalb der gesellschaftlichen Debatte zum Umgang mit hochradioaktiven Abfällen 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 eines 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 aus dem Endlagerbergwerk bezeichnet"* (BMU, 2010) und stellt damit einen Teilaspekt der Reversibilität dar.

Das Für und Wider der Rückholbarkeit umfasst ein weites Spektrum an gesellschaftlich-ethischen, ökonomischen, sicherheitstechnischen und auch 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 hochradioaktiven Abfälle angestrebt wird. Die Rückholbarkeit würde den Jahrzehnten dauernden Prozess der Endlagerung zusätzlich Flexibilität verleihen und würde auch nachfolgenden Generationen eine gewisse Handlungsfreiheit einräumen. Die Beurteilung zur Notwendigkeit einer Rückholung obliegt diesen zukünftigen Generationen. Aus der Handlungsoption erwächst allerdings auch die Möglichkeit eines Missbrauchs. Die Sicherstellung der Kernmaterialüberwachung und Vermeidung einer Proliferation werden mit der Rückholbarkeit erschwert. Die Rückholbarkeit kann auch die betriebliche Sicherheit sowie die Langzeitsicherheit des Endlagers beeinflussen. Damit wäre das primäre Schutzziel des Endlagers beeinträchtigt und somit auch die Erbringung eines Sicherheitsnachweises zumindest erschwert. In Summe können aus der Handlungsoption Rückholbarkeit auch ohne Umsetzung der Rückholung erhebliche Zusatzkosten erwachsen (IAEA, 2009).

Aus der Diskussion um die Vor- und Nachteile der Rückholbarkeitsoption entwickelte sich in den letzten Jahren mehr und mehr der gesellschaftliche Konsens, dass eine Rückholbarkeit der eingelagerten Endlagerbehälter in die Endlagerkonzeption aufgenommen werden soll.

Diese Meinung wird auch durch die Arbeiten der „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ (Komm, 2016), das Standortauswahlgesetz (StandAG, 2017) sowie der „Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle“ (EndlSiAnfV, 2020) untermauert. Die Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV, 2020), als eine das Standortauswahlgesetz konkretisierende Verwaltungsvorschrift zur Feststellung der Genehmigungsfähigkeit, löst die 2010 veröffentlichten Sicherheitsanforderungen des BMU ab. Die „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ (Komm, 2016) und ebenso StandAG (2017) benennen die Endlagerung mit Rückholungsoption als Vorzugsvariante für den Umgang mit hochradioaktiven Abfällen in Deutschland.

Mit EndlSiAnfV (2020) wird festgelegt, welches Sicherheitsniveau für ein solches Endlager für hochradioaktive Abfälle nachweislich einzuhalten ist. Rückholbarkeit und Bergbarkeit sind ebenso als feste Anforderung in der Verordnung verankert. In § 13 EndlSiAnfV (2020) wird festgelegt, dass *„Endlagergebäude, die in das Endlager eingelagert wurden, [...] bis zum Beginn der Stilllegung des Endlagers rückholbar sein“* (EndlSiAnfV, 2020) müssen. Weiterhin ist die *„... Rückholung [...] so zu planen, dass der dafür voraussichtlich erforderliche technische und zeitliche Aufwand den der Einlagerung nicht unverhältnismäßig übersteigt.“* (EndlSiAnfV, 2020)

Für die Überführung der Anforderung einer Rückholbarkeit in konkrete technische Konzepte müssen auch weitere Anforderungen an das Endlager für hochradioaktive Abfälle berücksichtigt werden. So dürfen: *„Maßnahmen, die der Gewährleistung der Rückholbarkeit dienen, [...] die Langzeitsicherheit des Endlagers nicht erheblich und nicht mehr als unvermeidlich beeinträchtigen“* (EndlSiAnfV, 2020). Für die zu errichtenden Grubenbaue und Durchörterungen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gilt ein Minimierungsgebot. Des Weiteren wird festgelegt, dass der *„... für die Einlagerung von radioaktiven Abfällen genutzte Bereich des Endlagerbergwerkes [...] auf das notwendige Maß zu beschränken...“* (EndlSiAnfV, 2020) ist. *„Dieser Bereich ist jeweils zügig aufzufahren, zu beladen, zu verfüllen und gemäß dem Verschlusskonzept gegen das restliche Endlagerbergwerk zu verschließen.“* (EndlSiAnfV, 2020).

Von einer Rückholung wird nur während der Betriebsphase des Endlagers, bis zum endgültigen Verschluss gesprochen. Aus den Definitionen und ergänzenden Vorgaben wird deutlich, dass dies jedoch nicht allein die Einlagerungsphase umfasst. Auch der Zeitraum des Versatzes der Einlagerungsbereiche und die Verfüllung aller Strecken müssen in die Überlegungen zur Rückholbarkeit einbezogen werden. In Abbildung 2-1 erfolgt die Zuordnung der Rückholbarkeit zu den typischen Entwicklungsstufen eines Endlagers. Die Nachbetriebsphase beginnt mit dem Verschluss des Endlagerbergwerkes, durch die Verfüllung des Infrastrukturbereichs und der Schachtsäulen. Mit dieser Zuordnung wird auch der Begriff der Bergung aufgegriffen. Bergung als weitere Sonderform der Reversibilität umfasst die Entnahme der Endlagerbehälter aus dem bereits verschlossenen Endlager und ist auf *„...bis zu 500 Jahre nach dem geplanten Verschluss des Endlagers...“* (EndlSiAnfV, 2020) begrenzt. Alle weiteren zukünftigen Entwicklungen sind von Überlegungen zur Reversibilität ausgenommen.



Abbildung 2-1: Typische Entwicklungsstufen eines Endlagers und Zuordnung der Rückholbarkeit und Bergung, nach (NEA, 2011)

Die Betriebsphase eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle wird in Deutschland auf mehrere Jahrzehnte abgeschätzt. Die genannten Entwicklungsstufen – Einlagerung, Versatz, Verschluss – finden entsprechend dem Einlagerungsfortschritt parallel statt. Die Endlagerbehälter werden zügig nach der Einlagerung versetzt. Ebenso kann der Verschluss einzelner Einlagerungsfelder erfolgen. Die passive Sicherheit des Endlagers wird schrittweise erhöht. Die Endlagerbehälter befinden sich damit nicht mehr in der aktiven Kontrolle durch den Menschen. Für die Gewährleistung einer Rückholbarkeit der Endlagerbehälter müssen Strategien entwickelt werden, die alle drei Entwicklungsstufen – Einlagerung, Versatz, Verschluss – abdecken. Eine Rückholbarkeit ist nicht allein durch eine Offenhaltung der Einlagerungsbereiche gegeben, da damit die Versatz- und Verschlussphase nicht abgedeckt wird. Vielmehr muss auch die Entnahme der Endlagerbehälter aus dem Gebirgsverbund möglich sein. Mit der Rückholung werden Abfallbehälter aus dem passiven Sicherheitssystem des Endlagers entnommen und zurück in die menschliche Obhut überführt.

Aus den Anforderungen an die Rückholbarkeit wird ein als "Re-Mining"-Strategie bezeichnetes Vorgehen als geeigneter Lösungsansatz für die technische Umsetzung der Rückholung angesehen (Bollingerfehr et al., 2014). Diese Strategie beinhaltet die Einlagerung der Endlagerbehälter, 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 vorhandener Technik, wie sie etwa im Einlagerungsbetrieb genutzt wurde, erfolgen. Die Rückholungstätigkeit als "der aktive Vorgang der Entnahme von Abfallbehältern aus dem Endlager" (NEA, 2011) endet somit nach dem Transport nach über Tage.

Die Re-Mining-Strategie bedingt während der möglichen Rückholung der Endlagerbehälter eine Wiederauffahrung aller benötigten Strecken. Die Einlagerungs-/Rückholungstrecken und alle abwetterseitig angeschlossenen Strecken werden bereits während der Auffahrung dem Kontrollbereich (KB) zugeordnet. Einzelne Bereiche der versetzten Strecken des KB werden jedoch von den Neuauffahrungen gekreuzt oder angeschnitten. Dabei können auch Neuauffahrungen des Überwachungsbereiches (ÜB) alte Grubengebäudeteile des KB aufschließen. Dies entspricht einem Öffnen der zuvor verschlossenen Teile des KB. Gemäß § 52 StrlSchV (2018) würden diese Bereiche wieder dem KB zugeordnet werden. Beim Anschnitt ist zu prüfen, ob diese Bereiche durch die dort herrschende Ortsdosisleistung oder durch etwaige vorhandene Kontamination noch immer dem KB zuzuordnen sind. Kann durch Messungen gezeigt werden, dass diese Bereiche die Anforderungen an einen KB nicht erfüllen, gelten diese Bereiche als ÜB. Erfolgt dieser Nachweis nicht, sind die Strecken dem KB zuzuordnen. Im Zuge der Rückholung muss somit von einem signifikanten Auffahrungsaufwand innerhalb des KBs ausgegangen werden. Alle Materialien und Personen, die den KB verlassen, müssen freigemessen werden. Haufwerk, das aus dem KB in den ÜB überführt werden soll, muss gemäß § 36 StrlSchV (2018) auf Kontamination hin geprüft und ggf. freigemessen werden. Unter Einhaltung der geltenden Grenzwerte kann eine weitere inner- oder außerbetriebliche Nutzung ohne zusätzliche Bedingungen erfolgen. Ist eine Freimessung des Haufwerkes nicht möglich, ist das Haufwerk gemäß der Kategorisierung der Strahlenschutzverordnung zu behandeln und zu entsorgen. Das Haufwerk könnte somit auch selbst als radioaktiver Abfall bewertet werden.

Die Einlagerung eines Endlagerbehälters mit einem unerkannten Behälterdefekt kann für kein Einlagerungskonzept ausgeschlossen werden, auch nicht im Zeitraum zwischen Einlagerung und Rückholung. Infolge eines Defektes kann ein Austritt von Gasen und Aerosolen aus dem Endlagerbehälter stattfinden. Somit können der Versatz sowie die Raumluft mit radioaktiven Gasen und Aerosolen kontaminiert werden. Um die Kontamination der Raumluft und des Versatzes ausschließen zu können, sind kontinuierliche Messungen während der Auffahrung und des Rückholungsprozesses durchzuführen. Dazu gehören eine Beprobung des Versatzes sowie eine kontinuierliche Messung der Raumluft. Sollte eine Kontamination des Versatzes und/oder der Raumluft festgestellt werden, sind gesonderte Maßnahmen für die Rückholung des Endlagerbehälters und gegen eine Kontaminationsverschleppung zu treffen. Hierzu gehört u. a. eine Einhausung des betroffenen Bereichs. In Abhängigkeit von der Art des Defektes kann der Endlagerbehälter vor Ort (unter Tage) repariert oder verpackt und nach über Tage transportiert werden. Der Einlagerungsbereich für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung sollte von den Bereichen für wärmeentwickelnde Abfälle oder ausgedienten Brennelemente sicherheitstechnisch getrennt werden.

### 3 Selektive Rückholung

Je nachdem, zu welchem Zeitpunkt der Betriebsphase eine Rückholungsentscheidung getroffen wird, unterscheidet sich der Aufwand einer Rückholung der bereits eingelagerten Behälter. Weiterhin kann zwischen zwei grundlegenden Szenarien unterschieden werden:

1. Notwendigkeit, eine Teilmenge an Abfallgebinden rückzuholen, wobei der generelle Einlagerungsbetrieb fortgeführt wird
2. Es erfolgt eine vollständige Rückholung aller Abfallgebinde. Die untertägigen Hohlräume werden in der Folge nicht mehr als Endlager verwendet

Der Aufwand der Rückholung der Behälter aus einer Einlagerungsstrecke ist deutlich geringer als die Rückholung aller Behälter aus allen bereits verfüllten Einlagerungsstrecken des Endlagers. Je später die Entscheidung zur Rückholung fällt, umso größer wird also der Aufwand der Rückholung. Dabei ist der Begriff Aufwand nicht nur quantitativ zu verstehen im Sinne von aufzufahrenden Kubikmetern und der Anzahl der schon eingelagerten Endlagerbehälter, sondern auch qualitativ. Denn einerseits hält die Rückholung in verschiedenen Endlagerbereichen unterschiedliche Herausforderungen bereit, andererseits nehmen bei zunehmender Dauer nach Verfüllung eines Grubengebäudeteils die Unsicherheiten bezüglich der bei der Rückholung anzutreffenden Eigenschaften von Gebirge, Ausbau-, Verschluss-/Versatz und Behältermaterialien zu. Die bisherigen Überlegungen zur Gewährleistung der Rückholbarkeit, siehe dazu auch Bollingerfehr et al. (2014) und Herold et al. (2018), gehen von einer möglichst späten Rückholung aus. Betrachtet wurde jeweils eine Rückholung am Ende der Betriebszeit, aber noch vor Beginn der Verfüllung der Tageszugänge. Mit der Rückholung des gesamten Endlagers sollte ein möglichst abdeckendes Szenario betrachtet werden. Die Rückholung eines Einzelbehälters, einer Einlagerungsstrecke, eines Einlagerungsfeldes oder mehrerer Einlagerungsfelder ist abgedeckt, da jedes dieser Szenarien in einer vollständigen Rückholung enthalten ist. Die Annahme des Rückholungsbeginns am Ende der Betriebszeit schließt alle notwendigen Prozessschritte jeder früheren Rückholungsentscheidung bzw. jedes früheren Rückholungsszenarios in gleicher oder höherer Komplexität mit ein. Etwas Anderes lässt sich auch nicht aus Grupa et al. (2000) und NEA (2001, 2011) ableiten. Das abdeckende Szenario deckt die notwendigen Arbeitsschritte und auch eine Vielzahl von denkbaren Szenarien ab. Hinter unterschiedlichen Szenarien können unterschiedliche Gründe stehen, warum eine Rückholung durchgeführt wird. Diese können beispielsweise von betrieblichen Aspekten, gesellschaftlichen Entwicklungen oder an die Eigenschaften bzw. die Entwicklung des Endlagersystems gebunden sein. Umfang bzw. Menge der rückzuholenden Gebinde kann damit nicht nur über den Zeitpunkt der Rückholung definiert werden, sondern auch über andere Eigenschaften, die dann zu einer Rückholung z.B. bestimmter Einlagerungsstrecken oder -felder oder aber bestimmter Gebinde- oder Abfallgruppen führen. Die Rückholbarkeit der Gebinde ist durch die getroffenen Maßnahmen und entwickelten technischen Konzepte grundsätzlich gegeben. Für die Rückholung von Teilen der bereits eingelagerten Gebinde bei gleichzeitigem Verbleib von Abfällen im Endlager ergeben sich zusätzliche Anforderungen an die Rückholbarkeit. Um diese zusätzlichen Anforderungen mit in die Konzeption zu beziehen, wird der Begriff selektive Rückholung eingeführt.



Die Beweggründe für eine selektive Rückholung sind, wie auch für die vollständige Rückholung heute nicht bekannt. Eine selektive Rückholung kann z.B. nur bestimmte eingelagerte Abfalltypen betreffen. Im zukünftigen Endlager für hochradioaktive Abfälle sind unterschiedliche Abfallarten mit unterschiedlichen Inventaren und Zusammensetzungen eingelagert. In diesem Endlager für hochradioaktive Abfälle kann ggf. auch eine Einlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung erfolgen. In kleinen Mengen sind solche Abfallarten beispielsweise bereits durch die Brennelementstrukturteile in bestehenden Endlagerkonzeptionen für hochradioaktive Abfälle vertreten.

Die Unterbringung von verschiedenen Abfallarten in einer Anlage wird allgemein als Co-Disposal bezeichnet, vgl. GRS (2017). Alle bisher in Deutschland entwickelten Endlagerkonzepte folgen dem Grundsatz einer nach Abfallarten getrennten Einlagerung. Innerhalb einer Einlagerungszelle, einer Strecke oder eines Feldes werden nur Abfälle der gleichen Art eingelagert. Eine Unterbringung verschiedener Abfallarten in einem Endlager wird durch die Errichtung räumlich getrennter Flügel oder Einlagerungsbereiche umgesetzt. Beispiel dazu sind für ein Endlager im Salz in GRS (2012a) oder Jobmann & Lommerzheim (2015) für ein Endlager im Ton zu finden. Eine gezielte Rückholung einzelner Abfallgruppen ist damit grundsätzlich denkbar.

Eine selektive Rückholung impliziert die Rückholung von Endlagerbehältern unter Beibehaltung des Endlagerstandorts und des Ziels des sicheren Einschlusses aller eingelagerten radioaktiven Abfälle für eine Million Jahre. Grundsätzlich darf eine selektive Rückholung alle am sicheren Einschluss beteiligten Elemente des Endlagers nicht nachteilig beeinflussen. Die bereits genannten Auslegungs- und Sicherheitsanforderungen gemäß EndlSiAnfV (2020) gelten uneingeschränkt. Es ist auf Basis der genannten Anforderungen folgerichtig anzunehmen, dass auch Maßnahmen, die zur (selektiven) Rückholung getroffen werden, schon errichtete passive Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen dürfen. Je nach Endlagerkonzept sind unterschiedliche passive Sicherheitsbarrieren für den sicheren Einschluss der Abfälle vorgesehen. In Tabelle 3-1 werden die im Kristallingestein verfolgten Endlagerkonzepte mit ihren wesentlichen Sicherheitsbarrieren aufgeführt.

Tabelle 3-1: Endlagerkonzepte im Kristallin und ihre passiven Sicherheitsbarrieren (in grau: Versatz, der nicht wesentlich am sicheren Einschluss in der Nachbetriebsphase mitwirkt)

Endlagerkonzept	Passive Sicherheitsbarrieren
<b>Überlagernder ewG (üewG)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Die den ewG aufnehmende sedimentäre Schicht im Deckgebirge</li> <li>- Versatz der Einlagerungsstrecken zur Begrenzung von advektiven Lösungsbewegungen</li> <li>- Weitere wesentliche Sicherheitsbarrieren sind die Verschlüsse der Tageszugänge. Nach Definition der Rückholung sind diese Verschlüsse zu Beginn der Rückholung noch nicht errichtet.</li> </ul>
<b>Multipler ewG (mewG)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wirtsgestein(-sbereiche)</li> <li>- Endlagerbehälter,</li> <li>- Bohrlochverschluss aus Bentonitdichtelement und Widerlager,</li> <li>- Streckenverschlüsse</li> <li>- Versatz der Bohrlochüberfahrungsstrecken zur Begrenzung von advektiven Lösungsbewegungen</li> </ul>
<b>Modifiziertes KBS-3 Konzept (mKBS-3)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- System aus Endlagerbehälter, Bentonitbuffer und umgebendem Wirtsgestein,</li> <li>- Hartgesteinswiderlager,</li> <li>- Versatz der Bohrlochüberfahrungsstrecken und Streckenverschlüsse zur Begrenzung von advektiven Lösungsbewegungen</li> </ul>

Das Multibarrierenkonzept besteht aus drei verschiedenen Arten von Sicherheitsbarrieren: Abfallmatrix und Endlagerbehälter als technische Barriere, geotechnische Barrieren (Verschlussbauwerke) und geologische Barrieren. Versatzmaterial gilt in den oben genannten Konzepten im Kristallingestein nicht als wesentliche passive Sicherheitsbarriere.

Endlagerbehälter stellen als **technische Sicherheitsbarriere** eine Besonderheit dar, da eine Rückholung direkt diese Sicherheitsbarriere betrifft (und sie samt den darin liegenden Abfällen aus dem Endlager entfernt). Es ist grundsätzlich denkbar, dass Endlagerbehälter, die rückgeholt werden, ohne weitere Konditionierung wieder eingelagert werden sollen. Dies könnte z.B. der Fall sein, wenn Erkenntnisse der geologischen Erkundung eine Einlagerung an einem bestimmten Ort, wie zum Beispiel einem konkreten Einlagerungsbohrloch, im Nachhinein als ungünstig erscheinen lassen. Rückholungsprozesse müssen deshalb genau wie Transport- und Einlagerungsprozesse das Risiko einer Behälterschädigung minimieren.

Mit Blick auf die **geotechnischen Sicherheitsbarrieren** ergeben sich durch die selektive Rückholung besondere Anforderungen, wenn nur ein Teil der Endlagerbehälter, deren sicherer Einschluss durch u.a. diese geotechnischen Barrieren sichergestellt werden soll, rückgeholt werden soll. Wenn Sicherheitsbarrieren nicht beeinträchtigt werden dürfen, stellt sich die Frage, was dies für eine selektive Rückholung bedeutet, die eine solche Barriere zum Erreichen der rückzuziehenden Abfälle zwar durchhört, aber nicht alle Abfälle, deren Einschluss durch u.a. diese Barriere sichergestellt werden soll, entfernt. Es ist dann zu zeigen, dass nach Durchörterung der geotechnischen Barriere(n) und nach erfolgtem Rückholungsbetrieb eine Neuerrichtung von einer oder mehrerer Sicherheitsbarrieren einen qualitativ mindestens gleichwertigen Einschluss der verbleibenden Abfälle erreichen kann. Die Forderung nach mindestens gleichwertigem Einschluss ergibt sich wiederum aus der EndSiAnfV (2020), da ansonsten eine Beeinträchtigung der Sicherheitsbarriere vorläge. Technisch kann neben einer möglichst schonenden Durchörterung der Barrieren auch die Errichtung gänzlich neuer Zugänge zu den rückzuziehenden Abfällen möglich sein.

Das **Wirtsgestein** trägt in den Endlagerkonzepten im Kristallin insbesondere im Konzept der multiplen einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (ewG) wesentlich zum sicheren Einschluss bei. Gesteinsbereiche, die auch nach einer selektiven Rückholung zum sicheren Einschluss der im Endlager verbleibenden Abfälle beitragen sollen, dürfen durch die selektive Rückholung nicht beeinträchtigt werden. Vor einer selektiven Rückholung müssen diese Gesteinsbereiche identifiziert und Auswirkungen der Rückholung auf diese Bereiche untersucht werden. Zum Schutz der Barrierefunktion des ewG ist das Minimierungsgebot gemäß EndSiAnfV (2020) zu beachten.

Entsprechend der bisherigen Ausführungen verlangt die selektive Rückholung zusätzlichen Untersuchungsbedarf gegenüber einer Rückholung aller Behälter eines Endlagers: Konkret ist zu untersuchen, wie eine Rückholung einer Teilmenge der eingelagerten Endlagerbehälter aus einem Einlagerungsfeld, das bereits verfüllt und verschlossen wurde, mit anschließender Wiedererrichtung des Verfüll- und Verschlussystems umgesetzt werden kann. Eine Beeinträchtigung anderer Einlagerungsfelder ist dabei zu vermeiden. Konkrete technische Maßnahmen oder konzeptionelle Anpassungen werden in der Einzelbetrachtung der Endlagerkonzepte benannt.



## **4 Rückholungskonzept für das Endlagersystem überlagernder einschlusswirksamer Gebirgsbereich (üewG)**

### **4.1 Übersicht zum Endlager- und Einlagerungskonzept**

Für die Endlagerung des deutschen Inventars hochradioaktiver Abfälle, werden im Konzept „überlagernder ewG“ etwa 12.000 Abfallbehälter benötigt. Eine Übersicht des berücksichtigten Inventars ist in Bertrams et al. (2017) zu finden. Die Einlagerung soll direkt in horizontalen Strecken erfolgen. Das aktuelle Behälterkonzept sieht den Einsatz unterschiedlicher Behälter für unterschiedliche Abfallarten vor. Der wesentliche Behältertyp wird der POLLUX®-Behälter sein. Die Behältermassen liegen zwischen 10 t und 65 t, ihre Abmessungen weisen Längen von 1500 mm bis ca. 5500 mm sowie Durchmesser von 1060 mm bis 1560 mm auf. Zu beachten sind die über den Durchmesser hinausragenden Tragzapfen, die insbesondere für die Rückholung von Bedeutung sein können.

Das Einlagerungskonzept „überlagernder ewG“ gewährleistet die Rückhaltung der Radionuklide durch einen, über dem kristallinen Wirtsgestein des Endlagers liegenden, einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) sedimentärer Entstehung aus z.B. Salz oder Ton und in Kombination mit redundanten und diversitären Verschlüssen der Tageszugänge, siehe Abbildung 4-1. Die Einschlussfunktion des ewG wird durch seine geringe hydraulische Leitfähigkeit erreicht. Unter der Voraussetzung einer entsprechenden Ausdehnung dieser Deckschicht entfällt für das darunterliegende, kristalline Wirtsgestein die Notwendigkeit der Barrierefunktion. Da das Wirtsgestein somit kein sicherheitsrelevanter Bestandteil des Multibarrierensystems ist, kann es vor allem nach betrieblichen Gesichtspunkten gewählt und die Grubenbaue dementsprechend gestaltet werden. Es wird von einer 40-jährigen Betriebsdauer ausgegangen. Durchschnittlich entspricht das je einem Behälter an 300 Tagen im Jahr.

Die Einlagerungsbehälter stellen in diesem Konzept keine technische Langzeitbarriere dar, sondern garantieren die Handhabungssicherheit während des regulären Einlagerungsbetriebes sowie bei einer eventuellen Rückholung oder im Fall einer Bergung von Behältern bis zu 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers. Die Einlagerung der Abfallgebände erfolgt in ca. 600 m Teufe, direkt in sogenannten Einlagerungsstrecken, die als Blindstrecken ausgeführt werden. Um einen allseitigen Einschluss der Behälter zu gewährleisten, werden sie auf einen Betonitsockel gesetzt und der umgebende Hohlraum mit granularem Bentonit verfüllt. Zusätzlich wird im weiteren Grubengebäude der Radionuklidtransport durch die Verfüllung der Querschläge und Richtstrecken mit einem tonigen Material (Versatz) verzögert. Weitere Grubenräume, wie die Schächte und der Infrastrukturbereich, wären zum Zeitpunkt einer eventuellen Rückholung gemäß Definition noch offen.

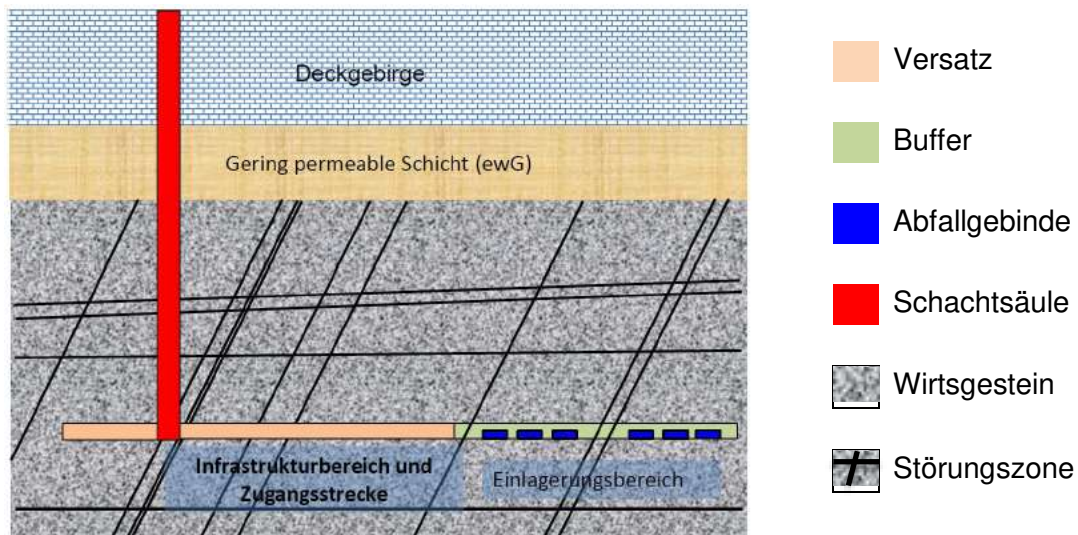


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des Verfüll- und Verschlusskonzeptes überlagernder ewG, Jobmann et al. (2016)

Nach dem von Bertrams et al. (2017) vorgestellten Einlagerungskonzeptes „überlagernder ewG“ wird vorausgesetzt, dass das kristalline Wirtsgestein des HAW-Endlagers mindestens eine gute Standfestigkeit mit einem Index von über 10 im Q-System zur Gebirgsklassifizierung nach Barton et al. (1974) aufweist. Das heißt ein günstiges Gebirgsverhalten und insbesondere im Bereich der Einlagerungskammern nur wenige hydraulisch aktive Störungen werden vorausgesetzt. Demzufolge ist das Gebirge entweder nur sehr wenig gestört und zeigt ein isotropes Verhalten, es weist eine Blockstruktur auf, bei der die einzelnen Elemente direkt miteinander verzahnt sind oder es besitzt fest verschlossene Klüfte, die bei Beanspruchung höchstens zu einer blockigen Gesteinsstruktur führen. Vor allem bei leichtem Einfallen können offene Klüfte auch wasserführend sein. Aufgrund vorhandener Klüfte und unter Einwirkung der Gravitation kann es im Rahmen von Auffahrungen zu Ausbrüchen kommen. Darüber hinaus ist es aber auch möglich, dass erst die aus der Auffahrung resultierenden Spannungsumverteilungen im Gebirge zur Überschreitung von dessen Festigkeit führen und sich dadurch Risse und Ausbrüche entwickeln.

Mangels Gesteinsparametern von gut untersuchten Endlagerstandorten in Deutschland werden stellvertretend gut erkundete und detailliert untersuchte kristalline Gesteine aus dem Ausland herangezogen, die in den jeweiligen Ländern als mögliche Wirtsgesteine für HAW-Endlager gelten. Durch die Bandbreite der Gesteine, mit unterschiedlicher Genese und abweichenden Eigenschaften, wird eine standortunabhängige Beschreibung der Maßnahmen möglich, die das Gebirge betreffen.

Bei der Planung des einsöhligen Grubengebäudes werden Querschnittsprofile für die Tageschächte, Richtstrecken, Querschläge und Einlagerungsstrecken zugrunde gelegt, die die jeweiligen Mindestmaße für die vorgesehenen Anwendungen garantieren. Für zusätzlichen Ausbau oder eine Konvergenz während der Auffahrung bzw. während der Betriebsphase müsste demnach zusätzliches Material ausgebrochen werden. Die einzelnen Grubenräume werden

durch gebirgsschonendes Sprengen erstellt und sollen nach Bertrams et al. (2017) Auflockerungszonen von nur 0,3 m an der Kontur und 0,6 m in der Sohle aufweisen. Aufgrund der Annahmen zur Standfestigkeit und zum Gebirgsverhalten werden, entsprechend Tabelle 4-1, Ausbauempfehlungen für bergmännische Auffahrungen nach dem Q-System gegeben. Demnach sind im gewählten Gebirge für temporäre Grubenbaue keine Stützmittel nötig. Einlagerungsstrecken für POLLUX®- und CASTOR®-Behälter sind daher planmäßig ohne Ausbau. Mit zunehmender Standzeit oder aufgrund größerer Querschnitte wird erst zur Bedarfsankerung und schließlich zu einer Systemankerung ohne bzw. mit Spritzbeton geraten. Darüber hinaus kann es notwendig werden, den Zufluss von Wässern zu kontrollieren.

Tabelle 4-1: Empfohlener Streckenausbau nach Q-System, nach Bertrams et al. (2017)

Typ	Anforderung an Grubenbau	Ohne Ankerung	Bedarfsankerung	Systemankerung	Spritzbetonschale
1	Temporäre Nutzung	bevorzugt	Kein Fremdmaterial nach Möglichkeit		
2	Dauerhafte Nutzung	zulässig	zulässig	d = 2,0 m, L = 3...5 m	-
3a	Besonders großer Querschnitt ODER im Bereich geringer Gesteinsqualität	unzulässig	unzulässig	d = 0,8-1,6 m, L = 3...5 m	4 - 10 cm
3b		unzulässig	unzulässig	d < 1,0 m, L = 3...5 m	5 - 9 cm (faserarmiert)

Andere Endlagerkonzepte wie z.B. SKB (Schweden) nutzen bei ähnlich gutem Gebirgsverhalten generell eine mehrere Zentimeter dicke, faserarmierte Spritzbetonschale und eine Systemankerung (SKB, 2009). Diese Maßnahmen vermindern Steinfall, halten damit die Strecken sauber und erleichtern die Sichtkontrolle von Deformationen. Derartiger Ausbau findet hier dennoch vor allem in dauerhaft genutzten Grubenbauen Anwendung.

Aufbauend auf oben genannten Angaben werden folgende Streckenausbautypen für die weitere Betrachtung der Rückholung angenommen:

- Einlagerungsstrecken für POLLUX®- und CASTOR®-Behälter – Typ 1
- Einlagerungsstrecken für MOSAIK®-Behälter – Typ 2
- Querschläge – Typ 3a
- Richtstrecken – Typ 3b

Diese Herangehensweise stimmt gut mit den jeweiligen Anforderungen an die Grubenbaue gemäß dem Q-System überein. Hier wird aber vor allem so verfahren, um die unterschiedlichen Herausforderungen des jeweiligen Ausbaus bei der Rückholung zu beschreiben.

Die horizontale Ausrichtung des Einlagerungsbergwerkes erfolgt bevorzugt und in dieser Betrachtung über drei, alternativ auch nur über zwei Richtstrecken je Einlagerungsfeldkomplex. Um eine beidseitige Umfahrung jedes Einlagerungsfeldes zu erreichen, verlaufen mindestens zwei Richtstrecken an gegenüberliegenden Seiten des Feldes. Diese Richtstrecken sind über regelmäßige Querschläge verbunden und erschließen so die Einlagerungsfelder mit den Einlagerungsstrecken.

Durch die Verwendung von drei Richtstrecken werden die Frischwetter über zwei Strecken in das Bergwerk geführt bzw. die Abwetter über die dritte Strecke gefasst und abgeführt. Auf diese Weise lassen sich Auffahrungsbereiche gut von Einlagerungsbereichen trennen und sämtliche Arbeiten erfolgen in frischen Wetter. Die Gebindettransportstrecke und die Abwetterstrecke bilden hierbei ein Doppelstreckensystem. Bei entsprechender Breite der Lagerstätte kann die Breite des Einlagerungsfeldes, also die Länge des Querschlages und damit der Abstand zwischen den inneren Richtstrecken, länger geplant werden, insofern die Anforderungen an Flucht- und Rettungswege erfüllt sind. Weiterhin können zusätzliche Einlagerungsfelder erstellt werden, die im einfachsten Fall an den Richtstrecken oder den Schächten gespiegelt werden (Jobmann & Burlaka, 2019).

Die Strecken mit gleisgebundenem Abfallgebindettransport benötigen einen Querschnitt von etwa 30,8 m<sup>2</sup> bzw. eine Breite von 8,3 m und eine Höhe von 4,0 m, um neben den Anforderungen an die Fahrwege von PKWs auch die der modifizierten Einlagerungsvorrichtung (mELVIS) zu erfüllen (Herold et al., 2018). Dazu gehören die Richtstrecke zum Transport der Abfallgebinde sowie die Querschläge. Das Transportkonzept sieht Gleise bis in die Querschläge vor. Diese zweigen, zur einfacheren Gleisführung, im Winkel von 60° von der Richtstrecke ab und münden ihrerseits in die Einlagerungsstrecken, die entgegengesetzt um 60° abzweigen. Auf diese Weise sind Einlagerungs- und Richtstrecken parallel zueinander angeordnet.

Richtstrecken für bergbauliche Aktivitäten müssen sowohl den Personal- als auch den Materialtransport erlauben. Mit einer Breite von 8,5 m und einer Höhe von 5,25 m gewährleisten sie den Fahrweg von LKWs, Lade-Transport-Fahrzeugen und PKWs.

Da die Abwetterstrecke nicht der Personenführung dient, darf die Wettergeschwindigkeit über 6 m/s betragen. Ergänzend zu Bertrams et al. (2017) wird hier angenommen, dass es sich dabei um ein ähnliches Profil wie in der Bergbaurichtstrecke, jedoch mit 8,5 m Breite und 5,5 m Höhe handelt. Damit ist gewährleistet, dass die Wettergeschwindigkeit 10 m/s nicht überschreitet, wenn beide Frischwetterstrecken mit 6 m/s bewettert werden. Aufgrund der Maße ist die nachträgliche Einrichtung einer Transportstrecke für z.B. die Rückholung ohne weiteres möglich.

Die Einlagerungsstrecken sind 400 m lange Blindstrecken in denen z.B. jeweils ca. 29 POLLUX®-3- Behälter eingelagert werden können. Mehrere parallel zueinander liegende Einlagerungsstrecken werden über einen gemeinsamen ca. 400 m langen Querschlag erschlossen und so zu einem Einlagerungsfeld zusammengefasst. Diese Felder können entweder vollständig oder bedarfsgerecht aufgefahren und an den Einlagerungsbetrieb übergeben werden.

Die Einlagerungsstrecke für POLLUX®- und CASTOR®-Behälter verfügt über ein etwa rechteckiges Profil mit aufgewölbter Firste, bei einer Querschnittsfläche von 19,7 m<sup>2</sup> (vgl. Abbildung 4-2). Dabei beträgt die Streckenbreite 5,15 m sowie die maximale Streckenhöhe in der Mitte der Strecke 4,0 m. Der Pollux®-Behälter mit einem Durchmesser von ca. 1,6 m ruht auf einem Betonsockel mit einer Breite von 1,75 m und einer Höhe von ca. 0,6 m.

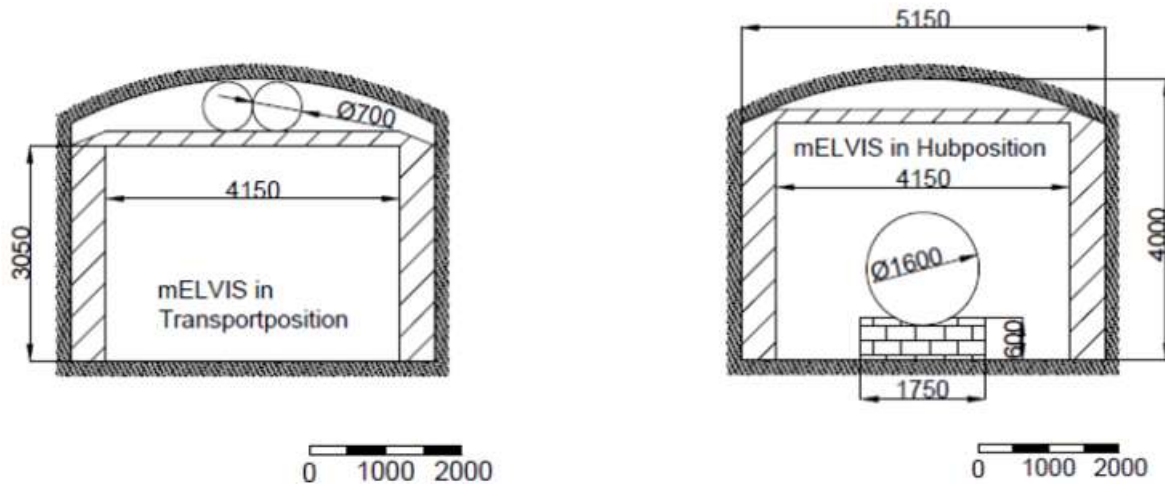


Abbildung 4-2: Profil der Einlagerungsstrecke für POLLUX®- und CASTOR®-Behälter (19,7 m<sup>2</sup>), nach Bertrams et al. (2017)

Einlagerungsstrecken für MOSAIK®-Behälter weisen ein Profil mit nach außen gewölbter Kontur und ebener Sohle auf, siehe Abbildung 4-3. Dabei besitzen sie eine Höhe und Breite von bis zu 6,3 m bzw. 7,6 m. Die etwa zylindrischen Behälter werden mit ihrer Achse parallel zur Streckenachse orientiert und von Stoß zu Stoß nebeneinander platziert. Die unterste Reihe wird auf einer ca. 0,3 m starken Bufferschicht abgelegt. Weitere Behälter werden dann auf diese unterste Reihe aufgelegt und bis unter die Firste gestapelt. Eine solche Einheit wird mit einem Abstand von ca. 0,1 m zur nächsten erstellt. Für die Zwischenräume und die sonstigen Hohlräume wird hier angenommen, dass sie mit Hilfe von Bentonitbuffer von oben verfüllt werden.



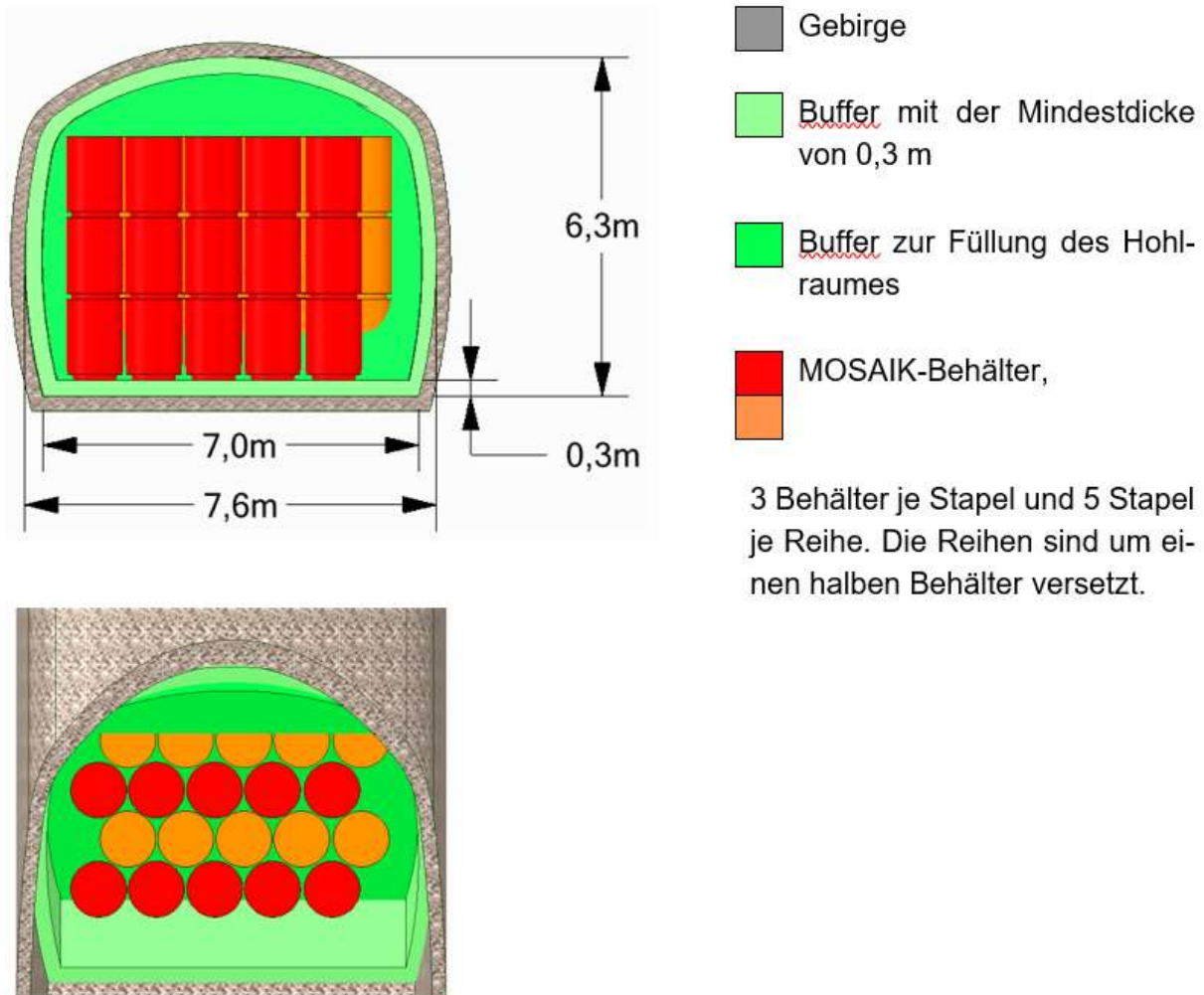


Abbildung 4-3: Profil der Einlagerungsstrecke für MOSAIK®-Behälter und Einlagerungsschema stehend nach Herold et al. (2018)

Auf Grundlage eines thermischen Modells in FLAC3D und der Zielgröße (Auslegungstemperatur) von maximal 100°C an der Behälteroberfläche wurden thermisch notwendige Abstände zwischen Einlagerungsstrecken (ELS) bzw. zwischen Abfallgebinden innerhalb einer Strecke gemäß Tabelle 4-2 bestimmt. Die Wahl ermöglicht eine hohe Ausnutzung der einzelnen Strecken und sorgt so für eine geringe Durchörterung des Gebirges. Neben den thermischen Mindestabständen sind außerdem die gebirgsmechanischen Mindestabstände einzuhalten. Für letztere wird die Faustformel: Abstand der Streckenstöße = 2x Streckenbreite, angewendet. Damit sind für ELS mit CSD-B und -C Abfällen, sowie mit CASTOR®-Behältern praktisch ca. 18 m zwischen den Streckenachsen und 24 m bei ELS mit MOSAIK®-Behältern einzuhalten. Dementsprechend sind hier die gebirgsmechanischen Mindestabstände gegenüber den thermischen ausschlaggebend. Größere Abstände zwischen den Strecken führen bei einer Rückholung aber nicht zu einer grundlegenden Änderung der Technologie, sondern führen lediglich dazu, dass die gleichen Arbeitsschritte in längeren Streckenabschnitten auszuführen sind.

Tabelle 4-2: Thermische und gebirgsmechanische Mindestabstände bei der Einlagerung

Behältertyp	Thermisch bedingter Streckenabstand (Achse zu Achse)	Thermisch bedingter Behälterabstand (Schulter zu Schulter)	Gebirgsmechanisch bedingter Streckenabstand (Achse zu Achse)
POLLUX <sup>®</sup> -3 DWR/SWR-Mix, WWER	55 m	7 m	ca. 18 m
POLLUX <sup>®</sup> -9 für CSD-V	22 m	1 m	ca. 18 m
POLLUX <sup>®</sup> -9 für CSD-B/C	10 m	1 m	ca. 18 m
CASTOR <sup>®</sup> Behälter	10 m	1 m	ca. 18 m
MOSAIK <sup>®</sup> (Gussbehälter Typ II)	10 m	1 m	ca. 24 m

Das Endlager soll während der Auffahrung und Einlagerung mit Effektivtemperaturen von unter 28°C (KlimaBergV) und damit ohne besondere arbeitszeitliche Auflagen betrieben werden. Zum Betrieb werden darüber hinaus Frischwetter von mindestens 2 m<sup>3</sup>/min pro Person und weitere 3,4 m<sup>3</sup>/min je Diesel-kW (TRGS, 2019) benötigt. Die frischen Wetter gelangen über den einziehenden Schacht der Doppelschachtanlage in den Infrastrukturbereich, wo über entsprechende Wetterbauwerke bis zu 185 m<sup>3</sup>/s in eine Gebindettransportstrecke und 255 m<sup>3</sup>/s in eine Bergbaustrecke verteilt werden. Zur Bewetterung der bis zu 400 m langen Einlagerungstrecken dienen je zwei Lüfter und Luttenleitungen mit einem Durchmesser von 0,7 m, die zusammen bis zu 16,8 m<sup>3</sup>/s realisieren. Selbst bei einer veränderten Lüfterkonfiguration für den Vortrieb von Blindstrecken mit einem in Pöhler et al. (2010) prognostizierten Bedarf von jeweils 20 m<sup>3</sup>/s bis 23,3 m<sup>3</sup>/s, sind genügend frische Wetter vorhanden, um mehrere Örter gleichzeitig vorzutreiben. Die Einlagerung hat aufgrund der elektrischen Antriebe, der geringeren Leistungen und des geringeren Personaleinsatzes einen niedrigeren Wetterbedarf.

Die Betriebspunkte der Auffahrung und der Einlagerung sind so angeordnet, dass die Wetter stets vom Überwachungsbereich in den Kontrollbereich ziehen. Alle Teilströme werden in der dritten Richtstrecke, der Abwetterstrecke, gesammelt und zurück zum ausziehenden Schacht geführt. In diesen beiden Grubenbauen darf die Wettergeschwindigkeit über 6 m/s betragen.

Der vertikale Transport von Abfallgebinden, Material, Haufwerk und Personal zwischen Endlager und Tagesoberfläche erfolgt über die Schächte. Die Personenfahung im Endlager soll bevorzugt über PKW und der Materialtransport mittels Schwerlastkraftwagen (SKW) und Lade- & Transportfahrzeug (LTF) erfolgen. Der horizontale Transport der Abfallgebinde von der Konditionierungsanlage zum Endlager und innerhalb des Endlagers erfolgt gleisgebunden mittels Plateauwagen bei einer Normalspurbreite von 1435 mm. Für POLLUX<sup>®</sup>- und CASTOR<sup>®</sup>-Behälter beruht sie auf der bereits erfolgreich getesteten Technik für den Transport in einem Endlager in Salzgestein, siehe dazu auch Engelmann & Filbert (1995) und Filbert et al. (2010). Mittels einer Batterielokomotive wird das Abfallgebinde vom Füllort bis in den Querschlag transportiert und dort unter die Einlagerungsvorrichtung verfahren. Die Einlagerungsvorrichtung hebt das Abfallgebinde an und fährt mit ihm bis an das Ende der aktuellen ELS. Dort wird das Gebinde auf einem Betonsockel abgelegt.

MOSAİK®-Behälter werden mit Hilfe von Tauschpaletten, ebenfalls auf Plateauwagen, bis in den Querschlag transportiert. Dort werden sie von einem Stapelfahrzeug entnommen und in der ELS für Strukturteile stehend gestapelt.

Das Konzept des „überlagernden ewG“ sieht vor, dass der Austausch von Wässern und der damit mögliche Transport von Radionukliden durch eine geringpermeable, sedimentäre Schicht oberhalb des Wirtsgesteins auf ein Minimum beschränkt wird. Die Durchörterung der Barriere stört diese Funktion. Beim Verschluss des Endlagerbergwerks muss sie durch geeignete technische Maßnahmen bestmöglich wiederhergestellt werden. Da eine eventuelle Rückholung noch vor der Verfüllung bzw. dem Verschluss der Schächte erfolgt, wird hier nicht auf deren technische Umsetzung eingegangen.

Die Abfallbehälter stellen im Konzept „überlagernder ewG“ keine Langezeitbarriere dar. Sie dienen der sicheren Handhabung während des Betriebes, der Rückholung oder bei einer Bergung bis zu 500 Jahren nach dem Verschluss des Endlagers. Zur Einlagerung werden Sie am Ende der Einlagerungsstrecke auf einem Sockel aus Bentonit-Formsteinen abgelegt und der Streckenabschnitt anschließend bis zur Kontur mit einem Buffer aus granularem Bentonit verfüllt, vgl. Abbildung 4-4.

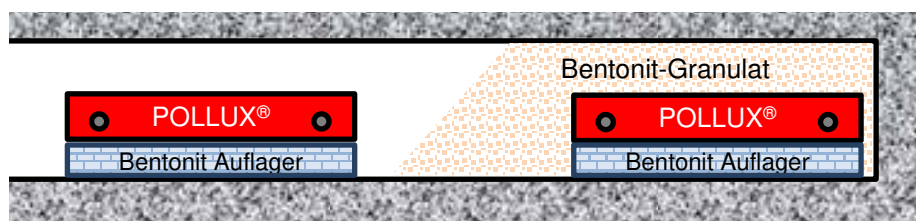


Abbildung 4-4: Schematische Darstellung der Verfüllung einer Einlagerungsstrecke, nach Jobmann & Burlaka (2019)

Auf diese Weise schreiten Einlagerung und Verfüllung in den Einlagerungsstrecken sukzessive in Richtung Querschlag voran. Die Verbindung zum Querschlag wird schließlich mittels eines Betonwiderlagers (vgl. Abbildung 4-5) verschlossen, um auch bei einsetzendem Quellprozess den Buffer in Position und den Querschlag durchschlägig zu halten.

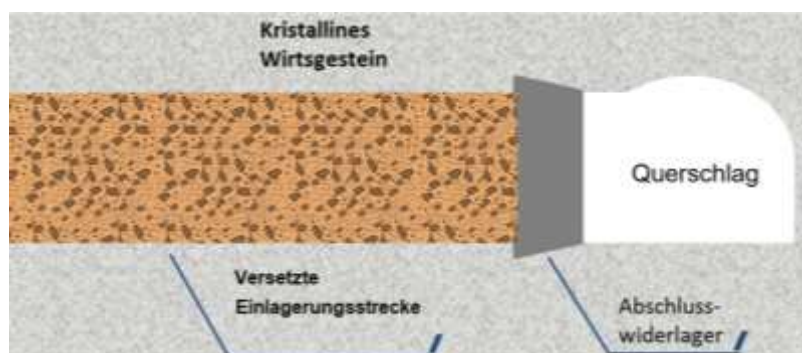


Abbildung 4-5: Abschlusswiderlager der Einlagerungsstrecke, nach Jobmann & Burlaka (2019)



Sind alle Strecken eines Einlagerungsfeldes verfüllt, können der Querschlag und die zugehörigen Abschnitte der Richtstrecken die, nicht mehr benötigt werden, ebenfalls verfüllt werden. Als Versatz dient ein toniges Material, das gemäß einer Arbeitshypothese aus etwa 70 % schotterähnlichem, aufbereitetem Wirtsgestein und 30 % Bentonit besteht. Auch in den Querschlägen werden Betonwiderlager genutzt, um angrenzende Richtstrecken offenzuhalten und dabei die Qualität der Verfüllung zu sichern. Nach und nach schreitet auch die Verfüllung der Richtstrecken in Richtung der Doppelschachtanlage bis zum Infrastrukturbereich voran. Sowohl der als Buffer bezeichnete Bentonit in den Einlagerungsstrecken, als auch das tonige Versatzmaterial in den Querschlägen und Richtstrecken sollen nach der Aufsättigung eine Permeabilität von weniger als  $1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  erreichen. Um den Kraftschluss zum Gebirge sicherzustellen, wird nach Jobmann & Burlaka (2019) außerdem ein Quelldruck von mindestens 0,5 MPa gefordert. Dieser verhindert einerseits das Umfließen der Verfüllung und begrenzt darüber hinaus die Verformung des Wirtsgesteins und die daraus resultierende Erweiterung einer Auflockerungszone. Die Aufsättigung des Verfüllmaterials wird durch einen eventuellen Ausbau nicht gestört, da dieser eine höhere Permeabilität als das Wirtsgestein aufweist. Jobmann & Burlaka (2019) schlagen einen Calcium-Bentonit mit einer Einbautrockendichte von  $1650 \text{ kg/m}^3$  vor, der nach Aufsättigung eine Dichte von ca.  $2200 \text{ kg/m}^3$  erreicht. Wie Müller et al. (2017) beschreiben, wurde im Rahmen des in-situ Versuches der Nagra für den dort verwendeten Bentonitversatz eine durchschnittliche trockene Schüttdichte von nur etwa  $1500 \text{ kg/m}^3$  erreicht, wobei die Trockendichte der einzelnen kompaktierten Pellets im Granulat  $2180 \text{ kg/m}^3$  betrug. Um chemische Wechselwirkungen mit dem Bentonit zu minimieren, werden die Betonwiderlager aus einem Beton mit niedrigem pH-Wert erstellt. An exponierten Stellen mit hydraulisch wirksamen Klüften erfolgt eine zusätzliche Sicherung der Verfüllung durch geeignete Verschlussbauwerke. Dabei stellen die gewählten Materialien einerseits die natürlichen Fließwege wieder her, verhindern andererseits aber den Austausch von Wässern mit dem Endlagerbereich und damit auch die Erosion des Verfüllmaterials in den angrenzenden Strecken.

#### **4.2 Grundkonzept der Rückholung/Selektive Rückholung**

Um die Reversibilität zu jedem Zeitpunkt der Einlagerung zu verdeutlichen, wird die Rückholung hier, aufbauend auf der Reihenfolge der Einlagerung beschrieben. Wie aus der Überblicksdarstellung Tabelle 4-3 hervorgeht, werden die unterschiedlichen Zustände des Endlagers gemäß NEA (2011) abgegrenzt und die zur Rückholung jeweils notwendigen Prozessschritte zugeordnet. Mit voranschreitender Einlagerung steigt die Zählnummer der notwendigen Prozessschritte. In Abhängigkeit des Zeitpunktes der Rückholung sind sämtliche Schritte mit kleinerer Zählnummer ein- oder mehrfach umzusetzen, um einen Behälter rückzuholen. Die dann in Abbildung 4-6 schematisch zusammengefassten Prozessschritte greifen unter anderem das Endlager- und Verschlusskonzept aus Bertrams et al. (2017) bzw. Jobmann & Burlaka (2019) auf.

Aufgrund des standfesten Gebirges wird davon ausgegangen, dass sämtliche Strecken gebirgsmechanisch stabil sind, ihre Konturen aber eventuell neu gesichert bzw. von aufgelockertem Material beraubt werden müssen. In Abhängigkeit von der verstrichenen und für die Rückholung notwendigen Standzeit, sollten Einzeluntersuchungen diesen Bedarf näher bestimmen.





Unabhängig vom Zeitpunkt der Rückholung muss in Bezug auf das Wirtsgestein, den Versatz und die Behälter für die folgenden 500 Jahre sichergestellt sein, dass die Rückholung einiger Behälter nicht die Handhabbarkeit der verbleibenden gefährdet (EndSiAnfV, 2020). Gleiches gilt für die rückgeholt bzw. in den Rückholvorgang anderer Behälter eingebunden Behälter, sofern diese aufs Neue eingelagert werden sollen.

Die folgenden besonderen Anforderungen einer selektiven Rückholung im Konzept „überlagernder ewG“ werden daher, mit Blick auf die wesentlichen Elemente der Einschlusswirksamkeit, im Folgenden berücksichtigt:

- Keine Beeinträchtigung der rückgeholt Behälter im Fall der weiteren Nutzung der Behälter zur Endlagerung mit Blick auf die Handhabbarkeit für 500 Jahre
- Keine Beeinträchtigung von verbleibenden Behältern in der Nähe von Rückholungsprozessen mit Blick auf die Handhabbarkeit für 500 Jahre
- Keine Beeinträchtigung des Buffers in der Nähe von Rückholungsvorgängen – gegebenenfalls Wiederherstellung der Bufferfunktion
- Entfernung von Verschlüssen im Bereich von Störungszonen müssen den Verschluss an möglichst gleicher Stelle in mindestens gleicher Qualität ermöglichen
- Dem erneuten Verschluss werden die aktuellen Bedingungen der Auflockerungszone zugrunde gelegt

Da die Rückholung, gemäß ihrer Definition, erfolgt bevor der Schacht verschlossen wird. Aktivitäten die in größerer Entfernung zum Schacht erfolgen, beeinträchtigen nicht die Erstellung zukünftiger Verschlussbauwerke im überlagernden ewG.

Tabelle 4-3: Szenarien für die selektive Rückholung beim üewG und gemäß NEA (2011)

Voranschreitende Einlagerung / Erhöhung der passiven Sicherheit 						
						
Rückholungs- teilprozesse	R-Skale Stufe 2 – Gebinde in offener ELS	R-Skale Stufe 3 – ELS verfüllt (und verschlossen)		R-Skale Stufe 4 – Zugangsstrecken verfüllt (und verschlossen)		
(1) Aufnahme des Behälters und Transport zum Schacht	Rückholung eines Behälters <b>vor Verfüllung des ELS-Abschnitts</b>	Rückholung eines oder mehrerer Behälter <b>nach Verfüllung des ELS-Abschnitts</b>	Rückholung eines oder mehrerer Behälter <b>nach Verschluss der ELS</b>	Rückholung eines oder mehrerer Behälter <b>nach Verfüllung des Querschlages</b>	Rückholung eines oder mehrerer Behälter <b>nach Verschluss des Querschlages</b>	Rückholung eines oder mehrerer Behälter <b>nach Verfüllung der Richtstrecken</b>
(2) Freilegen von Behältern						
(3) Rückbau des Widerlagers einer ELS						
(4) Aufwältigung des Querschlages						
(5) Rückbau des Widerlagers im Querschlag						
(6) Aufwältigung von Richtstrecken						

ELS = Einlagerungsstrecke(n)

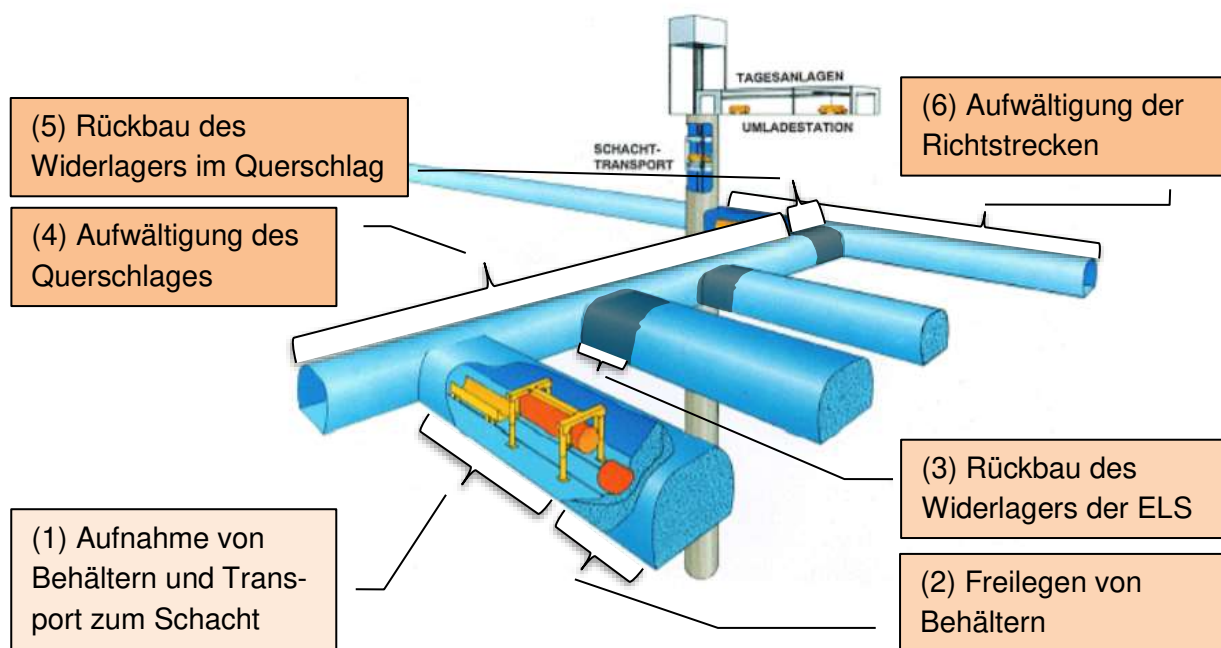


Abbildung 4-6: Schema der selektiven Rückholung aufbauend auf einem Schema der Einlagerung nach Ziegenhagen & Schmidt (2008)

#### (1) Aufnahme von Behältern und Transport zum Schacht (R-Skale Stufe 2)

Das früheste und technisch einfachste Rückholungsszenario ist die Entnahme des zuletzt eingelagerten Abfallgebundes aus der noch unverfüllten Strecke. In diesem Fall entspricht die Rückholung, einer Wiederaufnahme des Behälters inklusive der Verladung und dem Abtransport. Technische Gründe, wie ein gebrochener Bentonitsockel oder Probleme beim Verfahren der Einlagerungsvorrichtung, können genauso Ursache für diesen Schritt sein wie die Notwendigkeit, einen tiefer in der Strecke eingelagerten Behälter rückzuholen. Daher sollte dieser Fall bei der technischen Auslegung der Einlagerungsvorrichtung beachtet werden. Der Transport nach über Tage ist während der Rückholung unkritisch, da sämtliche Transporteinrichtungen vorhanden und für den Rücktransport geeignet sind.

Wichtige Teilschritte am Behälter:

Entnahme der Abfallgebunde

Transport der Abfallgebunde bis zum Schacht





Tabelle 4-4: Überblick der identifizierten Prozess- und Prozessteilschritte die zur Rückholung nötig sind

Prozessschritte der Rückholung von POLLUX®/CASTOR®	Prozessteilschritte						
	A	B	C	D	E	F	G
(1) Aufnahme von Behältern und Transport zum Schacht	Grobe Reinigung der Behälter	Entnahme des Behälters aus der ELS	Gleistransport bis zum Füllort des Schachtes				
(2) Freilegen von Behältern	Entnahme des Bentonitsockels	Entnahme des Buffers zwischen Behältern	Streckensicherung zwischen Behältern	Sicherung des Bentonitsockels	Entnahme des Buffers um einen Behälter	Streckensicherung um einen Behälter	Verlängerung der Wetterluten
(3) Rückbau des Widerlagers einer ELS	B+S oder maschinelles Lösen	Laden + Fördern	Gebirgsicherung	Verlängerung der Wetterluten			
(4) Aufwältigung von Querschlägen	Entnahme des Versatzes	Gebirgsicherung (Ankerung)	Gebirgsicherung (Spritzbeton)	Verlängerung der Wetterluten	Gleisbau Verladestation		
(5) Rückbau des Widerlagers im Querschlag	B+S oder maschinelles Lösen	Laden + Fördern	Gebirgsicherung	Verlängerung der Wetterluten			
(6) Aufwältigung von Richtstrecken	Entnahme des Versatzes	Gebirgsicherung (Ankerung)	Gebirgsicherung (Spritzbeton)	Verlängerung der Wetterluten	Gleisbau		

#### 4.3.1 Aufnahme von Behältern und Transport zum Schacht

Frei in der Strecke liegende Behälter können mit geringem Aufwand entnommen werden. Um bei der Rückholung die Gefahr einer Kontaminationsverschleppung zu minimieren, werden sie jedoch, je nach Grad der Verschmutzung, noch in der ELS gereinigt. Die notwendige Reinigung ist dafür noch zu definieren. Prinzipiell können Restmengen von anhaftendem Buffer mit rotierenden Bürsten entfernt werden, wie sie aus der Straßen- und Tunnelwandreinigung bekannt sind. Diese lassen sich an einem Multifunktionsfahrzeug anbringen. Je nach Anforderungen kann eine zweite Reinigung an gesonderter Stelle nachgeschaltet werden.

1A	Für die grobe Reinigung des Behälters von trockenem Bentonit werden 0,5 h abgeschätzt. Dabei kann die Maschine ihren Standort wechseln und den Behälter somit von zwei Seiten erreichen.	
	Grobe Reinigung der Behälter	0,5 h je POLLUX®-Behälter

Nach der Reinigung erfolgt die Aufnahme des Behälters. Prinzipiell können sämtliche im Einlagerungskonzept vorgesehene POLLUX®- und CASTOR®-Behälter mit Hilfe der modifizierten Einlagerungsvorrichtung in Strecken (mELVIS) aus unterschiedlichen Höhen wieder aufgenommen werden. Für die verschiedenen Behältertypen müssen dafür die unterschiedlichen Tragzapfen und Durchmesser der Behälter beachtet werden. Mit Hilfe der mELVIS wird der einzelne Behälter angehoben und bis zur Verladestelle für den Gleistransport transportiert. Diese befindet sich spätestens zwischen der Richtstrecke und der ersten ELS des jeweiligen Querschlages (Herold et al., 2018).



1B	Die Entnahme eines rückzuholenden Behälters aus der ELS hängt maßgeblich von der Entfernung, der Fahrgeschwindigkeit und dem Rangiervorgang der mELVIS ab. Bei jeweils ca. 400 m langen ELS und Querschlägen, sind durchschnittlich 400 m je Richtung oder 800 m insgesamt sowie die Fahrt in die Warteposition für jeden Behälter nötig. Bei einer geplanten Geschwindigkeit von 0,5 m/s bzw. 1,8 km/h in der Ebene, genügen 0,5 h dafür. Hinzu kommen weitere 0,5 h für das Rangieren in der ELS und den Hebevorgang sowie 0,5 h an der Verladestelle. Insgesamt sind damit 1,5 h je Behälter als genügend anzusehen.	
	Entnahme des Behälters aus der ELS	1,5 h je POLLUX®-oder CASTOR®-Behälter

An der Verladestelle erfolgt die Übergabe des Behälters auf den Plateauwagen. Dieser wird dann mittels einer batteriebetriebenen Lokomotive zurück zum Schacht transportiert (Engelmann & Filbert, 1995). Für eine sichere Aufnahme der verschiedenen Behältertypen erhält der Plateauwagen angepasste Schalen. Eine genügende Menge Plateauwagen sind vorzuhalten, so dass für die weitere Entnahme von Behältern keine Wartezeiten entstehen.

1C	Die Transportgeschwindigkeit auf dem Gleis beträgt ca. 3 m/s. Damit kann die Lokomotive auch Entfernungen von mehreren Kilometern überwinden, bevor der nächste Behälter an der Verladestelle zu erwarten ist. Wird der Plateauwagen direkt nach der Befüllung vor Ort gegen einen leeren getauscht, verbleiben gemäß obiger Annahme fast 1,5 h für den Transport und das Rangieren. Für den Fall, dass die Transportdauer auf dem Gleis die in der mELVIS übersteigt, sind z.B. mehrere Lokomotiven und Überholstellen oder eine Verladestelle für mehrere Behälter vorzusehen. Da der Transport des Gebindes mit der Lokomotive parallel zur weiteren Rückholung erfolgen kann, wirkt er sich nicht auf die Rückholzeit je Behälter aus.	
	Gleistransport bis zum Füllort des Schachtes	0 h je Behälter

Bei der selektiven Rückholung werden einige Behälter nur aus der ELS entnommen, um den Zugang zu einem anderen zu ermöglichen. Kann ein solcher Behälter in einer benachbarten ELS eingelagert werden, verringern sich der Transportaufwand nach über Tage und die Gefahr einer Kontaminationsverschleppung deutlich. Es wird angenommen, dass der zusätzliche Weg in die neue ELS hinein von einem kürzeren Fahrweg innerhalb des Querschlages kompensiert wird. Daher entspricht der Zeitbedarf je Behälter dem des Transportes zur Verladestelle. Ist der Transport zu einem anderen Einlagerungsfeld nötig, sollte eine Trennung der Aus- und Einlagerung sowie des dazwischen befindlichen Transportes geprüft werden. Dieser Fall entspricht dann ebenfalls dem Transport zur Verladestelle (1B) und würde keine zusätzliche Zeit benötigen.

#### 4.3.2 Freilegen von Behältern

Um einen weiteren POLLUX®- oder CASTOR®-Behälter aus einer ELS zu entnehmen, muss zunächst der Bentonitsockel des vorherigen Behälters und dann auch der darauffolgende Buffer entfernt werden. Letzteres wird in zwei Schritten durchgeführt, die durch die Gebirgssicherung getrennt werden. Um die Logistik zu entlasten, sollte bei der selektiven Rückholung der Buffer einer ELS möglichst immer in einer benachbarten, bereits geräumten ELS abgeladen



werden. Damit wird einerseits eine Kontaminationsverschleppung und andererseits die mit der Wiedereinlagerung verbundene Arbeit zum Einbau des Buffers minimiert. Für den Wiedereinbau können Prozessschritte wie eine Trocknung des Buffers notwendig werden, die hier nicht betrachtet werden.

#### 4.3.2.1 Entnahme des Bentonitsockels

Ist der Bentonitsockel erst kurz gesetzt, können die einzelnen Steine mit einem Vakuumheber und einem zugehörigen Kran wieder angehoben (Abbildung 4-7) und auf ein Transportfahrzeug oder eine Palette verladen werden. Wird diese Technik an einem Multifunktionsfahrzeug (vgl. Abbildung 4-8) installiert, ist sie flexibel im Grubengebäude einsetzbar und das geladene Material kann direkt abtransportiert werden.

<b>2A'</b>	Für die Entnahme werden 2 h angenommen. Dies ist auch davon abhängig, wie viele Transporte notwendig sind.	
	Entnahme eines Bentonitsockels	2 h je POLLUX®-Behälter



Abbildung 4-7: Vakuumschlauchheber im Detail (links) und am Säulenschwenkkran (rechts), nach Schmalz (2020)



Abbildung 4-8: Universaltransportfahrzeug mit Kran und Ladefläche, Paus (2020a)

Sollen Bentonitblöcke, z.B. nach der Beladung mit einem POLLUX®, nicht wiederverwendet werden, können sie von einem Lade- und Transportfahrzeug (LTF) in eine nahegelegene Strecke verbracht werden. Derartige Fahrzeuge sind bereits von der Auffahrung vorhanden. In

Abhängigkeit ihrer Größe sind mehrere Zyklen notwendig, um sämtliche Steine mit einem Volumen von ca. 6 m<sup>3</sup> zu entfernen. Üblicherweise arbeiten LTF bis zu einer Entfernung von 250 m zwischen Aufnahme- und Abwurfpunkt, da mit zunehmender Entfernung die Produktivität sinkt. Mit steigender Entfernung und Anzahl der Zyklen sollten daher Varianten mit einem gesonderten Transportfahrzeug in Betracht gezogen werden. Außerdem ist die Abwurfhöhe beim Entladen zu beachten.

<b>2A</b>	Durchschnittlich beträgt die Entfernung bis zum Sockel 200 m innerhalb der ELS und 200 m im Querschlag. Je nach Zielort sind auch 200 m in der benachbarten ELS nötig. Mit geschätzten 10 km/h Durchschnittsgeschwindigkeit ist ein solches Fahrspiel in 10 min zu absolvieren. Hinzu kommen das Be- und Entladen mit zusammen 5 min. Das LTF sollte so gewählt werden, dass zwei Fahrspiele und damit 0,5 h genügen. Alternativ kann der Sockel mit der Tunnellademaschine zerkleinert und geladen werden, die im Anschluss für die Entnahme des Buffers vorgestellt wird. Für diese Alternative werden ebenfalls 0,5 h geschätzt.	
	Entnahme eines Bentonitsockels	0,5 h je POLLUX <sup>®</sup> -Behälter

#### 4.3.2.2 Entnahme des Buffers zwischen Behältern

Je nach Konsistenz des Buffers, aber auch in Abhängigkeit von dessen Transportentfernung und der Anzahl von Behältern können verschiedene Technologien zur Entnahme sinnvoll sein. Ist der Buffer gut rieselnd, kann er mit einem LTF geladen und in eine nahegelegene ELS transportiert werden. Für den Bereich bis zum nächsten Behälter eignet sich zunächst ein Fahrzeug mit möglichst großem Schaufelvolumen, um die Anzahl der Fahrzyklen zu minimieren. Ein entscheidender Nachteil der LTF Technik ist, dass sie beim Entladen keine vollständige Füllung der Strecke zulässt. Darüber hinaus wird nicht die gleiche Schüttdichte wie bei der geplanten Einlagerung erreicht. Aus diesem Grund sind Versatzvorrichtungen notwendig, um den Buffer direkt in einer Nachbarstrecke zur Einlagerung verwenden zu können. Wird der Buffer nur temporär umgelagert und werden die Strecken daher nicht vollständig gefüllt, sind überschüssige Mengen in andere Strecken oder aus dem Endlager zu transportieren.

<b>2B'</b>	Wie bei 2A, genügen dem LTF 15 min für ein Fahrspiel von insgesamt 1.200 m inkl. Be- und Entladung. Bei einer Distanz von 7 m zwischen zwei Behältern und einem Querschnitt von 20 m <sup>2</sup> sind 140 fm <sup>3</sup> (Festkubikmeter) zu entnehmen. Bei einem Auflockerungsfaktor von 0,84 für mitteldichte Tone ergeben sich daraus aufgelockert 167 lm <sup>3</sup> (Weiß et al., 1998). Mit einer 7 m <sup>3</sup> -Schaufel kann dieses Volumen mit 24 Fahrspielen, bzw. in 6 h umgelagert werden.	
	Entnahme des rieselfähigen Buffers zwischen Behältern	6 h je POLLUX <sup>®</sup> -Behälter

Mit steigender Transportentfernung, bietet sich die Trennung des Lade- und Transportvorganges an. Der Transport von der ELS bis zum Zielort erfolgt dann z.B. mit einem oder mehreren Muldenkippern, siehe Abbildung 4-10 und Abbildung 4-11. Sie sind jeweils in der Lage, mehrere Kubikmeter Material aufzunehmen und absolvieren auch einige Kilometer Transportentfernung. Werden sie in niedrigen Strecken wie einer ELS entladen, ist ein Schubkastensystem notwendig. An Stelle einer Kippmulde, die an die Firste stoßen kann, wird das Material hier durch eine verschiebbare Rückwand aus der Mulde gepresst. Dies bietet sich außerdem für den möglicherweise stark anhaftenden Bentonit an (vgl. Abbildung 4-9). Die Bauhöhe dieser

Mulden und die geringen Dimensionen der ELS erschweren das Beladen von der Seite, so dass dies nicht durch LTF erfolgt.



Abbildung 4-9: Ausbau von Bentonitverfüllmaterial nach ca. 10 Jahren aus dem Opalinuston, Fries (2013)



Abbildung 4-10: Muldenkipper Epiroc MT2200 mit Schubwand bis 10 m<sup>3</sup>, Epiroc (2020a)



Abbildung 4-11: Muldenkipper Paus PMKS 12000 mit Schubwand für 14 m<sup>3</sup>, Paus (2020b)



Aufgrund der häufigen und langen Rückwärtsfahrten in den schmalen Strecken sei alternativ auf das Konzept der sogenannten Shuttlecars verwiesen (Abbildung 4-12). Diese besitzen einen starren Rahmen und eine geringe Bauhöhe mit guter Übersicht nach vorn und hinten. Mittels Kettenkratzförderer sind sie in der Lage ihre Mulde selbst in flachen Strecken zu entladen. Mit einer Nutzlast von bis über 30 t eignen sie sich insbesondere für kurze Transportentfernungen von ca. 1 km.

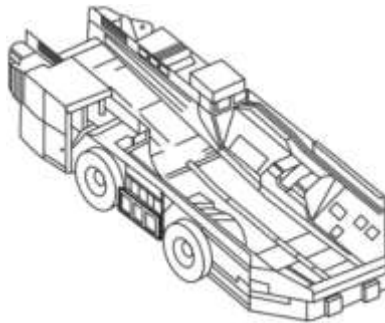


Abbildung 4-12: Shuttlecar, DIN EN ISO 19296 (2018)

Eine Möglichkeit die Beladung zu realisieren, bieten sogenannte Tunnel-Lademaschinen. Mit einer Schaufel ziehen sie das Haufwerk auf einen Ladetisch, von wo es auf einen Kettenkratzförderer gelangt. Dieser transportiert das Material an die Rückseite des Gerätes und hebt es dabei über die Ladekante des Muldenkippers. Das Graborgan hat dabei so hohe Kräfte, dass auch bindiges Material oder Steine geladen werden können. Um den gesamten Querschnitt freizulegen, werden nacheinander die linke und rechte Seite der Strecke bearbeitet (Abbildung 4-13).

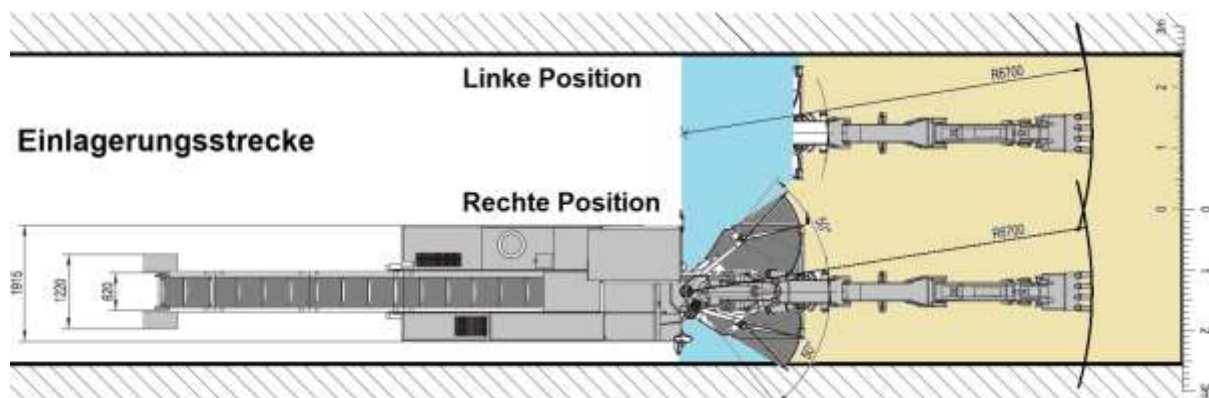


Abbildung 4-13: Tunnel-Lademaschine ITC 120N-F8 beim Freiladen der Strecke zwischen Behältern, ITC (2016)

<b>2B</b>	Der Buffer zwischen zwei POLLUX®-Behältern beträgt ca. (140 fm <sup>3</sup> ) 167 lm <sup>3</sup> . Zur geschätzten Ladezeit von 5 h, die einer Auslastung der Förderkapazität der Tunnellademaschine von 22 % entspricht, muss die Wechselzeit der Transportfahrzeuge addiert werden. Bei einer Länge der ELS von 400 m ist die mittlere Fahrtfernung in der Strecke von 200 m. Diese wird sowohl beim Verlassen der Strecke, als auch bei der Einfahrt in die Strecke absolviert. Bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 10 km/h und der notwendigen Rangierzeit am Verladeausleger, sind insgesamt ca. 3 min je Wechsel bzw. ohne Förderleistung zu veranschlagen. Für das aufgelockerte Volumen werden 14 Zyklen mit 12 m <sup>3</sup> Mulden benötigt. Demzufolge ist die Bruttoarbeitszeit zum Lösen und Laden des Buffers ca. 5,7 Stunden.	
	Entnahme des Buffers zwischen Behältern	5,7 h je POLLUX®-Behälter

Je nach Konsistenz des Buffers sollten angepasste Schaufeln zur Verfügung stehen, um auch mit stark anhaftendem Material umzugehen. Häufig werden dafür besondere Geometrien (Abbildung 4-15) oder sogar Schaufelböden aus Stahlketten (vgl. Abbildung 4-16) verwendet.



Abbildung 4-14: Schaufel mit spezieller Geometrie, Abiljo (2020)



Abbildung 4-15: Schaufelboden aus Stahlketten, Thyssen (2020)

#### 4.3.2.3 Streckensicherung zwischen Behältern (geringer Querschnitt, kurze Standzeit)

Mit der Gewinnung des Buffers werden immer größere First- und Stoßflächen freigelegt, die aufgrund der guten Gebirgseigenschaften und der geringen geplanten Standzeit mit minimalem Ausbau erstellt wurden. In Anbetracht der möglicherweise mehrere Jahrzehnte bestehenden Auffahrung gibt es jedoch potentiellen Sicherheitsbedarf.

Aufgrund der Reichweite der Tunnel-Lademaschine kann der Bediener den Bereich zwischen zwei Behältern freiladen, während die Kabine unter einer gesicherten Firste steht. Im Anschluss wird die Kontur für eine Sichtkontrolle trocken gereinigt, um den Buffer und den Sockel des Behälters nicht aufzuweichen. Die Tunnel-Lademaschine kann nun mittels eines Hydraulikhammers, Firste und Stöße berauben und anschließend das Material laden. Muss die Kontur geankert werden, genügt hier ein einfacher Ankerbohrwagen wie der Epiroc Boltec S der mit einer Lafette von maximal ca. 3 m auszurüsten ist, was eine Ankerlänge von ca. 1,65 m erlaubt (Epiroc, 2018). Alternativ können größere Bohrwagen gewählt werden, um auch in anderen Strecken voll einsetzbar zu sein.

Für den Fall von oberflächigen Auflockerungen kann bewährter Spritzbeton den Nachfall stoppen. Sind diese Auflockerungen tiefgreifender sind eventuell Injektionsmaßnahmen einzusetzen. Aufgrund der geringen Standzeit von einigen Wochen sollte dann in den kleinen Querschnitten sicheres Arbeiten möglich sein.

<b>2C</b>	Die Tunnel-Lademaschine beraubt mit der Schaufel oder einem Hydraulikhammer loses Material und lädt es. Dann verlässt sie den freigelegten Bereich, so dass er geankert werden kann. Ein schmaler Ankerbohrwagen mit z.B. 2,15 m Breite kann langsam an ihr vorbeifahren und sich beliebig in der Strecke positionieren. Aufgrund der hohen Gebirgsqualität wird davon ausgegangen, dass in den kleinen Strecken eine Sicherung mittels Ankern genügt. Beide Tätigkeiten können teilweise parallelisiert werden und werden hier mit insgesamt 2 Stunden abgeschätzt. Mindestens Anker für die Befestigung der Wetterlatten sind zu setzen.	
	Streckensicherung zwischen zwei Behältern	2 h je POLLUX®-Behälter

#### 4.3.2.4 Sicherung des Bentonitsockels unter dem Abfallgebinde

Die Bentonitformsteine des Behältersockels besitzen im Neuzustand eine erhebliche Festigkeit. Da diese mit zunehmender relativer Feuchte deutlich sinkt, sollten Behälter stets trocken freigelegt werden, so dass der Bentonitsockel nicht aufweicht. Darüber hinaus sollte der Rückholvorgang dann binnen weniger Tage erfolgen, so dass auch einer Wasseraufnahme durch die Luftfeuchtigkeit vorgebeugt wird. Kann jedoch eine bereits erfolgte Entfestigung der Steine infolge von hoher Wassersättigung nicht ausgeschlossen werden, sollten weitere Vorkehrungen getroffen werden, bevor der Behälter vollständig freigelegt wird (Garitte et al., 2015). So können z. B. mit dem Freilegen der Seiten eines Behälters dickwandige L- oder U-förmige Bleche zwischen dem abschnittsweise freigelegten Sockel und dem Stoß eingebracht werden, die den Sockel seitlich stützen. Alternativ ist denkbar, dass ein Rahmen eingetrieben bzw. eingebohrt wird, der den Sockel auf beiden Seiten abschließt und somit die Kräfte gegeneinander kompensiert. Weiterhin kann die Abstützung aber auch durch Winkelbleche erfolgen (Abbildung 4-16). Die zusätzlichen Einbauten würden nach der Entnahme des Behälters wieder entfernt.

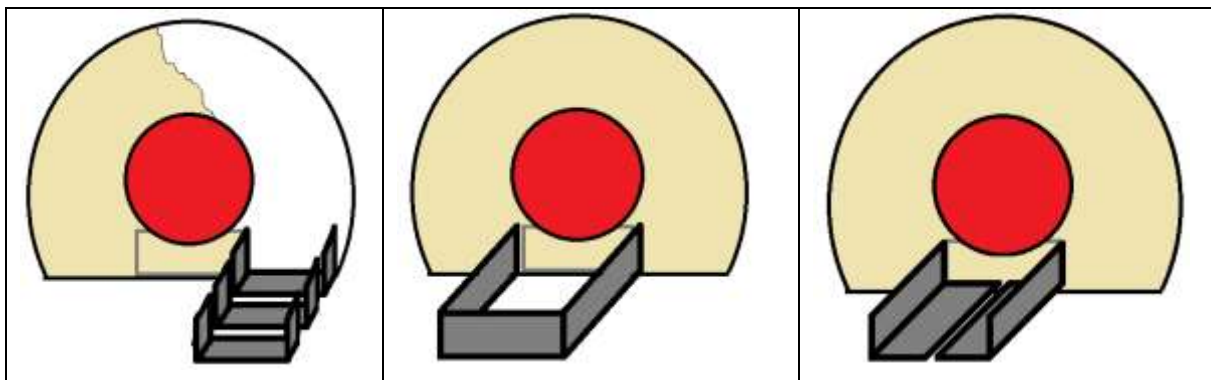


Abbildung 4-16: Prinzipskizzen der Abstützung des Bentonitsockels von POLLUX®-Behältern mit einzelnen U-Blechen (links), einem Rahmen (mitte) oder zwei Winkelblechen (rechts)

<b>2D</b>	Für die Sicherung des Sockels wird hier pauschal 1h je Behälter angenommen. Diese Angabe kann jedoch erst nach Prüfung der Notwendigkeit und der technischen Umsetzung abschließend bewertet werden	
	Sicherung des Sockels vor Entnahme des Behälters	1h je POLLUX®/CASTOR®

#### 4.3.2.5 Entnahme des Buffers um einen Behälter

LTF wie das PFL8 oder PFL10 von PAUS, sind klein genug, um rieselfähigen Buffer auch neben dem Behälter zu laden (Abbildung 4-17). Aufgrund eines maximalen Schaufelvolumens von nur 0,8 oder 1,2 m<sup>3</sup> sollte ein kleines LTF den Buffer in der freien Strecke ablegen, wo es ein größeres Fahrzeug erneut aufnimmt und zu seinem nahegelegenen Bestimmungsort transportiert.



Abbildung 4-17: Sehr schmales Lade- und Transportfahrzeug PFL8, Paus (2020c)

<b>2E'</b>	Die Dauer der Entnahme von ca. 100 fm <sup>3</sup> bzw. 119 lm <sup>3</sup> Buffer um den Behälter wird aufgrund der gegenseitigen Abhängigkeit der beiden LTF und der unvollständigen Füllung des größeren LTF wie 2B' abgeschätzt.	
	Entnahme des trockenen Buffers um einen Behälter	6 h je POLLUX®-Behälter

Muss aufgrund der Übergabe auf Muldenkipper oder aufgrund der Konsistenz des Buffers die Tunnel-Lademaschine genutzt werden, ist eine konstruktive Änderung notwendig (Abbildung 4-18). Die folgende Abbildung verdeutlicht das Manko der Serientechnik. Aufgrund des breiten Ladetisches kann die Maschine neben dem Behälter nicht weit genug nach vorn verfahren werden und verliert an Reichweite des Baggerauslegers. Während dies für die gewählten CASTOR®-Behälter noch weit genug ist, kann sie so den hinteren Teil eines POLLUX® nicht freiladen.

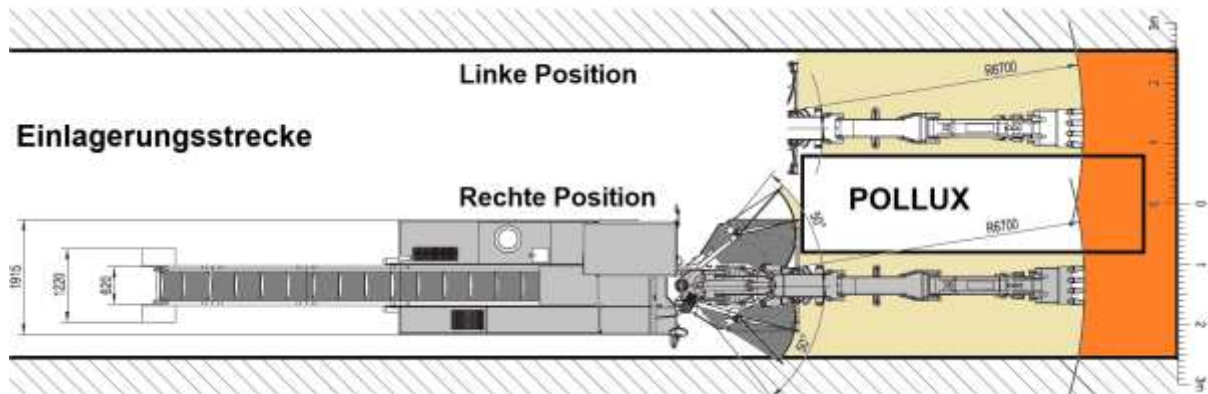


Abbildung 4-18: Tunnel-Lademaschine ITC 120N-F8 beim Freiladen eines POLLUX®-Behälters für die Rückholung aus der Einlagerungsstrecke, ITC (2016)

Durch einen schmaler ausgeführten Ladetisch könnte die Maschine bis zu 2 m weiter nach vorn fahren und so auch das hintere Ende der POLLUX® erreichen (vgl. Abbildung 4-19). Eine weitere Verbesserung wäre ein drehbarer Ausleger, mit dessen Hilfe auch die Stöße oder sogar die Firste besser zu erreichen sind. Ist eine Seite freigeladen, kommt ein Kompaktbagger zum Einsatz. Dieser fährt neben dem Behälter bis an den Buffer und legt von dort die Rückseite des Behälters frei. Primäres Ziel ist es, dieses Material an die Lademaschine zu übergeben. Dafür kann es notwendig sein, erst einen Teil des Buffers neben den Behälter zu ziehen um genügend Freiraum für die Übergabe auf die andere Seite der Strecke zu schaffen. Der Bagger ist darüber hinaus in der Lage Überhänge des Buffers zu beseitigen.

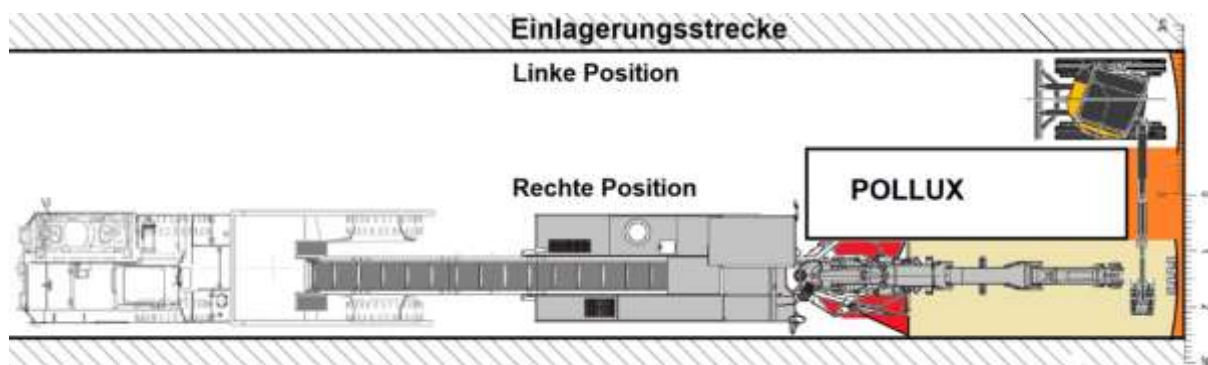


Abbildung 4-19: Freilegen des POLLUX®-Behälters durch Lademaschine mit geändertem Ladetisch und Kompaktbagger nach ITC (2016) und Volvo (2020) sowie Übergabe auf PAUS Muldenkipper Paus (2020b)

<b>2E</b>	Das Laden der ca. 100 m <sup>3</sup> Buffer um den Behälter wird mit der gleichen Zeit veranschlagt, wie für den Bereich zwischen den Behältern (2B), da der Behälter zusätzlichen Aufwand erzeugt. Für den Wechsel der Muldenkipper wird trotz geringerer Anzahl von Fahrspielen ebenfalls keine veränderte Zeit angenommen.	
	Entnahme des Buffers um einen Behälter	5,7 h je POLLUX®-Behälter



Ist die Übergabe des Materials hinter dem Behälter für den Kompaktbagger nicht möglich, kann es alternativ vor das Saugrohr eines Saugbaggers geladen werden. In diesem Fall wird der Buffer durch eine Saugleitung mit einem Durchmesser von ca. 250 mm direkt in den Behälter auf einem LKW befördert, so dass das Material dann direkt aus der ELS transportiert werden kann. Bei einem Saugbagger mit einem Behälter von ca. 10 m<sup>2</sup> (vgl. Abbildung 4-20) lässt sich der Buffer an der Rückseite des Behälters in einem Arbeitsschritt entfernen. Für eine einwandfreie Funktion des Saugschlauches ist auf genügend Freiraum neben dem Bagger zu achten. Eventuell muss ein kleinerer Bagger oder eine Führung des Schlauches genutzt werden, so dass dieser nicht beschädigt wird.



Abbildung 4-20: Saugbagger mit Saugleitung und Behälter für mehrere Kubikmeter Aushub, MTS (2020)

Aufgrund der schmalen ELS und der Sonderbewetterung ist davon auszugehen, dass nur ein Muldenkipper oder ein Saugbagger in der ELS eingesetzt werden kann, wodurch die Leistung der Lademaschine nicht voll ausgeschöpft wird. Daher sollte das jeweilige Transportfahrzeug möglichst groß gewählt werden, um die Anzahl der Wechsel gering zu halten.

#### 4.3.2.6 Streckensicherung um einen Behälter (geringer Querschnitt, kurze Standzeit)

Für das Anker ist ein Ankerbohrwagen mit möglichst langem Bohrarm notwendig, damit auch die Firste und der obere Teil der Stöße selbst im hinteren Bereich des Behälters bzw. mindestens 6 m über die Stützen hinaus gesichert werden können. Aufgrund der geringen Streckenhöhe von minimal ca. 3,3 m am Rand, ist eine Lafette mit ca. 3 m Länge gerade noch in der Strecke zu handhaben. Damit ließen sich bis zu ca. 1,6 m lange Anker verwenden. Die Kombination des großen Bohrwegens mit der kleinen Lafette ist nicht ab Werk vorgesehen und muss daher gesondert hergestellt werden.

<b>2F</b>	Wie im Abschnitt zwischen den Behältern birgt die zeitliche Abschätzung der Sicherungsmaßnahmen große Unsicherheiten. Auch hier wird die Kontur beraubt und gereinigt. Im Gegensatz zum vorherigen Abschnitt ist zwingend ein Ankerbohrwagen mit großer horizontaler Reichweite nötig, um die Firste und den oberen Bereich der Stöße im Bereich des Behälters zu sichern. Hierfür werden erneut insgesamt 2 Stunden abgeschätzt. Mindestens Anker für die Verlängerung der Wetterlutten sind zu setzen.	
	Streckensicherung um einen Behälter	2 h je POLLUX <sup>®</sup> -Behälter

Ist die Strecke bis an das hintere Ende des Behälters freigeladen und gesichert, sind alle Maschinen aus der Strecke zu entfernen, da die mELVIS die gesamte Streckenbreite beansprucht. Aus diesem Grund sollten selbstfahrende Maschinen bevorzugt werden. Aufgrund der geringen Geschwindigkeit und ihrer Position an der Gewinnungsfront sollte die Lademaschine möglichst nahegelegen abgestellt werden, so dass sie für den nächsten Abschnitt direkt wieder verfügbar ist. Aufgrund ihrer geringen Fahrgeschwindigkeit ist es sinnvoll auch die mELVIS in einem benachbarten Grubenraum abzustellen, während Sockel und Buffer entfernt werden.

#### 4.3.2.7 Verlängerung der Wetterlутten

Jeweils nach der Entnahme des Gebindes wird die Bewetterung der ELS angepasst. Dazu ist es notwendig, die Lутtenleitung(en) zu verlängern. Sie werden an dafür vorgesehenen Ankern im Zentrum des Streckenprofils aufgehängt.

<b>2G</b>	Die Bewetterung sollte mit der Rückholung Schritt halten. Dazu wird die Lутtenleitung verlängert. Die zugehörigen Arbeiten werden mit 1 Stunde je Behälter abgeschätzt. Dafür muss die Vorbereitung der Tätigkeit bereits parallel erfolgen.	
	Ca. 13 m Verlängerung der Lute	1 h je POLLUX®-Behälter

#### 4.3.3 Rückbau des Widerlagers einer ELS

Das am Anfang jeder ELS, aus niedrig-pH-Beton erstellte Widerlager besitzt bei einem Profil von ca. 3,5 x 5,15 m und einer Länge von 4,5 m ein Volumen von etwa 90 m<sup>3</sup>.

Um das Widerlager mittels Bohren und Sprengen zu öffnen, werden vier Abschlüge geplant. Je Abschlag werden das Sprengbild gebohrt, Sprengstoff geladen, die Sprengung abgetan, die Strecke ausgewettert, das Haufwerk geladen und die Kontur gesichert. Abschließend erfolgt dann auch die Erweiterung der Bewetterung durch die Installation zusätzlicher Wetterlутten. Der Einfluss der Sprengungen auf die Behälter wird einerseits durch die Plastizität und die Restporosität des Buffers sowie durch die Verwendung kleiner, gut verteilter Ladungen minimiert. Aufgrund der Streckenabmessungen genügen ein kleiner Bohrwagen sowie ein Sprengstofftransportfahrzeug mit Bühne von der aus besetzt wird. Das stückige Haufwerk kann mit Hilfe von LTF geladen und abtransportiert werden.

Soll das Widerlager z. B. zum Schutz von Einbauten im Querschlag, nicht gesprengt werden, kann es mittels Hydraulikhammer oder Anbaufräse an einem Tunnelbagger oder eventuell an der Tunnel-Lademaschine mechanisch gewonnen werden.

<b>3A...D</b>	Sprengung des Widerlagers in 4 Abschlügen. Es wird angenommen, dass ein Abschlag je 8h möglich ist. In dieser Zeit wird bereits geladen und abtransportiert, sowie bedarfsgerecht die Kontur gesichert. Die Arbeitszeit beträgt somit.	
	Alternativ wir davon ausgegangen, dass ein Tunnelbagger mit einer Masse von ca. 30 t und ein zugehöriger Hydraulikhammer bzw. eine Fräse eine Produktionsleistung von 3 m <sup>3</sup> /h im Beton ermöglichen. Damit wäre der mechanische Lösevorgang genauso schnell wie das Bohren und Sprengen. Bestenfalls eignet sich dafür die Tunnel-Lademaschine, die dann auch direkt das Haufwerk verlädt.	
	Rückbau des Widerlagers einer ELS	32 h je Widerlager

#### 4.3.4 Aufwältigung von Querschlägen

Die Länge eines Querschlages von ca. 400 m wird in Auffahrungsabschnitte geteilt, die jeweils sicheres Arbeiten ermöglichen. Aufgrund der Reichweite der Tunnellademaschine ist nach je 6 m freigelegter Strecke eine Sicherung vorzunehmen. Die Maschine bearbeitet die linke und rechte Seite jedes Abschnitts getrennt (vgl. Abbildung 4-21) und legt dabei jeweils ca. 15 m<sup>2</sup> Streckenquerschnitt frei.

Links	L1	L2	L3	L4	L5	...
Rechts	R1	R2	R3	R4	R5	...
	0 m	6 m	12 m	18 m	24 m	30 m

Abbildung 4-21: Schema der Auffahrungsabschnitte im Querschlag

Die 90 m<sup>3</sup> Versatz je Abschnittseite können in 2,5 h geladen werden. Danach wird mit der Tunnellademaschine in ca. 0,5 h loses Gestein von der Kontur geraubt. Aufgrund der breiteren Strecken entstehen nur geringe Wartezeiten beim Wechsel der Muldenkipper, die hier bereits inkludiert sind. Im Anschluss verfährt die Lademaschine auf die andere Seite und beginnt erneut. Für diesen Abschnitt wird die gleiche Zeit noch einmal benötigt.

<b>4A</b>	Entnahme von 180 m <sup>3</sup> Versatz für einen Abschnitt	6 h je Abschnitt
-----------	---	------------------

Querschläge verfügen aufgrund der großen Querschnitte und einer geplanten mittleren bis langen Standzeit bereits während der Einlagerung über eine Systemankerung und Spritzbeton um die Kontur zu sichern. Ist der Zustand der Anker, der Kontur oder der Auflockerungszone kritisch, müssen lose Gesteinsbereiche gelöst und eine neue Gebirgssicherung hergestellt werden. Während Firste und Stöße stückweise freigelegt werden, kann die Tunnel-Lademaschine die Qualität der Kontur prüfen. Wird hierbei der Bedarf einer Ankerung deutlich, kann der zuvor beschriebene Ankerbohrwagen genutzt werden. Der Ankerbohrwagen nimmt die vorherige Position der Lademaschine ein. Aufgrund der parallelen Arbeitsweise wird für die erste Hälfte des Abschnitts keine zusätzliche Zeit benötigt. Für die zweite Hälfte ist dies nicht möglich, so dass hier 1 h Ankerarbeiten geschätzt werden.

<b>4B</b>	Gebirgssicherung (Ankerung) eines 6 m Abschnittes	1 h je Abschnitt
-----------	---	------------------

Da Spritzbetonarbeiten die Sicht beeinträchtigen wird bei Bedarf jeweils ein gesamter Abschnitt mit ca. 100 m<sup>2</sup> freigelegter First- und Stoßfläche mit Spritzbeton gesichert. Vorbereitend wird die Kontur gereinigt, so dass der Beton gut haftet. Mit einem Spritzmobil wie z. B. dem Normet Spraymec SF 050 D können theoretisch 4...19 m<sup>3</sup>/h Beton bzw. innerhalb von maximal 2 h eine durchschnittliche Schichtdicke von 8 cm auf die gesamte Fläche aufgetragen werden.

<b>4C</b>	Spritzbetonieren eines Abschnittes mit ca. 8 cm auf 100 m <sup>2</sup>	2 h je Abschnitt
-----------	--	------------------

Die Bewetterung sollte mit dem Vortrieb schritthalten. Dazu werden die Wetterlatten nach Möglichkeit etwa nach jedem zweiten Abschnitt, also um ca. 12 m verlängert. Dazu werden sie an Firstankern befestigt und mit den bereits vorhandenen Latten verbunden. Die zugehörigen Arbeiten werden mit 2 Stunden abgeschätzt.

<b>4D</b>	Ca. 12 m Verlängerung der Lutte	2 h nach je 2 Abschnitten
-----------	---------------------------------	---------------------------

Querschläge verfügen über eine deutlich größere Breite und insgesamt größere Querschnitte als die ELS. Das Lösen des Versatzes wird aber vor allem günstig beeinflusst, da es sich um eine vollständige Lockergesteinsfüllung handelt, bei der eine Technologie reicht, um die gesamte Strecke freizulegen. Der Versatz besteht aus einem tonigen Material, bei dem es sich gemäß einer Arbeitshypothese um ein Gemisch aus 30 % Bentonit und 70 % schotterartig aufbereitetem Haufwerk handelt. Neben der Verzögerung des Flüssigkeitstransports dient er vor allem auch dem Widerstand gegen das konvergierende Gebirge. Aufgrund der Zusammensetzung und der angenommenen Verfestigung des Versatzes wird mit einem erhöhten Grabwiderstand gerechnet. Daher kann der Versatz nicht mit LTF geladen werden. Eine, wie zuvor beschriebene, Tunnel-Lademaschine mit Baggerausleger ist dagegen gut geeignet, den Querschnitt freizulegen. Sie belädt Muldenkipper, die in diesem Streckenquerschnitt nun im Gegenverkehr arbeiten können, wodurch die Produktivität gegenüber den ELS deutlich ansteigt. Die Bewetterung und die verwendeten Maschinen sind aufeinander abzustimmen. Zur Vereinfachung der Arbeiten in der ELS sollte der Querschlag über die letzte relevante ELS hinaus aufgeföhren werden. Auf diese Weise ergibt sich die Möglichkeit zum Rangieren bzw. zum Abstellen von Geräten. Ein vollständiger Durchschlag zur anderen Richtstrecke kann darüber hinaus die Bewetterung und die Sicherheit verbessern.

Für eine geringe Anzahl rückzuziehender Behälter ist es nicht notwendig eine Verladestation im Querschlag zu installieren. Diese können mit Hilfe der mELVIS auch bis in die Richtstrecken verfahren werden. Ein solcher Vorgang sollte jedoch nicht die Rückholung oder Einlagerung weiterer Behälter verzögern. Ist eine größere Anzahl von Behältern rückzuziehen, werden Gleise bis in den Querschlag installiert, sobald er auf der gesamten geplanten Länge freigelegt ist. Dabei wird das gleiche Schienensystem wie bei der Einlagerung verwendet und mit dem vorhandenen Gleis der Richtstrecke verbunden. Nach Herold et al. (2018) werden die Verladepunkte der Behälter, im Querschlag zwischen Richtstrecke und erster ELS eingerichtet, insofern keine weiteren Gleise vorhanden sind. Es wird angenommen, dass das Verlegen einer Weiche, einer anschließenden ca. 90° Kurve sowie weiteren 15 m Gleis binnen 5 Schichten möglich sind (Engelmann & Filbert, 1995).

<b>4E</b>	Erstellung eines Abzweiges von der Richtstrecke und einer einfachen Verladestelle im Querschlag	40 h je Querschlag
-----------	---	--------------------

#### 4.3.5 Rückbau des Widerlagers eines Querschlages

Die Widerlager der Querschläge ähneln denen in den ELS. Da hier jedoch größere Streckenprofile freigelegt werden, kann die Abschlagszeit nur bei leistungsfähigerer Technik gewährleistet werden. Um den notwendigen Maschinenpark nicht zu komplex werden zu lassen, wird stattdessen von einer 50 % längeren Arbeitszeit ausgegangen. Demnach wird das Widerlager zwar auch in 4 Abschlügen gesprengt, jedoch dauert ein Zyklus hier 12 h bzw. insgesamt 48 h.

Wird alternativ die mechanische Gewinnung gewählt, so ist auch hier, entsprechend des größeren Querschnitts mit einer 50 % längeren Arbeitszeit zu rechnen.

<b>5A...D</b>	Sprengung des Widerlagers in 4 Abschlügen. Es wird angenommen, dass ein Abschlag je 12h möglich ist. In dieser Zeit wird bereits geladen und abtransportiert, sowie bedarfsgerecht die Kontur gesichert. Die Arbeitszeit beträgt somit 48 h.	
	Alternativ wir davon ausgegangen, dass ein Tunnelbagger mit einer Masse von ca. 30 t und ein zugehöriger Hydraulikhammer bzw. eine Fräse eine Produktionsleistung von 3 m <sup>3</sup> /h im Beton ermöglichen. Damit wäre der mechanische Lösevorgang genauso schnell wie das Bohren und Sprengen. Bestenfalls eignet sich dafür die Tunnel-Lademaschine, die dann auch direkt das Haufwerk verlädt.	
	Rückbau eines Widerlagers im Querschlag	48 h je Widerlager

#### 4.3.6 Aufwältigung von Richtstrecken

Aufgrund gleicher Querschnitte der Querschläge und der Richtstrecken zum Gebindettransport, wird jeweils die gleiche Vortriebsgeschwindigkeit und -technologie angenommen. Dementsprechend werden folgende Teilschritte und Arbeitszeiten übernommen.

Aus einem 6 m langen Streckenabschnitt werden ca. 180 m<sup>3</sup> Versatz binnen 6 h entnommen.

<b>6A</b>	Entnahme von 180 m <sup>3</sup> Versatz aus der Strecke	6 h je Abschnitt
-----------	---	------------------

Die Gebirgssicherung einer Seite eines 6 m langen Streckenabschnittes durch Ankerung erfolgt parallel zur Entnahme des Versatzes auf der anderen Seite. Für die nicht parallelisierbare Ankerung der zweiten Seite wird 1 h Arbeitszeit angenommen.

<b>6B</b>	Gebirgssicherung (Ankerung) der Kontur	1 h je Abschnitt
-----------	--	------------------

Die Gebirgssicherung wird bei Bedarf durch eine etwa 8 cm starke Spritzbetonschicht ergänzt. Für die ca. 100 m<sup>2</sup> freigelegter First- und Stoßfläche pro Abschnitt wird eine Arbeitszeit von 2 h angenommen.

<b>6C</b>	Spritzbetonieren eines Abschnittes mit ca. 8 cm auf 100 m <sup>2</sup>	2 h je Abschnitt
-----------	--	------------------

Die Bewetterung wird mit dem Vortrieb verlängert. Dazu werden jeweils nach zwei aufgewältigten Abschnitten die Wetterlütten um 12 m verlängert. Die zugehörigen Arbeiten werden mit 2 Stunden abgeschätzt.



<b>6D</b>	Ca. 12 m Verlängerung der Lutte	2 h nach je 2 Abschnitten
-----------	---------------------------------	---------------------------

**Gebindetransportstrecke:**

Im Gegensatz zu Querschlägen, sollten die langen Distanzen der Richtstrecken bis zum Schacht nicht mit der Rückholvorrichtung zurückgelegt werden. Der Transport auf Gleisen ist ohnehin notwendig, um Behälter aus dem Endlager zu fördern, so dass die Vorteile der batteriegetriebenen Lokomotive auch bis in das Endlager hinein genutzt werden sollten. Die Auf-fahrung einer doppelten Richtstrecke inklusive der dazwischenliegenden Querschläge ermöglicht eine Trennung des Förderstromes von der Förderung der Abfallgebände. Außerdem ermöglicht es während der Aufwältigung das Rangieren und damit auch, dass Fahrzeuge den größten Teil der Strecke in Vorwärtsfahrt absolvieren. Ist es möglich, die Installation von Gleisen parallel zum Vortrieb durchzuführen und die Versatztransporte z.B. in der benachbarten Abwetterstrecke durchzuführen, wird nur die Zeit zusätzlich benötigt, die der Gleisbau dem Vortrieb nacheilt. Unter der Voraussetzung, dass die Strecke bis zum letzten relevanten Querschlag freigelegt wurde und Querschläge in der doppelten Richtstrecke maximal 400 m entfernt liegen, wird davon ausgegangen, dass der nacheilende Gleisbau noch die Zeit für diese 400 m benötigt. Nach Engelmann & Filbert (1995) waren auf der Schachtanlage Sigmundshall 4 – 6 Personen in der Lage 12 m Streckengleis pro Schicht zu verlegen (Engelmann & Filbert, 1995). Entsprechend ist von ca. 35 Schichten auszugehen.

<b>6E</b>	<b>Gleisbau:</b> Parallelisiertes Verlegen von 400 m Gleis durch ca. 12 Personen ohne weitere Tätigkeiten in der Strecke	35 Schichten je 400 m
-----------	--	-----------------------

**Bergbaustrecke:**

Die Richtstrecke am anderen Ende des Einlagerungsfeldes, die während der Einlagerung als Bergbaustrecke bezeichnet wurde, besitzt einen um 40 % größeren Querschnitt. Vereinfachend wird angenommen, dass der Zeitbedarf für jede der Tätigkeiten A...D um 40 % bzw. im gleichen Maße für die Aufwältigung dieser Richtstrecke steigt. Unberücksichtigt bleibt dabei sowohl eine eventuelle Veränderung des Maschinenparks, um diese Steigerung zu verkleinern, aber auch die eventuelle Notwendigkeit, die Technologie, z. B. durch kürzere Arbeitsabschnitte, anzupassen.

**Abwetterstrecke:**

Die gleiche Verfahrensweise wird für den 45 % größeren Querschnitt der Abwetterstrecke herangezogen. Demnach sind hier die Arbeiten zur Aufwältigung um 45 % größer als in Querschlägen bzw. Gebindetransportstrecken.

**Weitere Aspekte:**

Falls ein oder mehrere Behälter aus einem weit hinten liegenden Einlagerungsfeld entnommen werden müssen, sollten die Richtstrecken zunächst bis zu dem zugehörigen Querschlag auf-fahren werden und nur dieser verbindende Querschlag freigelegt werden. Sind Behälter aus verschiedenen Feldern zu entnehmen, bietet es sich dagegen an, die erste durchschlägige Bewetterung herzustellen um die Vorteile einer solchen Wetterführung und die Möglichkeit zum parallelen Arbeiten in Richtstrecke, Querschlag und ELS zu nutzen.

Ist das Endlager bereits so weit verfüllt, dass die zu bewegendenden Massen nicht im verbliebenen Grubengebäude gelagert werden können, sind zwei Optionen denkbar. Entweder neue Grubenräume werden aufgefahren, in denen der Versatz für den späteren Einsatz untertage verbleibt oder der Versatz wird ausgefördert und in einem eingerichteten Kontrollbereich über Tage angemessen gelagert.

Treten im Festgestein Bereiche mit einer Wasserströmung auf, so sind die Streckenverfüllungen beidseitig dieser Störung so herzustellen, dass es nicht zur Auswaschung des Bentonits aus dem Versatz kommt. Dazu wird das Versatzmaterial beidseitig dieser Störung von einem Bentonitdichtelement mit jeweils beidseitigen Filterschichten flankiert, während der Störungsbereich selbst mit einem wasserdurchlässigen Schotter gefüllt ist (Jobmann & Burlaka, 2019). Wird dieser Bereich im Rahmen der Rückholung erneut angefahren, sollte ein Wassereintritt vermieden werden. Zunächst wird durch mindestens eine Probebohrung das Wasserangebot geprüft. Ist der Zustrom zu groß, kann durch vorausseilende Injektionen das Gebirge lokal abgedichtet werden. Die eventuell auf diese Weise verfestigte Versatz kann dann z.B. mittels Hydraulikhammer oder durch Bohren und Sprengen geöffnet werden. Geringe Mengen Wasser können mittels eines lokalen Pumpensumpfes gefasst werden. Kommt es zur Wiedereinlagerung und dem erneuten Verfüllen des Streckenabschnitts, können diese Bereiche z.B. durch Auflockerungssprengungen oder Lösen von Gestein durchlässiger gemacht werden.

#### 4.4 Technische Umsetzung der Rückholung für MOSAIK®-Behälter

Da MOSAIK®-Behälter mit Strukturteilen ausgedienter Brennelemente keine Wärme entwickeln und eine geringere Größe haben, nehmen sie innerhalb des Endlagers nur wenig Raum ein. Mit 22 % ist ihre Anzahl jedoch nennenswert. Im Folgenden werden die Elemente der technischen Umsetzung der Rückholung vorgestellt, die von der Rückholung von POLLUX®- und CASTOR®-Behältern (Abschnitt 4.3) abweichen, siehe Tabelle 4-5. Dazu zählen die Prozessschritte (1) und (2). Um die Abweichung deutlich zu machen werden diese im Folgenden mit (M1) und (M2) und dem jeweiligen Teilschritt bezeichnet (vgl. Beginn Abschnitt 4.3).

Tabelle 4-5: Gliederung der Prozessschritte bei der Rückholung von MOSAIK®-Behältern

Prozessschritte der Rückholung von MOSAIK®	Prozessschritte				
	A	B	C	D	E
<b>(M1) Aufnahme von Behältern und Transport zum Schacht</b>	Grobe Reinigung der Behälter	Entnahme von Behältern aus der ELS	Gleistransport zum Füllort des Schachtes		
<b>(M2) Freilegen von Behältern</b>	Entnahme des Buffers zwischen Behältern	Streckensicherung zwischen Behältern	Sicherung des Bentonitsockels	Freilegen einer neuen Behälterreihe	Verlängerung der Wetterlütten

#### 4.4.1 Aufnahme von Behältern und Transport zum Schacht

Für ihre Rückholung, werden zunächst leere Spezialpaletten mit Plateauwagen bis mindestens zum Querschlag transportiert. Während im öffentlichen Straßenverkehr nur mit einer Haube geschlossene Transportpaletten genutzt werden, sind für den innerbetrieblichen Umschlag auch offene Tauschpaletten zulässig. Beide Typen können von einem gummibereiften Stapelfahrzeug abgeladen und zum Gebindestapel weitertransportiert werden. Der Richtungswechsel des Staplers erfolgt über eine Wendetasche in der ELS. Nachdem gegebenenfalls die Containerhaube entfernt wurde, können die MOSAIK®-Behälter paarweise auf die Palette verladen werden.

Auch diese Behälter werden vor ihrer Verladung gereinigt. Dazu entnimmt sie das Stapelfahrzeug jeweils einzeln aus dem Stapel und legt sie nacheinander auf einer Reinigungsvorrichtung ab. Aufgrund der großen Anzahl von Behältern auf einer kleinen Fläche soll eine Sonderkonstruktion den Reinigungsvorgang vereinfachen und beschleunigen. Die Funktion des Hilfsgerätes besteht in der Reinigung und der Magazinierung einiger weniger Behälter zur einfachen Entnahme.

<b>M1A</b>	Die Reinigung der Behälter erfordert die mehrfache Handhabung jedes Gebindes. Es wird angenommen, dass dadurch ein zusätzlicher Zeitbedarf von 6 min je Behälter entsteht. Bei geschätzten 15 Behältern je Reihe (3 je Stapel und 5 Stapel nebeneinander) sind es insgesamt 90 min.	
	Grobe Reinigung der Behälter	90 min je MOSAIK®-Reihe

Im Anschluss werden die Behälter von der Reinigungsvorrichtung entnommen und auf Paletten abgelegt. Je nach Art wird die gefüllte Palette eventuell mit der Haube verschlossen und die Transporteinheit dann vom Stapelfahrzeug wieder auf den Plateauwagen verladen. Von hier kann sie mit einer batteriegetriebenen Lokomotive zum Schacht transportiert werden. Für einen reibungslosen Transport bietet es sich an, das Gleis bis an die ELS zu verlängern bzw. die MOSAIK®-Behälter nahe der Gebindestrecke einzulagern. Dies minimiert die Zeit für den häufigen Weg zur Verladestelle.

<b>M1B</b>	Aufgrund der Wendebucht in der Strecke befinden sich die Behälter eher im hinteren Teil der Strecke. Im Durchschnitt wird angenommen, dass sie in 250 m Entfernung zum Querschlag liegen. Sind die Behälter gut aus dem Stapel zu nehmen und die Fahrbahn gut befahrbar, wird geschätzt, dass	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• der Fahrweg zwischen Gleis und Gebindestapel</li> <li>• die Entnahme zweier Behälter inkl. Ablegen auf der Reinigungsmaschine und die Verladung zweier gereinigter Behälter</li> <li>• das eventuelle Öffnen und das Schließen der Transportpalette</li> <li>• der Rücktransport der Palette zum Gleis</li> </ul> jeweils 5 min, also insgesamt 20 min, benötigen. Bei geschätzten 15 Behältern je Reihe sind das 5 h	
	Entnahme von Behältern aus der ELS	5 h je MOSAIK®-Reihe



Der Gleistransport von MOSAIK®-Behältern entspricht weitgehend dem von POLLUX®- oder CASTOR®-Behältern (1C). Im Unterschied werden jedoch jeweils zwei Paletten je Plateauwagen verladen, was die Anzahl der Gleistransporte reduziert und die Kapazität erhöht. Für den Fall, dass die Transportdauer auf dem Gleis die Verladezeit von zwei Paletten dennoch übersteigt, sind z.B. mehrere Lokomotiven und Überholstellen oder eine Verladestelle für weitere Behälter vorzusehen.

<b>M1C</b>	Die Transportgeschwindigkeit auf dem Gleis beträgt ca. 3 m/s. Werden jeweils zwei Paletten bzw. vier Behälter transportiert, ergibt sich ein mittleres Zeitfenster von ca. 1,5 h bis zum nächsten Transport. In dieser Zeit kann die Lokomotive auch Entfernungen von mehreren Kilometern überwinden. Da der Transport des Gebindes mit der Lokomotive dann parallel zur weiteren Rückholung erfolgen kann, wirkt er sich nicht auf die Rückholzeit je Behälter aus.	
	Gleistransport zum Füllort des Schachtes	0 h je Behälter

#### 4.4.2 Freilegen von Behältern

##### 4.4.2.1 Entnahme des Bentonitsockels

MOSAIK®-Behälter lagern auf einer Schicht aus Bentonit. Diese wird nicht gesondert als „Sockel“ entfernt, sondern in Kombination mit dem Buffer, der bei der Entnahme der Behälter anfällt. Die entsprechenden Schritte werden im folgenden Kapitel beschrieben.

##### 4.4.2.2 Entnahme des Bentonits zwischen Behältern

In MOSAIK®-ELS füllt der Buffer nur kleine Räume zwischen den Behältern, sowie einen mindestens 0,3 m breiten Streifen entlang der Streckenkontur, sowie den verbleibenden Hohlraum um die Behälter. Nachdem eine Reihe Behälter entnommen wurde, wird die Sohle vom Buffer freigeladen. Hinzu kommen die Massen, die bei der Entnahme und Reinigung der vorhergehenden Behälterreihe verblieben sind. Wird davon ausgegangen, dass die Behälterreihen 1 m Abstand zueinander haben, ergeben sich dafür folgende Volumina. Bei einem Querschnitt von ca. 43,5 m<sup>2</sup> besitzt die Strecke ein Volumen von 43,5 m<sup>3</sup> je Streckenmeter. Darin befinden sich 15 Behälter mit einem Volumen von je 1,18 m<sup>3</sup> bzw. insgesamt 17,7 m<sup>3</sup>. Der Buffer nimmt daher im fest gelagerten Zustand ein Volumen von ca. 26 fm<sup>3</sup> ein, dass sich beim Laden auf ca. 31 lm<sup>3</sup> auflockert. Können die Behälter enger gestellt oder die Strecke verkleinert werden, lässt sich der Buffer weiter reduzieren.

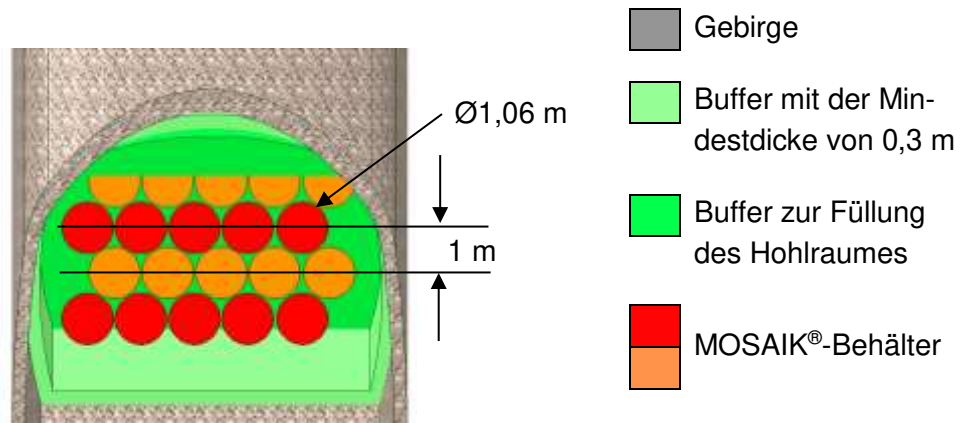


Abbildung 4-22: Draufsicht der Streckenlagerung stehender MOSAIK®-Behälter

Die Entnahme des auf der Sohle befindlichen Bentonits erfolgt ähnlich dem Prinzip der Entnahme des Buffers in POLLUX®-ELS. Schüttgutartiges Material würde mit LTF geladen. Aufgrund der Streckenhöhe kann es nicht nur direkt, sondern auch in Kombination mit Muldenkippern abtransportiert werden. Ist das Lösen oder Entladen mit Schwierigkeiten verbunden, kann eine Tunnellademaschine bzw. ein Mobilbagger das Material auf Muldenkippern laden. Hierfür werden je Behälterreihe 1,5 h angenommen.

<b>M2A</b>	Das Volumen von ca. 31 $\text{Im}^3$ kann mit einem großen LTF mit ca. 6 Fahrspielen aus der ELS entnommen werden. Dazu werden jeweils 15 min benötigt. Es wird angenommen, dass eine Lademaschine bei einer Auslastung von 23 % ebenfalls etwa 1,5 h benötigt.	
	Entnahme des Buffers zwischen Behältern	1,5 h je MOSAIK®-Reihe

#### 4.4.2.3 Streckensicherung in der MOSAIK®-ELS (mittlerer Querschnitt, kurze Standzeit)

Nachdem der Sohlenbereich weit genug freigeladen ist, werden Sicherungsarbeiten durchgeführt. Gemäß zuvor genannter Annahmen wurde in diesen ELS aufgrund ihrer Größe für die Einlagerung eine Systemankerung vorgenommen. Wurden hierbei Dauer-Einstab-Anker mit entsprechender Verbindung zum Gebirge verwendet, ist in den ersten 100 Jahren nicht mit einem Versagen der Anker zu rechnen (DYWIDAG, 2019). Unabhängig vom Ankertyp sollte mindestens eine Sichtkontrolle der Strecke erfolgen, um über den Sicherungsbedarf zu entscheiden, da es in der Verbindung von Anker und Gebirge ebenfalls zum Ausfall von Ankern kommen kann. Dazu wird die Kontur zunächst mit einer rotierenden Bürste bzw. mit Luft gereinigt. Ist das Gebirge offensichtlich deformiert, sind Risse sichtbar oder ragen Gesteinsstücke in die Strecke, müssen weitere Schritte der Gebirgssicherung folgen. Zunächst werden augenfällige Stellen geprüft und von losem Material befreit. Aufgrund des Festgesteins ist es sinnvoll ein Beraubefahrzeug mit Hydraulikhammer zu nutzen, Abbildung 4-23 zeigt beispielhaft ein vergleichbares Fahrzeug aus dem konventionellen Bergbau.



Abbildung 4-23: Beraubefahrzeug PAUS 1253 S10 mit Hydraulikhammer, Paus (2020d)

Ist die Kontur oberflächlich brüchig, wird eine Spritzbetonschicht zur Sicherung empfohlen. Diese kann mit Abstand zu den Behältern erfolgen, so dass diese nicht zusätzlich verunreinigt werden.

Wenn nötig, erfolgt die Ankersicherung der Firste und der Stöße mit einem Ankerbohrwagen wie dem EPIROC Boltec E (Epiroc, 2020b). Die Ankerung der Strecke erfolgt je nach Bedarf nach jeder entnommenen Reihe von MOSAIK®-Behältern. Dabei müssen nur so viele Behälter entnommen werden, dass die Lafette mit ca. 3 m Länge angesetzt werden kann. Die weiteren Behälter können dann unter dem ertüchtigten Ausbau entnommen werden. Bei guter Beschaffenheit genügt die Ankerung nach dem Entfernen aller Behälter. Werden die Stöße und die Firste jeweils mit einem Abstand von 1,4 m in jeder Behälter-Reihe geankert, entspricht das insgesamt 15 Anker.

<b>M2B</b>	Das Säubern der Kontur wird mit 1 h abgeschätzt. Es folgen 1 h für das Berauben und 1 h für die Ankerung.	
	Streckensicherung einer MOSAIK®-Reihe	3 h je MOSAIK®-Reihe

#### 4.4.2.4 Sicherung des Bentonitsockels in Strecken mit MOSAIK®-Behältern

Ist zu befürchten, dass die Behälterstapel bei der Entnahme instabil werden, weil sie z. B. nichtmehr ihre ursprüngliche Lage haben, so sollte der Sockel nicht bis an die Behälter heran entfernt werden. Zusätzlich könnten die Reihen stufenartig entnommen werden, so dass hintereinanderliegende Reihen maximal 1 Behälter Höhendifferenz haben. Die notwendige Reichweite muss für das Stapelfahrzeug berücksichtigt werden.

<b>M2C</b>	Die zusätzliche Arbeit besteht einerseits in der Prüfung bzw. Anpassung des Stapelfahrzeuges, sowie einem zweigeteilten Ladevorgang im Sockelbereich. Dieser würde zunächst nur den Bentonit oberhalb von +0,3 m in der Strecke laden, um so den Sockel unter den Behältern zu stützen. Der zusätzliche Aufwand wird mit 1 h pro Behälterreihe abgeschätzt.	
	Sicherung des Sockels vor Entnahme des Behälterreihe	1 h je MOSAIK®-Reihe

#### 4.4.2.5 Entnahme des Buffers um MOSAIK®-Behälter

Um die MOSAIK®-Behälter mit dem Stapelfahrzeug wieder entnehmen zu können, muss zuerst die Firste freigelegt werden. Dazu kann das Beraubefahrzeug z.B. mit einem Fräskopf verwendet werden. Zusätzlich soll auch der Buffer auf einer Seite der MOSAIK®-Reihe aufgelockert oder entfernt werden, um einen Behälter von mindestens drei Seiten (oben, frontal, seitlich) freizuladen. Der Behälter kann dann durch Kippen „ausgebrochen“ werden. Hierzu dient eine Gabel die den Behälter an der Einschnürung an seiner Basis stützt und ein von oben auf den Behälter drückender Greifer. Das aufgelockerte Buffermaterial verbleibt auf der Sohle und wird am Ende der Rückholung einer Behälter-Reihe in Kombination mit den Arbeiten am Sockel geladen.

<b>M2D</b>	Aufgrund der geringen Festigkeit des Buffers wird die Dauer für das Freilegen einer Behälterreihe mit 1 h abgeschätzt.	
	Freilegen einer neuen Behälterreihe	1 h je MOSAIK®-Reihe

#### 4.4.2.6 Verlängerung der Wetterluten

Jeweils nach der Entnahme von ca. 10-15 Reihen wird die Bewetterung der ELS angepasst. Dazu ist es notwendig, die Luttenleitung(en) zu verlängern. Sie werden an dafür vorgesehenen Ankern im Zentrum des Streckenprofils aufgehängt.

<b>M2E</b>	Die Bewetterung sollte mit der Rückholung Schritt halten. Dazu werden Wetterluten verlängert. Die zugehörigen Arbeiten werden mit 2 h je 15 Reihen abgeschätzt. Dafür muss die Vorbereitung der Tätigkeit bereits parallel erfolgen.	
	Ca. 15 m Verlängerung der Lutte	2 h je 15 MOSAIK®-Behälterreihen

#### 4.5 Zeitschätzung der Rückholung

Die technische Umsetzung der Rückholung hängt neben den Einzeltätigkeiten auch stark von den Wechselzeiten zwischen diesen ab. Darüber hinaus sind ungeplante Ausfallzeiten und die Zeiten zur Aufnahme einer Tätigkeit bei Arbeitsbeginn bzw. die Verlustzeit beim Verlassen der Tätigkeit nicht vollständig beleuchtet. Die Zeitschätzung geht davon aus, dass die Tätigkeiten ohne längere Wechselzeiten möglich sind. Dazu wird eine Tätigkeit von einem Bediener ausgeführt. Weiterhin handelt es sich um einen eingespielten Prozess, nach einer Lernphase. Die Arbeitsschritte müssen gegebenenfalls auf die Schichtdauer angepasst werden, so dass eine Tätigkeit zum Ende der Schicht beendet ist. Weiterhin wird nicht beachtet, dass es bei parallelen Tätigkeiten in verschiedenen Strecken zu Engpässen in Strecken kommen kann, in denen sich die Wege kreuzen.

Neben planbaren Teilschritten ist in Abhängigkeit von der Standzeit mit einem unterschiedlichen Zustand der Konturen zu rechnen, der nicht pauschal bestimmt werden kann. Hier ergibt sich ein großes Potential für Abweichungen. Sind die Grubenräume im Verhältnis zur geplanten Standzeit erst seit kurzem versetzt, sind die vorhandenen Sicherungsmaßnahmen lediglich durch Sichtkontrolle zu prüfen und daraufhin Maßnahmen zu ergreifen. Mit längerer Standzeit können dazu unter anderem das Berauben von losem Material, die Sicherung der Kontur durch Ankern oder Spritzbeton oder sogar das Verfestigen des Gebirgsverbandes mit Hilfe von Injektionen gehören. Grundsätzlich sollte möglichst jede Tätigkeit von einem Fahrzeug aus bzw. aus sicherer Entfernung mit einer Fernbedienung erfolgen. Dies dient einerseits dem sicheren Arbeiten in untertägigen Hohlräumen, darüber hinaus aber auch einer Minimierung der Strahlenexposition.

Aufbauend auf den Prozess- und Prozessteilschritten für die Rückholung von POLLUX®- und CASTOR®-Behältern (siehe Tabelle 4-4) sowie von MOSAIK®-Behältern (siehe Tabelle 4-5) liefert die Schätzung jedoch ein erstes Indiz für die zu veranschlagenden Zeiten bei der Rückholung und zeigt Ansatzpunkte für eine Sensitivitätsanalyse bzw. darauf aufbauende Planungsmaßnahmen. Tabelle 4-6 fasst diese Schätzung für POLLUX®-Behälter zusammen.

Tabelle 4-6: Arbeitszeiten der Prozessschritte für die Rückholung von POLLUX®-Behältern

Prozessschritte der Rückholung von POLLUX®	Prozessteilschritte						
	A	B	C	D	E	F	G
(1) Aufnahme von Behältern und Transport zum Schacht	0,5 h je POLLUX®	1,5 h je POLLUX®	0 h je POLLUX®				
(2) Freilegen von Behältern	0,5 h je POLLUX®	5,7 h je POLLUX®	2 h je POLLUX®	1 h je POLLUX®	5,7 h je POLLUX®	2 h je POLLUX®	1 h je POLLUX®
(3) Rückbau des Widerlagers einer ELS	32 h je Widerlager						
(4) Aufwältigung von Querschlägen	6 h je 6 m Abschnitt	1 h je 6 m Abschnitt	2 h je 6 m Abschnitt	1 h je 6 m Abschnitt	40 h je Querschlag		
(5) Rückbau des Widerlagers im Querschlag	48 h je Widerlager						
(6) Aufwältigung von Richtstrecken (Gebindedtransport)	6 h je 6 m Abschnitt	1 h je 6 m Abschnitt	2 h je 6 m Abschnitt	2 h je 12 m Abschnitte	35 Schichten je 400 m		
(6) (Bergbau)	+40%	+40%	+40%	+40%	-		
(6) Wetterstrecke	+45%	+45%	+45%	+45%	-		

#### 4.5.1 Teilprozesse in der POLLUX®-ELS

Innerhalb der Einlagerungsstrecke werden die Behälter aufgenommen und abtransportiert (s. Kapitel 1). Dazu müssen sie gegebenenfalls zunächst freigelegt werden (2). Ist die Strecke bereits verschlossen, so sind auch die Arbeiten zum Rückbau des Widerlagers (3) mit einzuplanen. Entsprechend der in den Abschnitten 4.3.1 und 4.3.2 beschriebenen Prozesse wird eine Arbeitszeit von ca. 19,9 h für die Rückholung eines Behälters benötigt. Dabei nimmt die Entnahme des Buffers mit 57% den größten Teil der Zeit in Anspruch, siehe Tabelle 4-7 und Abbildung 4-24. Die hier abgeschätzten Zeiten für Sicherungsarbeiten sind von zahlreichen Faktoren abhängig und bedürfen einer Konkretisierung im konkreten Anwendungsfall. Der Transport zum Schacht ist ein gesonderter Prozess und wirkt sich daher nicht auf die Rückholung aus der ELS aus.

Tabelle 4-7: Arbeitszeiten der Prozessschritte innerhalb der POLLUX®-ELS

Prozessschritte der Rückholung von POLLUX®	Prozesseilschritte						
	A	B	C	D	E	F	G
(1) Aufnahme von Behältern und Transport zum Schacht	0,5 h je POLLUX®	1,5 h je POLLUX®	0 h je POLLUX®				
(2) Freilegen von Behältern	0,5 h je POLLUX®	5,7 h je POLLUX®	2 h je POLLUX®	1 h je POLLUX®	5,7 h je POLLUX®	2 h je POLLUX®	1 h je POLLUX®
(3) Rückbau des Widerlagers einer ELS	32 h je Widerlager						

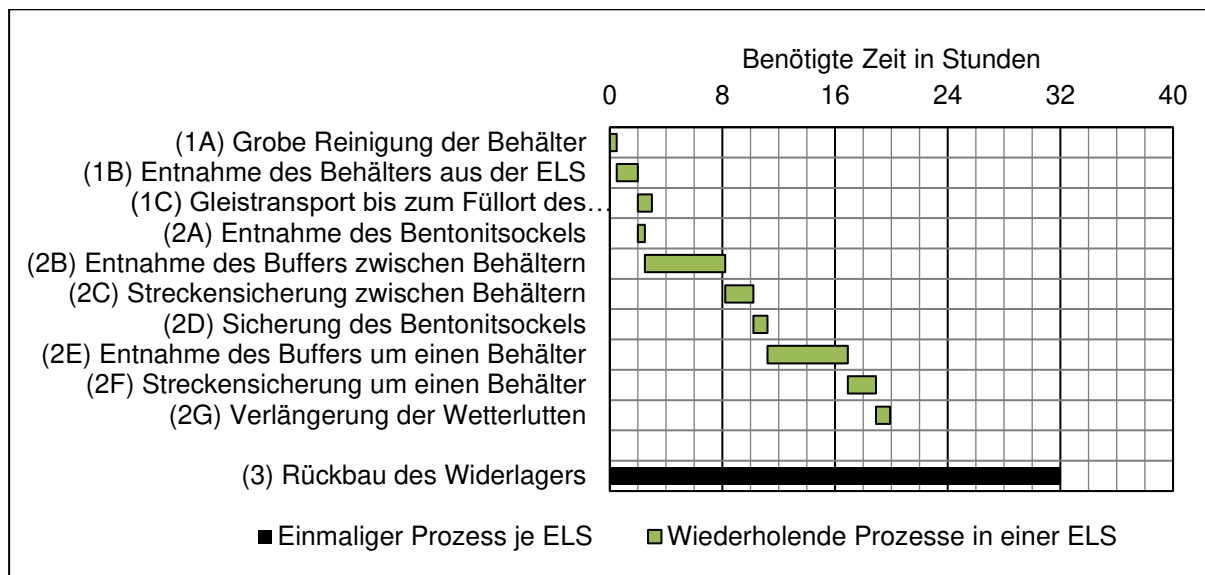


Abbildung 4-24: Arbeitszeiten zur Entnahme (1) und zum Freilegen (2) eines POLLUX®-Behälter

Rechnerisch sind damit 29 Behälter aus einer 400 m langen ELS in 577 h rückzuholen. Bei einer angenommen reinen Arbeitszeit von ca. 6 h je Schicht entspricht dies ca. 96 Schichten. Muss das Widerlager der ELS zusätzlich geöffnet werden, so sind dafür weitere 4 Schichten geplant. Daher werden hier vereinfacht 100 Arbeitsschichten je ELS zugrunde gelegt.

Wären viele Behälter aus verschiedenen Strecken rückzuholen, sollten Rückholungen parallel erfolgen, um die Auslastung aller Maschinen zu erhöhen und so insgesamt den Prozess zu beschleunigen. Dies wäre auch insofern günstig, dass Bediener auf einem Gerät bleiben. Diese Zuordnung von Bediener, Gerät und Aufgabe hat in der Regel eine höhere Identifikation und damit Qualität der Arbeit und Schonung der Ausrüstung zur Folge.

#### 4.5.2 Teilprozesse in den MOSAIK®-ELS

Es wurde angenommen, dass jeweils drei Behälter übereinander und fünf dieser Stapel in einer Reihe stehend in der Strecke gelagert werden. Die einzelnen Reihen werden gegeneinander versetzt, so dass sich je Streckenmeter eine Reihe befindet. Für die 15 Behälter einer Reihe werden nach den Annahmen aus Abschnitt 4.4 durchschnittlich 13,15 h für die Rückholung benötigt, siehe Tabelle 4-8 und Abbildung 4-25. Aufgrund der dichten Lagerung können sämtliche 2.620 MOSAIK®-Behälter in einer Strecke endgelagert werden. Für die Rückholung



aller Behälter wird eine Dauer von ca. 2.300 h abgeschätzt. Bei einer Arbeitszeit von 6 h/Schicht werden 383 Schichten benötigt. Inklusive des Rückbaus des Widerlagers am Beginn der Strecke sind insgesamt 129 Tage zu veranschlagen.

Tabelle 4-8: Arbeitszeiten der Prozessschritte innerhalb der MOSAIK®-ELS

Prozessschritte der Rückholung von MOSAIK	Prozessteilschritte				
	A	B	C	D	E
(M1) Aufnahme von Behältern und Transport zum Schacht	1,5 h je Reihe	5 h je Reihe	0		
(M2) Freilegen von Behältern	1,5 h je Reihe	3 h je Reihe	1 h je Reihe	1 h je Reihe	2 h je 15 Reihen

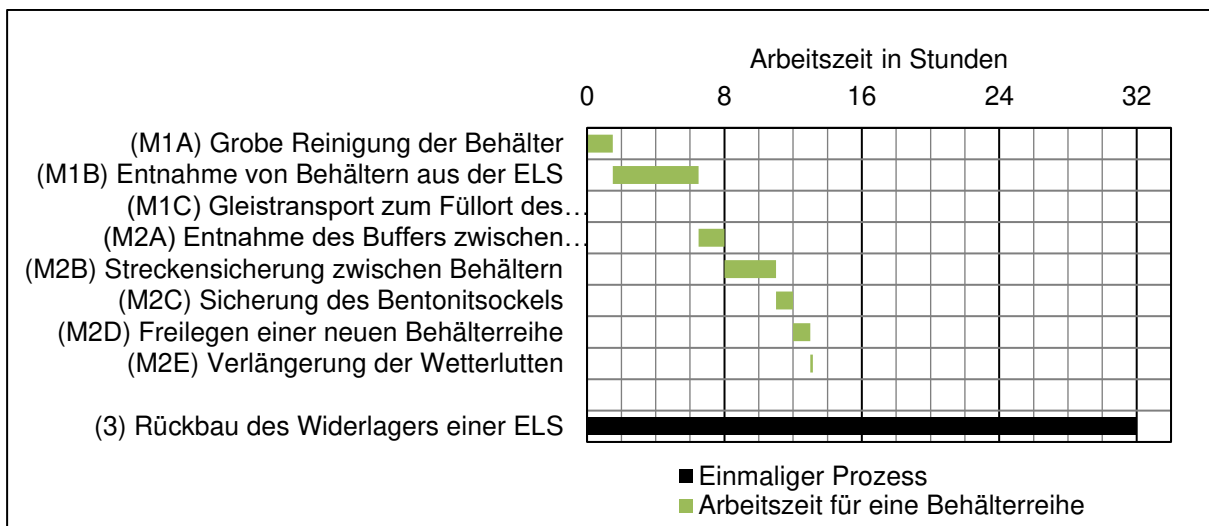


Abbildung 4-25: Arbeitszeiten der Teilprozessschritte in MOSAIK®-ELS

#### 4.5.3 Teilprozesse im Querschlag

Zur Aufwältigung des Querschlages (4) erfolgt die Entnahme des Versatzes und die Sicherung der Kontur. In Abhängigkeit der Anzahl rückzuholender Behälter wird darüber hinaus eine Gleisverlademöglichkeit erstellt. Ist der Querschlag bereits verschlossen, muss das Widerlager zunächst entfernt werden (5).

Gemäß der in den Abschnitten 0 und 4.3.5 beschriebenen Teilschritte ergibt sich das folgende Zeitprofil. Die Strecke wird in 6 m Abschnitten - geteilt in linke und rechte Seite - freigeladen. Die Streckensicherung beginnt parallel zum Entladen, mit dem Ankern auf der anderen Seite der Strecke. Ist auch die zweite Seite freigeladen, kann die Ankerung hier fortgesetzt werden. Es folgt Zeit für eine Spritzbetonsicherung. Nach zweimaligem Durchlauf dieses Zyklus erfolgt die Verlängerung der Wetterlутten über den 12 m Abschnitt. Dafür ist also insgesamt eine Arbeitszeit von 20 h notwendig.



Tabelle 4-9: Arbeitszeiten der Prozessschritte innerhalb eines Querschlages

Prozessschritte der Rückholung von POLLUX®	Prozesseilschritte				
	A	B	C	D	E
(4) Aufwältigung von Querschlägen	6 h je 6 m Abschnitt	1 h je 6 m Abschnitt	2 h je 6 m Abschnitt	2 h je 12 m Abschnitt	40 h je Querschlag
(5) Rückbau des Widerlagers im Querschlag	48 h je Widerlager				

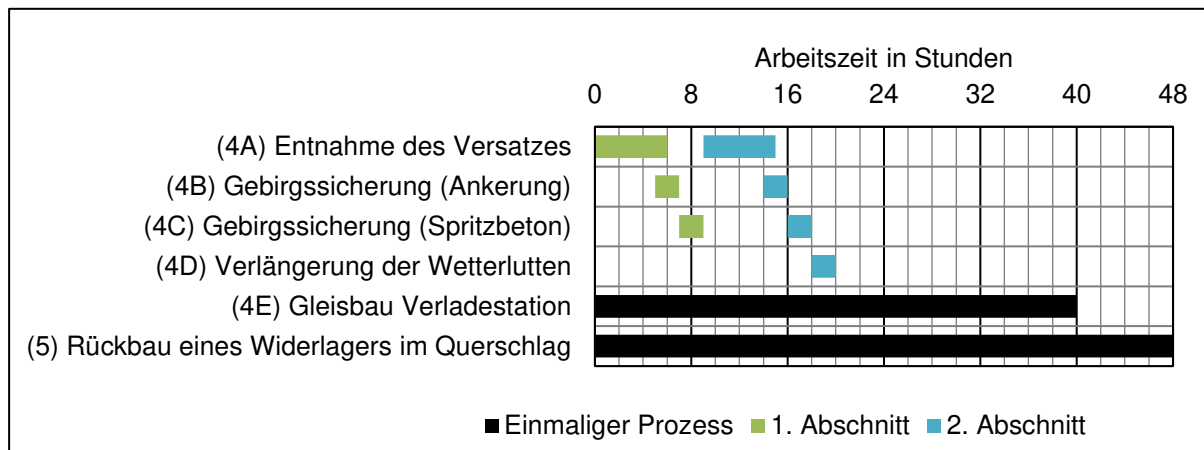


Abbildung 4-26: Arbeitszeiten der Teilschritte zur Aufwältigung eines Querschlages

Wird ein 400 m langer Querschlag vollständig aufgewältigt, so sind dementsprechend 667 h Arbeitszeit für die Freilegung des Hohlraumes und die zugehörige Sicherung anzusetzen. Für die Einrichtung einer Gleisverladung zwischen Richtstrecke und erster ELS werden zusätzliche 40 h angenommen. Hinzu kommen weitere 48 h je Widerlager, wobei 2 Widerlager je Querschlag vorhanden sind. Insgesamt sind 803 h bzw. bei 6 h je Schicht 134 Schichten notwendig.

#### 4.5.4 Teilprozesse in den Richtstrecken

Aufgrund der gleichen Querschnitte von Querschlag und Gebindettransportstrecke (Richtstrecke), wird die gleiche Vortriebsgeschwindigkeit angenommen. Somit sind hier 667 h oder 111 Schichten für die Freilegung (6A...D) eines 400 m langen Streckenbereichs nötig.

Tabelle 4-10: Arbeitszeiten der Prozessschritte innerhalb der Richtstrecken

Prozessschritte der Rückholung von POLLUX®	Prozesseilschritte				
	A	B	C	D	E
(6) Aufwältigung von Richtstrecken (Gebindettransport)	6 h je 6 m Abschnitt	1 h je 6 m Abschnitt	2 h je 6 m Abschnitt	2 h je 12 m Abschnitte	35 Schichten je 400 m Abschnitt
(6) ...(Bergbau)	+40%	+40%	+40%	+40%	-
(6) ...(Wetterstrecke)	+45%	+45%	+45%	+45%	-

Um die Gebinde zu transportieren, sind außerdem auf der gesamten Länge bis zum Querschlag Gleise zu verlegen (6E). Ist es möglich, diese Arbeiten parallel zum Vortrieb durchzuführen, wird nur die Zeit zusätzlich benötigt, die der Gleisbau dem Vortrieb nacheilt. Wird davon ausgegangen, dass die doppelte Richtstrecke jeweils nach maximal 400 m verbunden ist und dass aufgrund dieser Verbindung im rückwärtigen Bereich der Gleiseinbau parallel zur Auffahrung erfolgt, so benötigt der nacheilende Gleisbau noch maximal die Zeit für diese 400 m. Entsprechend Engelmann & Filbert (1995) waren auf der Schachtanlage Sigmundshall mit 4 – 6 Personen 12 m Streckengleis pro Schicht zu verlegen (Engelmann & Filbert, 1995). Dementsprechend ist von ca. 34 Schichten für 400 m auszugehen.

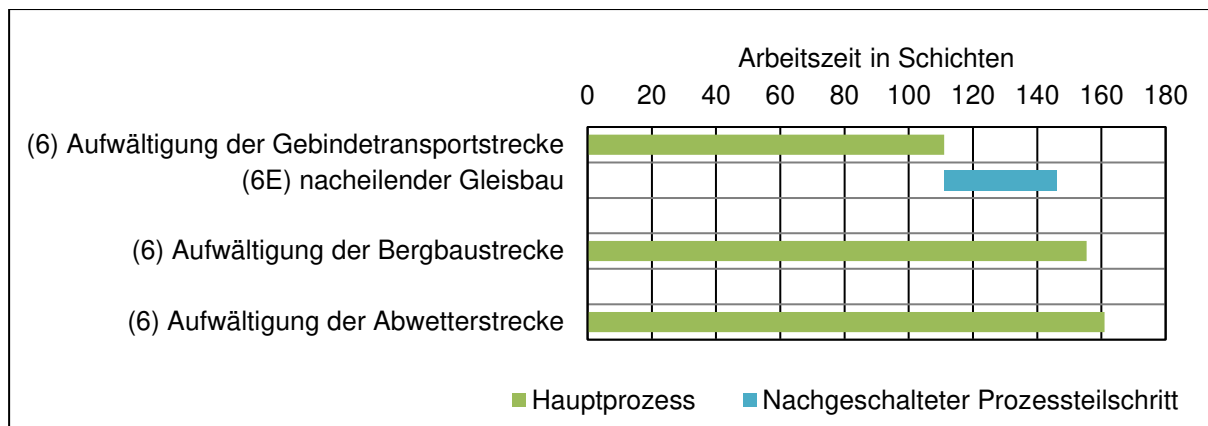


Abbildung 4-27: Arbeitszeiten zur Wiederauffahrung 400 m langer Bereiche in Richtstrecken

Die Bergbau-Richtstrecke am anderen Ende des Einlagerungsfeldes besitzt einen um 40 % größeren Streckenquerschnitt. Daher wird vereinfachend angenommen, dass der Zeitbedarf für jede Tätigkeit um ca. 40 % steigt. Aufgrund der größeren Höhe können einerseits größere Fahrzeuge eingesetzt werden; bei gleicher Reichweite ist jedoch zu prüfen, ob das sichere Arbeiten nur durch kürzere freie Streckenbereiche ermöglicht werden kann und sich dadurch das Vortriebsregime ändert. Für einen 400 m langen Abschnitt wären demnach ca. 156 Schichten für den Vortrieb vorzusehen.

Die Abwetterstrecke ist noch einmal geringfügig größer als die Bergbaustrecke. Es wird angenommen, dass daher ca. 45 % mehr Zeit für die Teilprozesse nötig ist im Querschlag. Damit werden für einen 400 m langen Abschnitt 161 Schichten benötigt.

#### 4.5.5 Zeitschätzung zur Rückholung aller Behälter

Die Auffahrtsgeschwindigkeit von Hochleistungsbetrieben im Festgestein beträgt ca. 6 m pro Tag. Wird das Grubengebäude tatsächlich ebenfalls mit dieser Geschwindigkeit erstellt, ergibt sich durch Parallelisierung der Arbeiten, das Schichtregime und mehrere Angriffspunkte eine Gesamtdauer zur Erstellung des Endlagers. Die Geschwindigkeit für die Aufwältigung der einzelnen Streckentypen beträgt dagegen

- mindestens 7,5 m/Tag (Abwetterstrecke)
- fast 9 m/Tag in Querschlägen
- Ca. 12 m/Tag in ELS

Der tatsächliche Ausbaubedarf ist hier als größte Unsicherheit anzusehen. Unter den hier getroffenen Annahmen erfolgen alle Prozessschritte für die Rückholung schneller als die für die Auffahrung der Strecken im Festgestein. Insgesamt ist davon auszugehen, dass:

$$\text{Rückholddauer} < \text{Einlagerungsdauer}$$

wenn sämtliche eingelagerte Behälter rückzuholen sind.

Würden sämtliche 9.314 POLLUX®- und CASTOR®-Behälter nach dem oben genannten Regime rückgeholt wären etwa 32.000 Schichten bzw. 10.700 Tage bei einem 3-Schicht-Regime oder ca. 36 Jahre bei 300 Arbeitstagen im Jahr nötig. Diese Angabe bezieht sich auf die größten Behälter mit den größten Abständen zueinander. Sie ist daher als konservativ zu betrachten. Durch die Verringerung der Abstände zwischen den Behältern und durch die, gegenüber den POLLUX®-Behältern, deutlich kürzeren CASTOR®-Behälter ist mit einer geringen Verkürzung zu rechnen. Erlauben die klimatischen Verhältnisse die Rückholung aus mehreren ELS kann die Zeit deutlich verkürzt werden.

Die folgende, konservative Abschätzung des Streckenbedarfs außerhalb der ELS geht von diesen Annahmen aus:

- Von den 9.314 POLLUX®- und CASTOR®-Behälter befinden sich je 29 Stück in einer ELS
- In einem Einlagerungsfeld von 400 m x 400 m befinden sich 9 dieser ELS
- Insgesamt sind daher weniger als 28 Einlagerungsfelder nötig
- Werden die Felder hintereinander aufgefahren, benötigt jedes jeweils 400 m
  - Gebindetransportstrecke
  - Abwetterstrecke
  - Bergbaustrecke
  - Querschlag

Bei diesen 1,6 km Auffahrungslänge je Feld ergeben sich ca. 45 km an Streckenauffahrungen für die Strecken um die Einlagerungsfelder. Eine Reserve von 5 km für weitere Verbindungsstrecken vorausgesetzt, betragen die Auffahrungen demnach schätzungsweise 50 km. Eine Geschwindigkeit von 7,5 m/Tag, wie sie in der Abwetter-Richtstrecke geschätzt wurde, vorausgesetzt, werden 22,2 Jahre mit je 300 Arbeitstagen benötigt.

Die Dauer zur Rückholung der Behälter und die zur Wiederauffahrung der Zugangsstrecken zeigt deutlich, dass beide Vorgänge parallel zu planen sind, um eine Rückholung binnen 40 Jahren zu ermöglichen.



## 5 Rückholungskonzept für das Endlagersystem multiple einschlusswirksame Gebirgsbereiche

### 5.1 Übersicht zum Endlager- und Einlagerungskonzept

Das Konzept der multiplen einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (ewG) betrachtet Bereiche im Wirtsgestein, die sich durch eine geringe Permeabilität vom umliegenden Gebirge abgrenzen. Sie stellen, bei ausreichender Größe zur Auffahrung eines Endlagers, geeignete ewG dar. Dabei muss der einzelne ewG ausreichend groß dimensioniert sein, um alle erforderlichen Verschlussbauwerke ebenfalls vollständig aufzunehmen. In diesem Fall übernimmt das Gebirge eine verstärkte Barrierefunktion, verglichen zu den Konzepten des modifizierten KBS-3 und überlagernden ewG. Nach diesem Konzept können innerhalb eines Wirtsgesteins mehrere ewG (multiple ewG) aufgefahren werden, die jeweils in sich abgeschlossene Endlagerbereiche darstellen, siehe Abbildung 5-1. Die funktionalen Eigenschaften der Gebirgsbereiche können in diesem Konzept zielgerichtet ausgewählt werden und auf ausschließlich gut geeignete Bereiche eingegrenzt werden. Kriterien für die Eignung multipler ewG wurden bereits von Bertrams et al. (2017) zusammengefasst.

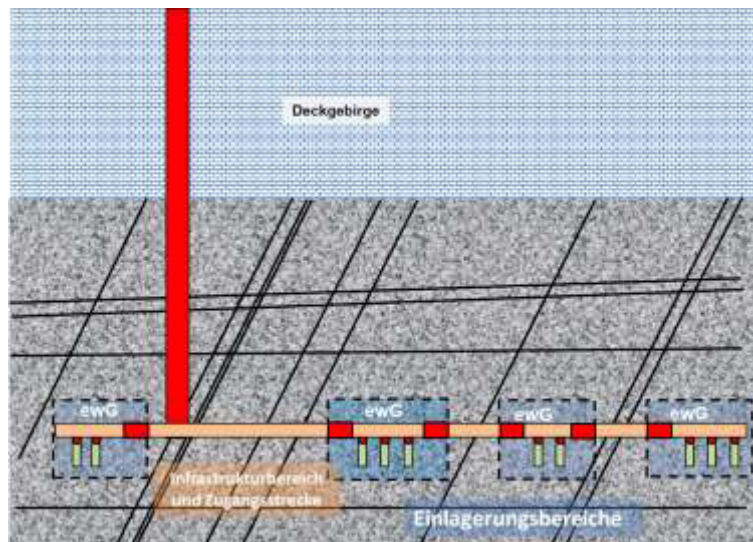


Abbildung 5-1: Schematische Darstellung des Verfüll- und Verschlusskonzeptes für das Konzept der multiplen ewG. Verschlussbauwerke: rot, Versatz: beige, ewG: blau (Bertrams et al., 2017)

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „CHRISTA“ wurden anhand der geologischen Modelle bereits Randbedingungen für ein generisches Endlager „multipler ewG“ festgelegt. Diese Randbedingungen entstammen nicht einer realen Erkundung an einem Standort, sondern wurden anhand vergleichbarer Modelle, Studien und Erkundungen entwickelt (Jobmann et al., 2016).

Nach Jobmann et al. (2016) sinkt mit steigender Teufe die Permeabilität des Gebirges, jedoch können durch die tektonische Genese in allen Tiefenlagen des kristallinen Gebirges hydraulisch wirksame Störungen und stärker durchlässige Bereiche auftreten. Diese gilt es bei der

Auslegung und Dimensionierung der multiplen ewG zu vermeiden, um die Barrierefunktion des Gebirges zu gewährleisten.

Das Verfüll- und Verschlusskonzept aus Bertrams et al. (2017) wird im Rahmen der laufenden Untersuchungen von CHRISTA II (Jobmann & Burlaka, 2019) überprüft und optimiert. Eine große Herausforderung stellt bei der Planung im kristallinen Gestein in Deutschland die Tatsache dar, dass bisher wenig geologische Untersuchungen zu den entsprechenden Gesteinsformationen existieren. Daher kann die genaue Beschaffenheit eines potentiellen Endlagers im kristallinen Gestein in Deutschland nur nach bisherigem Erkenntnisstand und daraus erwachsender Referenzmodelle abgeleitet werden.

Bertrams et al. (2017) sieht für das Endlagerkonzept multipler ewG die vertikale Bohrlochlagerung als Einlagerungskonzept vor. Für dieses Konzept soll eine rückholbare Kokille (BSK-RCu) verwendet werden, die mit einer Kupferschicht von 5 mm ummantelt wird. Die Ummantelung ergibt eine Masse von 400 kg an Kupfer pro Behälter. Die Gesamtmasse des Abfallgebindes beträgt ca. 5700 kg. In der BSK-RCu kann ein Abfallgebindenvolumen von 1,02 m<sup>3</sup> untergebracht werden. In den Abmessungen des Innenraumes entspricht die Kokille den BSK wie sie auch für den Einsatz in Salz oder Tongestein vorgesehen sind. Bei der BSK-RCu handelt es sich um einen nicht vollständig abgeschirmten Behälter, für dessen Handhabung und Transport ein Transferbehälter genutzt werden muss (Bertrams et al. 2017).

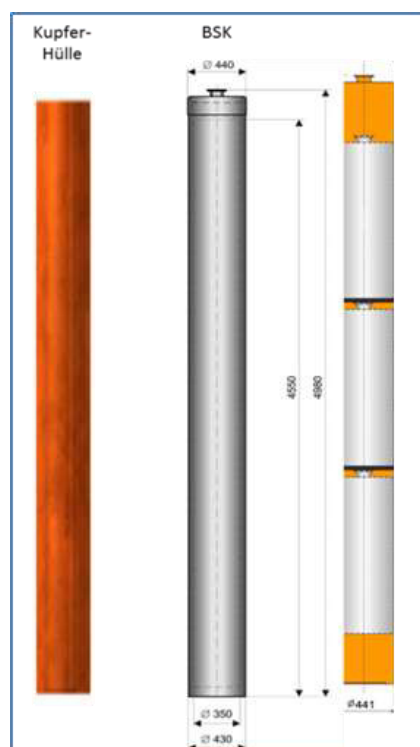


Abbildung 5-2: Brennstabkokille für die Einlagerung im Rahmen der Option "multipler ewG" (Jobmann & Burlaka, 2019)

Der im Konzept von Abbildung 5-2 noch enthaltene Tragpilz wirft Zweifel an der Machbarkeit einer abgeschlossenen Kupferschicht auf. Bertrams et al. (2017) zeigt als Lösung für diese Problematik, den Tragpilz analog zum Behälter des skandinavischen KBS-3-Konzeptes durch

eine innere Nut zu ersetzen. Der Vorteil dieser Nut liegt neben der längeren anzunehmenden Lebensdauer darin, dass die erforderliche Kupferbeschichtung einfacher aufzubringen ist. Eine Anpassung des Behälterkopfes erfordert dann auch eine Anpassung des Greifers der Einlagerungsmaschine.

Die Einlagerung der Behälter erfolgt in vertikalen Bohrlochern mit einer Tiefe von etwa 24 m. In jedes dieser Einlagerungsbohrlöcher werden drei Behälter eingelagert, siehe Abbildung 5-3. Der Bohrlochdurchmesser beträgt ca. 0,9 m. Jedes Einlagerungsbohrloch wird mit einer Stahlverrohrung versehen. Die Verfüllung des Bohrlochs erfolgt mit einem rieselfähigen Sand, der als technische Maßnahme zur Gewährleistung der Rückholbarkeit dient. Die Verfüllung mit dem rieselfähigen und nicht kompaktierenden Sand erleichtert das Ziehen der Kokille im Falle der Rückholung.

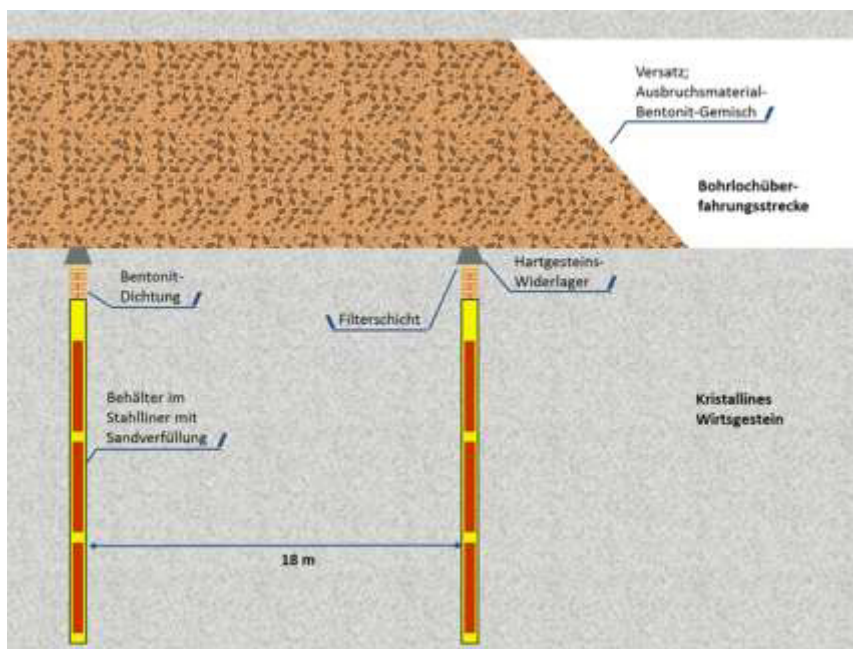


Abbildung 5-3: Einlagerungsbohrloch, Bohrlochverschluss und Versatz innerhalb der Bohrlochüberfahrungsstrecken in Seitenansicht (Jobmann & Burlaka, 2019)

Da Lösungszutritte oder eine Lösungsfreisetzung aufgrund der Gesteinseigenschaften nur durch die Grubenräume und das Bohrloch erwartet werden, wird auf den Einbau eines Buffers verzichtet. Zur Bohrlochüberfahrungsstrecke hin wird eine Bentonitdichtung erstellt, deren Lagestabilität durch ein Hartgesteinswiderlager gewährleistet wird. Die kegelförmige Beschaffenheit des Hartgesteinswiderlagers verzahnt dieses mit dem Wirtsgestein, um dem wachsenden Quelldruck des Bentonitbuffers entgegen zu wirken und die Lagestabilität zu gewährleisten. Im Einlagerungskonzept nach Bertrams et al. (2017) wird von der Installation des Widerlagers im Bohrlochkeller ausgegangen. Der Bohrlochkeller ermöglicht, bei der Auffahrung eines kleineren Streckenquerschnittes, das Aufrichten und Einbringen der Kokillen in die Einlagerungsbohrlöcher, sowie die Aufnahme der Bohrlochschleuse. Bertrams et al. (2021) untersucht im Rahmen der Entwicklung der Einlagerungstechnik auch die Möglichkeit, von der Auffahrung eines Bohrlochkellers im Kristallingestein abzusehen. Argumente dafür sind zum einen die so nah beieinanderliegenden Einlagerungsbohrlöcher, dass eine Überlappung der einzelnen Bohrlochkeller stattfinden würde. Zum anderen führt die hohe Gesteins- bzw. Gebirgsfestigkeit



zu einem sehr hohen Auffahrungsaufwand. Wenn auf einen Bohrlochkeller verzichtet wird, muss die Höhe der Strecke ausreichend groß sein um den Schwenkvorgang des Transferbehälters zu ermöglichen. Die Gesamthöhe der Firste müsste sich nach Bertrams et al. (2021) auf ca. 11,5 m erhöhen.

Sind die Einlagerungsbohrlöcher innerhalb einer Bohrlochüberfahrungsstrecke vollständig verfüllt, erfolgt der Versatz der Bohrlochüberfahrungsstrecke. Der Streckenversatz soll gewährleisten, dass eine Migration von Lösungen innerhalb der Strecken der einzelnen ewG inklusive der Auflockerungszone möglichst gering ist. Analog zum skandinavischen KBS-3-Konzept wird als Versatzmaterial aufbereitetes Ausbruchsmaterial mit Bentonit im Verhältnis 70/30 % gemischt (Jobmann & Burlaka, 2019).

Jede Bohrlochüberfahrungsstrecke wird an der Einmündung in die Richtstrecken mit einem Abschlusswiderlager verschlossen, das aus geringpermeablem Beton besteht (siehe Abbildung 5-4). Dieses Widerlager soll zum einen die Lagestabilität des Versatzes in den Überfahrungsstrecken gewährleisten und zum anderen den uneingeschränkten Betrieb der Richtstrecken während der gesamten Betriebsphase gewährleisten. Die Abschlusswiderlager werden zudem aus gering permeablem Beton hergestellt, um einen ggf. kapillar getriebenen Wasserdurchlass aus den Überfahrungsstrecken zu minimieren. In Bezug auf die Langzeitsicherheit ist der Funktionszeitraum dieser Widerlager bis zu dem Zeitpunkt begrenzt, an dem die angrenzende Richtstrecke mit Versatz verfüllt ist und dieser Versatz dann die Stützfunktion übernimmt.

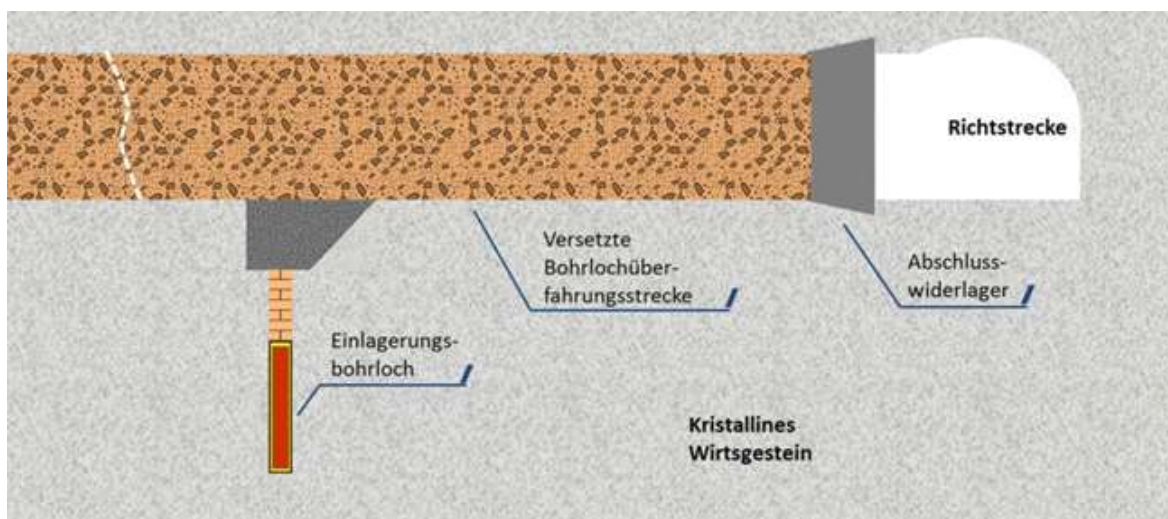


Abbildung 5-4: Verfüllte Bohrlochüberfahrungsstrecke mit Abschlusswiderlager (Jobmann & Burlaka, 2019)

Soll im Zuge der Verschlussmaßnahmen ein Einlagerungsfeld bzw. eine ewG-Zelle verschlossen werden, werden die zugehörigen Hauptstrecken mit dem gleichen Material versetzt, mit dem auch die Bohrlochüberfahrungsstrecken versetzt wurden. Der Ausgang aus einer ewG-Zelle wird schließlich mit Streckenschlüssen versiegelt. Um den verschiedenen Anforderungen an den Verschluss der Richtstrecken gerecht zu werden, werden verschiedene Funk-

tionselemente miteinander kombiniert. Ausgehend vom Beton-Doppelwiderlager, als Zwischenelement zu den Strecken am ewG-Ausgang, wird zunächst ein Asphalt/Bitumen Dichtelement installiert. Die quaderförmigen Asphaltblöcke werden zur Herstellung eines undurchlässigen Verbundes mit Bitumenemulsion ausgefüllt, welche sowohl am Asphalt als auch am Gebirge schnell haftende Eigenschaften aufweist. Der Streckenverschluss, wie er in Jobmann & Burlaka (2019) beschrieben ist, besteht damit aus einem diversitär redundanten System.

Die Wahl von Lage und Größe der einzelnen ewG-Zellen erfolgt über die Auswahl von Gesteinsbereichen, die nicht mit hydraulisch wirksamen Klüften durchzogen sind. Solche hydraulisch wirksamen Klüfte definieren die Ränder einzelner ewG-Zellen, was zu sehr unterschiedlichen Größen und geometrischen Formen der einzelnen ewG führen kann. Jobmann & Burlaka (2019) definieren zur Beschreibung der Vorgehensweise bei der Nachweisführung einen „Referenz-ewG“ mit einer bestimmten Größe, siehe Abbildung 5-5. Dieses Referenzmodell soll für das vorliegende Vorhaben als Basis für die weiteren Betrachtungen dienen. Der Referenz-ewG beinhaltet einen weitgehend symmetrischen Aufbau und schließt alle zuvor beschriebenen Komponenten ein. Entsprechend dem in Bertrams et al. (2017) entwickelten Endlagerlayout wird der Referenz-ewG über ein Doppelstreckensystem erschlossen. Von den beiden Zugangsstrecken zweigen jeweils elf Bohrlochüberfahrungsstrecken ab. Die Bohrlochüberfahrungsstrecken sind als Blindstrecken ausgeführt, fassen je sechs Einlagerungsbohrlöcher und sind 110 m lang. Die Grenze des ewG wird durch einen Abstand  $d$  von der äußeren Kontur der Grubenbaue bestimmt.

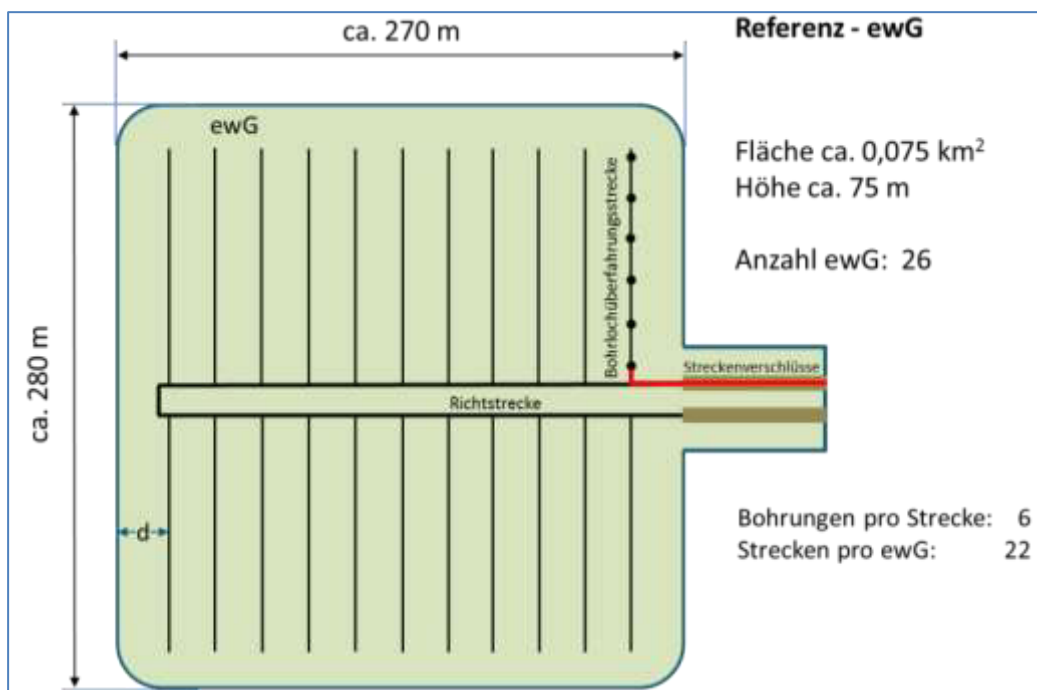


Abbildung 5-5: Referenz-ewG (Jobmann & Burlaka, 2019)

Die Auffahrung einer ewG-Zelle erfolgt in zwei Teilschritten. Im ersten Schritt werden die zentralen Zugangsstrecken errichtet. Im zweiten Schritt erfolgt dann von den Hauptstrecken aus schrittweise die Auffahrung der Bohrlochüberfahrungsstrecken. In bereits vollständig aufgefahrenen Bohrlochüberfahrungsstrecken kann anschließend die Erstellung der Einlagerungsbohrlöcher erfolgen, siehe Abbildung 5-6. Die beschriebenen Arbeiten finden ausschließlich

im Überwachungsbereich (ÜB) statt. Die Errichtung eines Kontrollbereiches (KB) erfolgt mit Beginn der Einlagerung. Dem KB zugeordnet sind alle Grubenräume, die für den Gebindedtransport genutzt werden und die Bohrlochüberfahrungsstrecken selbst, siehe Abbildung 5-7. Es muss aber nicht die gesamte ewG-Zelle dem KB zugeordnet sein.

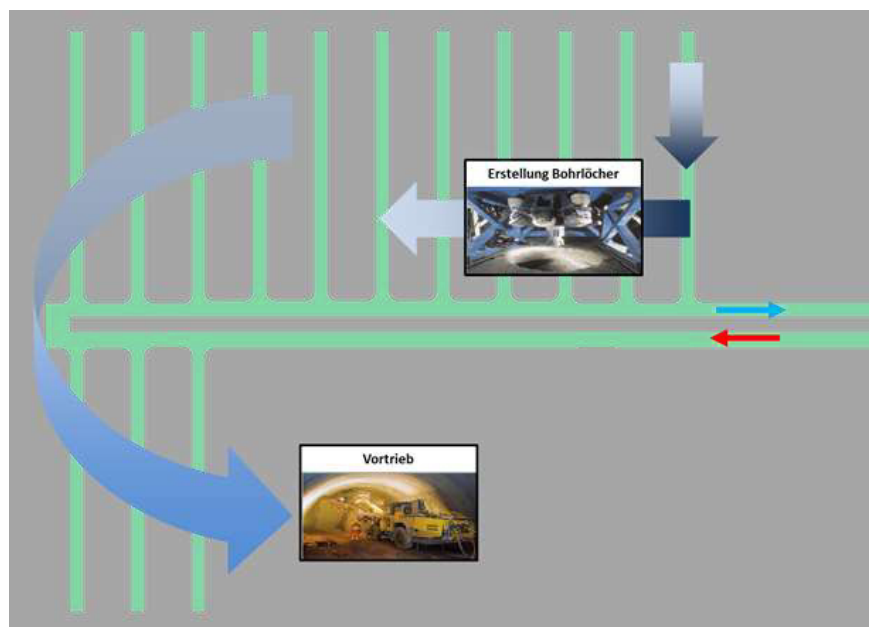


Abbildung 5-6: Schematische Darstellung des Referenz ewG während der Auffahrung. Alle Strecken sind dem ÜB (grün) zugeordnet. Die Vertriebsrichtung der Strecken ist entgegengesetzt zum Hauptwetterstrom.

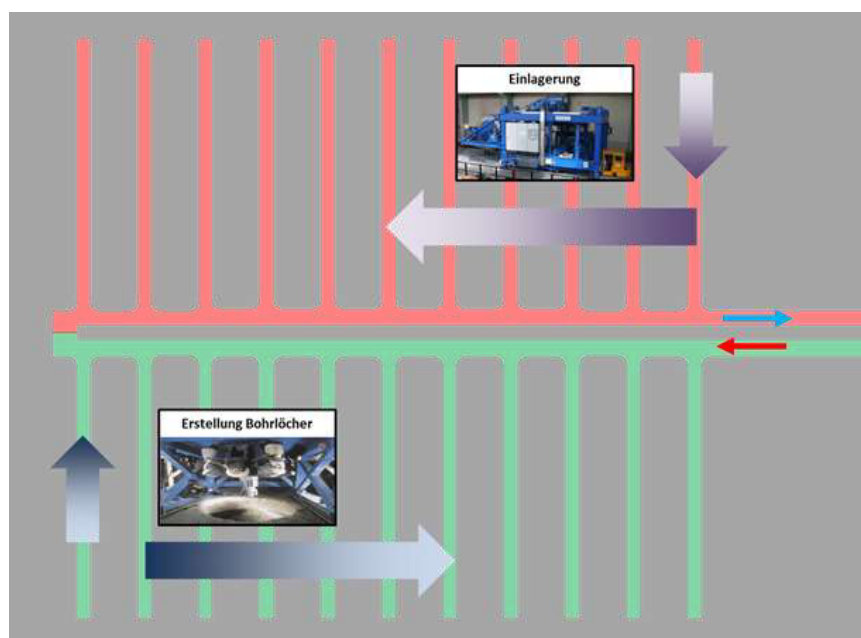


Abbildung 5-7: Schematische Darstellung des Referenz ewG während des Einlagerungsbetriebes. Die Grubenräume sind in einen KB (rot) und ÜB (grün) getrennt.

## 5.2 Selektive Rückholung im Konzept multipler ewG

Eine selektive Rückholung führt zu unterschiedlichen Szenarien mit unterschiedlichen Anforderungen. Die technischen Lösungen für einzelne Szenarien können dabei modular aufeinander aufbauen bzw. miteinander verknüpft werden. Die Beschreibung der unterschiedlichen Stufen der selektiven Rückholung soll im Folgenden an dem in Bertrams et al. (2017) und in Jobmann & Burlaka (2019) entwickelten Einlagerungskonzept hergeleitet werden. Eine Beschreibung der technischen Konzepte zur Gewährleistung der Rückholbarkeit und die technische Umsetzung der Rückholung ist in den nachfolgenden Abschnitten zu finden.

Tabelle 5-1 fasst die unterschiedlichen Zustände einer selektiven Rückholung im Konzept multipler ewG zusammen. Das früheste und technisch einfachste Rückholungsszenario ist die Entnahme der zuletzt eingelagerten BSK aus dem noch offenem Bohrloch. In diesem Fall entspricht die Rückholung einer Umkehrung des Einlagerungsvorgangs. Betriebliche Gründe können Ursache für einen solchen Rückholungsschritt sein und sollten daher in jedem Fall bei der technischen Auslegung der Einlagerungsvorrichtung beachtet werden. Zusätzliche Arbeitsschritte werden nötig, wenn auch die Sandverfüllung im Bohrloch entfernt werden muss. Der Versatz erfolgt typischerweise direkt nach der Einlagerung. Wichtige Prozesse sind:

- Entnahme der BSK aus dem Bohrloch
- Entnahme des Versatzes aus dem Bohrloch

Die Entnahme aller BSK aus einem Bohrloch entspricht der Wiederholung der Einzelschritte. Sofern auch andere Bohrlöcher noch unverschlossen sind, kann auch hier durch eine einfache Wiederholung der Arbeitsschritte „Entnahme des Versatzes/Entnahme der BSK“ zurückgeholt werden.

Die Komplexität der Rückholung steigt weiter an, wenn das Bohrloch verschlossen ist. Widerlager und Bentonitdichtung sind dann zurückzubauen. Im Anschluss müssen die Arbeitsschritte zur Entnahme des Sandversatzes und der BSK wiederholt werden. Mit der Anzahl der Bohrlöcher aus denen rückgeholt werden soll, steigt der Arbeitsaufwand und die Komplexität der Aufgabe. Wichtige Prozesse sind:

- Rückbau Widerlager
- Rückbau Dichtelement

Die Prozesskette der notwendigen Arbeitsschritte wird bei bereits versetzten Bohrlochüberfahrungsstrecke um den Rückbau des Streckenverschlusses und der Entnahme des Streckenversatzes erweitert. Wichtige Prozesse sind:

- Rückbau Abschlusswiderlager
- Entnahme Versatz

Die Rückholung eines ganzen ewGs bzw. eines Einlagerungsfeldes wird um die Prozessschritte des Rückbaus der Verschlüsse in den Zugangsstrecken und die Entnahme des Streckenversatzes in den Hauptstrecken ergänzt. Wichtige Prozesse sind:















- Rückbau Streckenverschluss
- Entnahme Versatz der Hauptstrecken

Außerhalb des ewG kann für eine mögliche Rückholung außerdem die Entnahme des Versatzes in den Zugangsstrecken oder aber der Rückbau von Verschlüssen im Bereich von Störungszonen erforderlich sein. Die Arbeitsschritte für diese Prozesse sind grundsätzlich gleich zu den zuvor genannten Arbeiten innerhalb des ewG.

Die folgenden Anforderungen können mit Blick auf die wesentlichen Elemente der Einschlusswirksamkeit identifiziert werden:

- Bei der Entfernung von Verschlüssen im Bereich von Störungszonen muss die Möglichkeit erhalten bleiben, die Verschlüsse an gleicher Stelle in mindestens gleicher Qualität neu zu errichten (sofern entsprechende Verschlüsse vorhanden sind - in diesem Konzept nur außerhalb der einzelnen ewG möglich)
- Keine Beeinträchtigung der rückgeholtten Behälter im Fall der weiteren Nutzung der Behälter zur Endlagerung
- Keine Beeinträchtigung des Nahfeldes um ein Bohrloch im Fall der weiteren Nutzung des Bohrloches zur Endlagerung
- Keine Beeinträchtigung des Nahfeldes um eine Einlagerungstrecke im Fall der weiteren Nutzung der Strecke zur Endlagerung
- Keine Beeinträchtigung von Einlagerungsbohrlöchern/Verschlussystemen in der Nähe von Rückholungsprozessen, z.B. durch Überfahung der Bohrlöcher durch die Transport- und Rückholungstechnik

Tabelle 5-1: Szenarien für die selektive Rückholung beim Konzept multipler ewG und gemäß NEA (2011)

Rückholungsprozesse							
	R-Scale Stage 2 – <i>Gebinde im Einlagerungsbohrloch</i>			R-Scale Stage 3 – <i>Einlagerungsbohrloch verschlossen</i>		R-Scale Stage 4 – <i>Zugangsstrecken verschlossen</i>	
Maßnahmen sind je nach Umfang der Rückholung mehrfach und im Wechsel zu wiederholen							
							
Aufnahme und Transport des Behälters nach ü.T.	Rückholung des zuletzt eingelagerten Behälters vor Verfüllung des Bohrlochabschnitts	Rückholung des zuletzt eingelagerten Behälters nach Verfüllung des Bohrlochabschnitts	Rückholung aller eingelagerten Behälter nach Verfüllung des Bohrlochabschnitts	Rückholung eines oder mehrerer Behälter nach Verfüllung und Verschluss des Bohrlochs	Rückholung der Behälter aus mehreren Bohrlöchern einer Bohrlochüberfahrungsstrecke nach Verfüllung und Verschluss der Bohrlöcher	Rückholung eines oder mehrerer Behälter nach Verfüllung und Verschluss der Bohrlöcher und Verfüllung der Bohrlochüberfahrungsstrecke	Rückholung eines oder mehrerer Behälter nach Verfüllung und Verschluss des ewG, in dem sich die Behälter befinden
Freilegen des Behälters							
Öffnung des Bohrlochverschlusses							
Wiederauffahrung der Bohrlochüberfahrungsstrecke							
Wiederauffahrung der für die Rückholung notwendigen Richtstrecken, Durchörterung von Verschlussbauwerken							



### 5.3 Entnahme des Behälters

Die Entnahme der Behälter aus dem noch nicht verschlossenem Bohrloch stellt den einfachsten Rückholungsfall dar. Zu diesem Zeitpunkt sind noch alle Einbauten bzw. Betriebsmittel zur Einlagerung der Behälter installiert. Die wichtigste Komponente stellt die Bohrlochschleuse dar. Sie dient der Abgrenzung des Bohrlochinneren zum restlichen Grubengebäude und ermöglicht ein zielgenaues Aufsetzen des Transferbehälters auf dem Bohrloch.

Das Ziehen der Kokillen aus dem unverfüllten Bohrloch muss mit der Einlagerungsmaschine möglich sein. Eine Einlagerungsvorrichtung für BSK wurde in Filbert et al. (2010) bereits entworfen, ein Prototyp gebaut und auf einem Versuchsstand getestet, siehe Abbildung 5-8. Im Rahmen der Demonstrationsversuche wurde der Einlagerungsvorgang mit einem Behälterdummy mehr als 1.000-mal wiederholt. Zum Ende des Einlagerungsvorganges wurde der Behälterdummy durch eine Umkehrung des Einlagerungsvorganges wieder aus dem Versuchsbohrloch entnommen. Damit konnte mit den Versuchen die Eignung der Einlagerungsvorrichtung zur Rückholung der BSK ebenfalls nachgewiesen werden. Für die BSK-RCu steht dieser technische Nachweis noch aus. Es wird aber angenommen, dass ein Ziehen der Kokille ebenso möglich ist. Bertrams et al. (2021) entwickelte den bestehenden Prototyp weiter indem die beim Demonstrationsversuch identifizierten Optimierungsmöglichkeiten übernommen wurden und die Konstruktion an das aktuelle Regelwerk angepasst wurde. Wie bereits in 5.1 beschrieben, ist auch der Verzicht des Bohrlochkellers denkbar und außerdem muss ein veränderter Kokillenkopf und Greifertechnik berücksichtigt werden. Beides führt aber nicht zu einer Beeinträchtigung des Entnahmeprozesses. Die Entnahme der Kokille aus dem Bohrloch endet, wenn die BSK-RCu mit dem Transferbehälter auf dem Transportwagen abgelegt ist. Transferbehälter und Transportwagen sind die gleichen, wie sie für die Einlagerung verwendet wurden. Mit der Transporttechnik kann die Kokille im Anschluss vom Einlagerungsort abtransportiert werden.

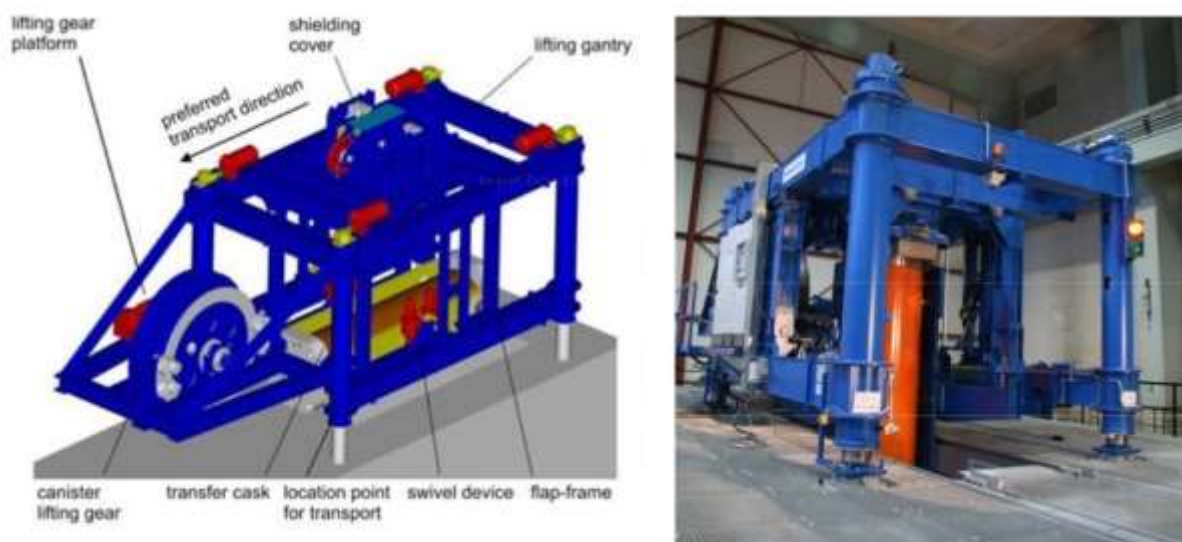


Abbildung 5-8: Entwurf und Prototyp der Einlagerungsmaschine für BSK 3 Kokillen (Filbert et al., 2010)

Zur Untersuchung der Machbarkeit der Rückholung der Brennstabkokille aus dem mit Sand verfüllten Bohrloch wurden analytische und numerische Modelle erstellt und ausgewertet. Für die Analyse wurde das in Abbildung 5-9 dargestellte System berücksichtigt. Die Kokillen sind im Prinzip zylindrisch (ca. 5,0 m hoch) und haben einen Durchmesser von 0,48 m. Sie werden in ein Bohrloch mit 0,9 m Durchmesser eingelagert, der mit einem Stahlliner ( $t = 50 \text{ mm}$ ) ummantelt ist. Nach der Einlagerung wird das Bohrloch mit lockerem Quarzsand verfüllt. Es wurden drei unterschiedliche analytische Ansätze angewendet, um die benötigte Zugkraft der Kokille zu ermitteln. Um die analytische Ansätze zu validieren, wurde ein Modell mit der Finiten Differenzen Software FLAC3D erstellt, siehe Abschnitt 5.3.2.

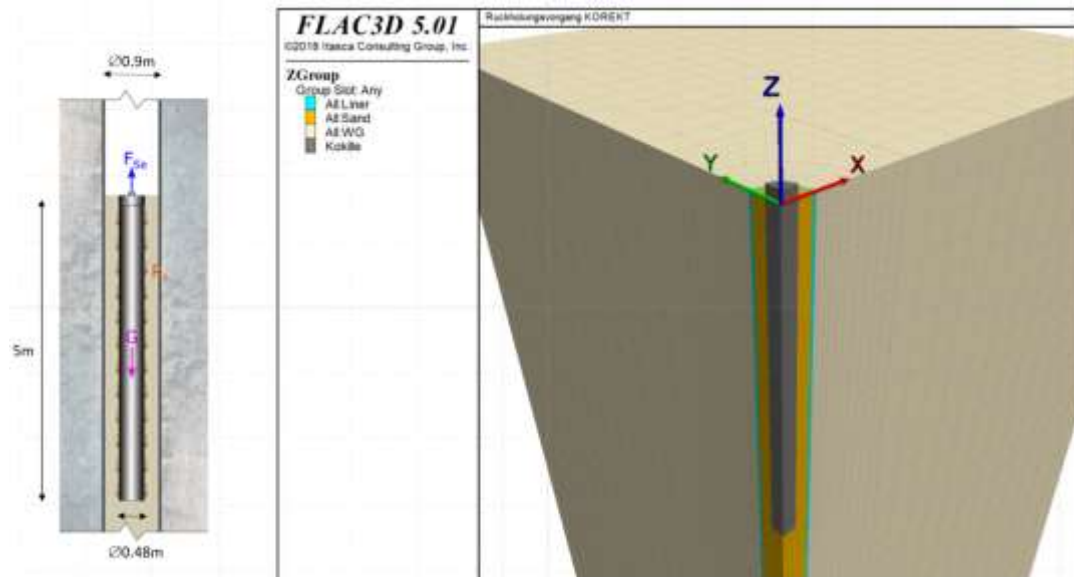


Abbildung 5-9: Rechts: Skizze der wirkenden Kräfte ( $F_{Se}$ ) auf die Kokille während des Rückholverfahrens; Links: Darstellung des numerisches Modells in FLAC3D

### 5.3.1 Analytische Untersuchung des Ziehens der Kokille

Für die Ermittlung der benötigten Zugkraft für die Entnahme der Kokille im Rückholprozess wurde der Ansatz der Pfahltheorie angewendet. Dazu ergänzend wurden die Ansätze der Erddrucktheorie und der Silotheorie herangezogen. Hierfür ist es wichtig, die Interaktion zwischen dem Verfüllmaterial und der Behälter mit hochradioaktiven Abfällen zu betrachten. Die genannten Ansätze berücksichtigen die Interaktion der einzelnen Sandkörner mit der Oberfläche der Kokillen durch den Wandreibungswinkel.

Nach der Pfahltheorie wirkt in entgegengesetzter Richtung der axialen Belastung eine Mantelreibung auf die gesamte Länge des Pfahls, der in Kontakt mit dem tragfähigen Boden ist, siehe Abbildung 5-10. Aufgrund der Interaktion der Sandkörner mit der Oberfläche der Kokille ist beim Ziehen eine zusätzliche Kraft in entgegenkommenden Richtung zu erwarten. Diese Mantelreibung ist von den Schereigenschaften des Sandes sowie der Oberflächenrauigkeit der Kokillenaußenfläche abhängig. Nach der Erddrucktheorie wirkt der aktive Erddruck auf einem Wand nicht senkrecht dazu, sondern geneigt mit einem Erddruckneigungswinkel bzw. Wandreibungswinkel, siehe Abbildung 5-11. Dieser Wandreibungswinkel hängt von den Scherparametern und der Lagerungsdichte des Sandes sowie von der Oberflächenrauigkeit der Kokillen

ab. Dieser Winkel ist das Maß für die physikalische größtmögliche Reibung zwischen der Wand und den anstehenden Boden (Witt, 2017). Darüber hinaus ist der Erddruck aufgrund dem Eigengewicht von Boden abhängig von der Tiefe. Beim Silodruck kommt zu einer Entlastung der Spannung vom Sand zwischen zwei parallelen Wänden, wie in der Abbildung 5-12 dargestellt.

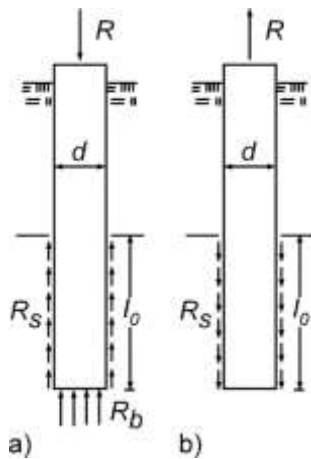


Abbildung 5-10: Prinzipskizze der Pfahltheorie beim a) Druck und b) Zug Lastabtrag ohne Berücksichtigung des eigenen Gewicht vom Pfahl (Prinz & Strauß, 2018)

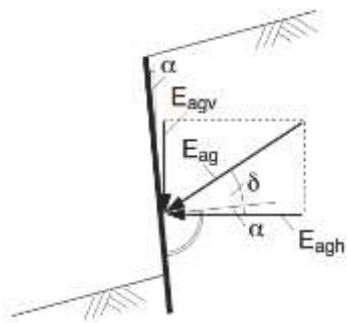


Abbildung 5-11: Prinzipskizze der aktiven Erddrucktheorie (Witt, 2017)

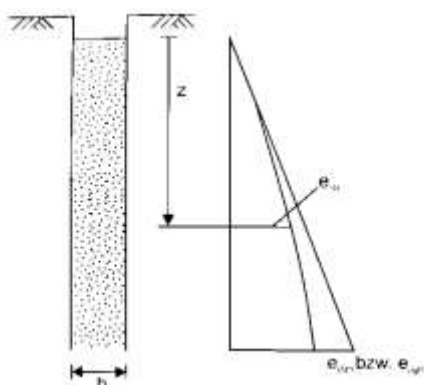


Abbildung 5-12: Tiefabhängiger Erddruckverlauf nach der Silotheorie (Ziegler, 2012)

Der Kokille ist in direktem Kontakt mit dem Quarzsand und beide liegen im Stahlinnerliner. Die Oberflächenbeschaffenheit der Kokille ist nach der Herstellung glatt und nach der Einbringung im Bohrloch könnte im extrem Fall, z.B. Korrosion, eine weniger raue Beschaffenheit vorliegen. Dadurch ist der Wandreibungswinkel  $\delta$  um 50 % des Scherwinkels zu reduzieren ( $\delta = \frac{1}{2}\phi$ ). Aufgrund des Einlagerungsprozesses und die Wärmeeinwirkung ist von einer leichten Verdichtung des Sandes auszugehen, was eine direkte Auswirkung auf dem Scherwiderstand und auf dem Young-Modul des Sandes hat. Je höher die Lagerungsdichte, desto höher die Reibungswinkel und der Young-Modul. Um dieser Prozess zu berücksichtigen, wurde in der analytischen Lösung dieser Prozess als eine Variation der Reibungswinkel des Quarzsandes verwendet, denn die angewendeten Ansätze der Erddrucktheorie nur von den Scherparametern des Bodens abhängig sind. Je höher die Reibungswinkel von Boden ist, desto weniger horizontaler Druck wirkt auf der Kokille. In Abbildung 5-13 ist die Wirkung der Scherwinkel auf den horizontalen Erddruck sowie der Entlastung der vertikalen Bodenspannungen aufgrund des Silodrucks dargestellt.

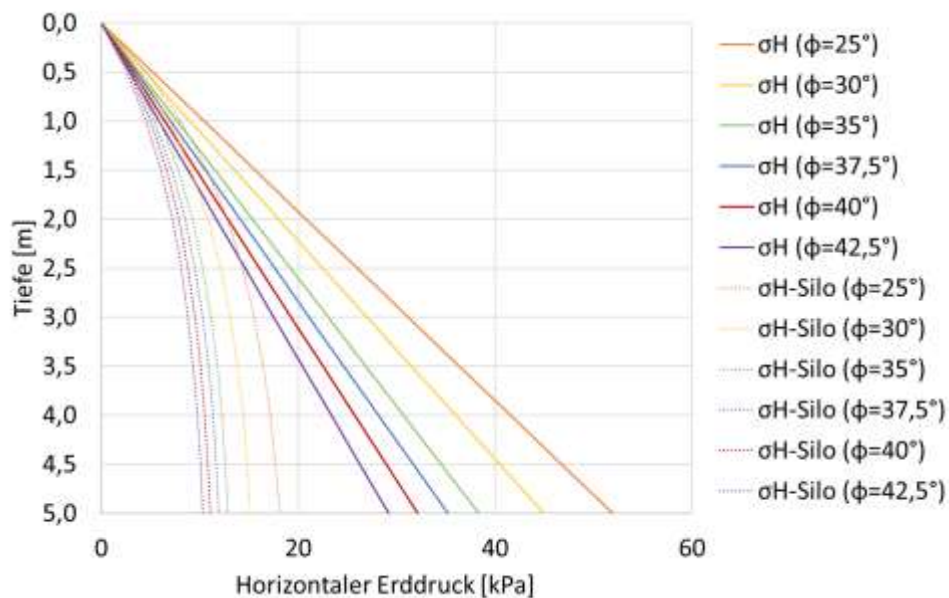


Abbildung 5-13: Horizontaler Erddruck (durchgezogene Linien) und Silodruck (gepunktete Linien) auf der Kokillenwand in Abhängigkeit des Scherwinkels

Um die Kokille aus der Bohrloch herauszuziehen wird eine Kraft benötigt, die höher als die Summe des Eigengewichts der Kokille und der resultierenden Kraft aus der Mantelreibung ist. Nach dem Ansatz der Erddrucktheorie erhöht sich dann die einwirkende Kraft dadurch um ca. 20 %. Um eine mögliche Verdichtung des Sandes zu berücksichtigen, wurde den Fall von lockerer bis dichter Lagerung des Quarzsands in der Analyse berücksichtigt. Dafür wurde der Scherreibungswinkel des Sandes von  $25^\circ$  bis  $42,5^\circ$  variiert. Die größten Kräfte treten bei lockeren Lagerungen auf, d.h. niedriger Scherreibungswinkel, da dann ein größerer Horizontalanteil auf die Kokille wirkt (siehe Abbildung 5-13). Die Lagerungsdichte, die Verzahnung (und damit die Kornform) sowie die Korngrößenverteilung haben einen Einfluss auf die Spannungsverhältnisse um die Kokille und die benötigten Ziehkräfte. Dies wird in der Abbildung 5-14 dargestellt. Bertrams et al. (2021) legen die Einlagerungsvorrichtung (ELV) der vertikalen

Bohrlochlagerung für eine Nutzlast von maximal 10.000 kg aus (BSK-Cu, Greifer und Seilgewicht). Eine Nutzlast bzw. Zugkraft von bis zu 345 kN ist damit nicht abgedeckt und bedarf einer weiteren Anpassung der ELV. Der Seildurchmesser müsste auf ca. 38 mm erhöht, die Antriebsleitung angepasst und eine neue Trommel konstruiert werden.

Im Umkehrschluss lässt sich ableiten, dass die von Bertrams et al. (2021) konstruierte ELV die Kokillen bis zu einer Schütthöhe von ca. 1,4 bis 1,7 m aus dem Sandversatz ziehen kann.

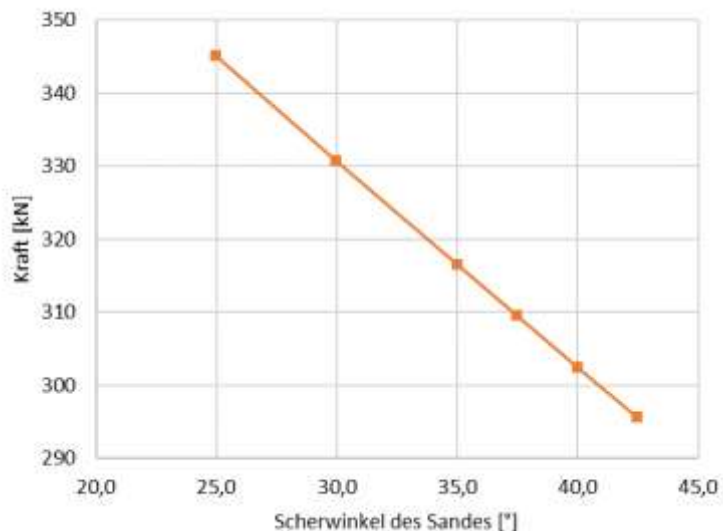


Abbildung 5-14: Benötigte Kraft für die Rückholung einer Kokille in Abhängigkeit vom Scherwinkel der Sandfüllung

Der analytische Ansatz wurde auch genutzt, um die Auswirkungen einer konischen Außenform der Kokille zu bewerten. Die ermittelte Reduzierung der benötigten Zugkraft liegt bei ca. 1% gegenüber der benötigten Zugkraft für eine zylindrische Kokille. Dies begründet sich aus der vergleichsweise geringen Ausprägung der Kegelform an der Kokille. Über die Länge der Kokille beträgt der Neigungswinkel ca.  $0,5^\circ$ . Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird empfohlen, die konische Außenform der Kokille nicht weiter zu betrachten, da der erhoffte Nutzen nur sehr begrenzt vorhanden ist und die erwarteten Nachteile (z. B. aufwändigeres technisches Design der Transferbehälter) nicht aufwiegt.

### 5.3.2 Numerische Untersuchung des Ziehens der Kokille

Für die Validierung der analytischen Aussagen bezüglich des Rückholverfahrens der Kokille wurde ein numerisches Modell mit der Software FLAC3D v. 5.01 vom ITASCA erstellt. Zur numerischen Abbildung des Rückholungsvorgangs wurde zunächst ein Modellansatz mit einem partikelbasierten Code (PCF) verfolgt. Dieser Ansatz wurde verworfen, denn das Rückholverfahren der Kokille kann als reines mechanisches Vorgang mit Hilfe von Interface-Elementen simuliert werden und es auch gute sowie schnelle Ergebnisse erzielen. Das Modell bildet das Bohrloch, den Liner, die Sandverfüllung und eine Kokille eingebettet in einen lokalen

Gebirgsbereich ab (siehe Abbildung 5-15) und wurde aufgrund der Symmetrie als Viertelmodell vernetzt. Für die Simulation des Materialverhalten der Elemente wurde als Stoffgesetz Mohr-Coulomb für den Sand und ein elastisches Stoffmodell für die anderen Elemente angewendet. Die Materialparameter für die Simulation sind aus Tabelle 5-2 zu entnehmen.

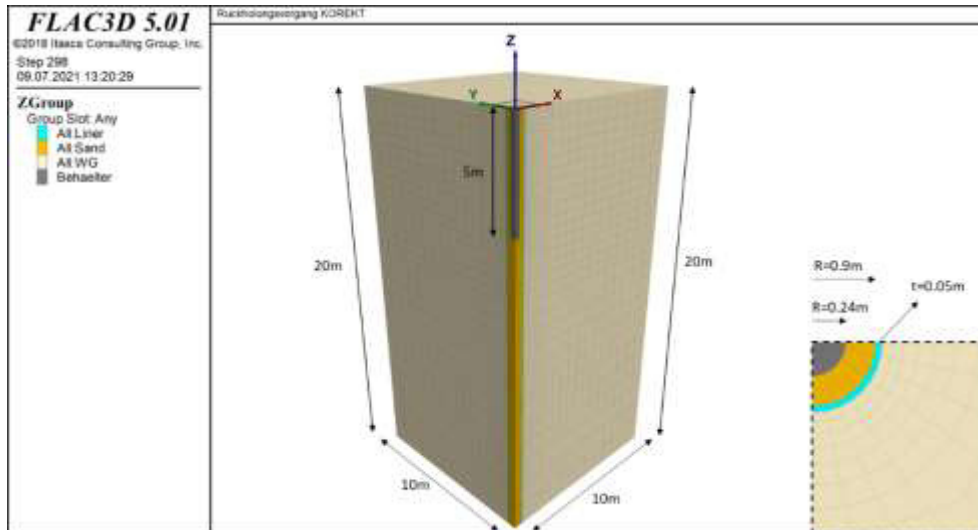


Abbildung 5-15: Geometrie des numerischen Modells für die Simulation des Rückholungsvorgangs

Tabelle 5-2: Materialeigenschaften für die numerische Simulation

Modelleinheit	Parameter	Abkürzung	Wert	Einheiten
<b>Wirtsgestein</b>	Dichte	$\rho_{WG}$	2,70E+03	kg/m <sup>3</sup>
Kristallin Hartgestein	E-Modul	$E_{WG}$	5,00E+10	Pa
	Poissonzahl	$\nu_{WG}$	2,50E-01	-
<b>Liner</b>	Dichte	$\rho_{Be}$	7,80E+03	kg/m <sup>3</sup>
Stahlliner	E-Modul	$E_{Be}$	2,31E+11	Pa
	Poissonzahl	$\nu_{Be}$	4,27E-01	-
<b>Bohrlochfüllung</b>	Dichte	$\rho_{Sa}$	1,80E+03	kg/m <sup>3</sup>
Quarzsand	E-Modul	$E_{Sa}$	3,94E+07	Pa
	Poissonzahl	$\nu_{Sa}$	4,27E-01	-
	Kohäsion	$c_{Sa}$	0	Pa
	Scherwinkel	$\phi_{iSa}$	35° - 42,5°	Pa
<b>Behälter</b>	Dichte	$\rho_{BSK}$	8,75E+03	kg/m <sup>3</sup>
BSK-3-Cu	E-Modul	$E_{BSK}$	1,17E+11	Pa
	Poissonzahl	$\nu_{BSK}$	3,00E-01	-

Für die Validierung der analytische Lösung, wurde als erstes die Erddruckspannung an der Kokillenoberfläche ausgewertet und mit der analytischen Lösung, siehe Abschnitt 5.3.1, verglichen. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmigkeit der Werte. Die Abbildung 5-16 zeigt den Vergleich der horizontale Erddruck für unterschiedlichen Scherwinkel des Quarzsands.



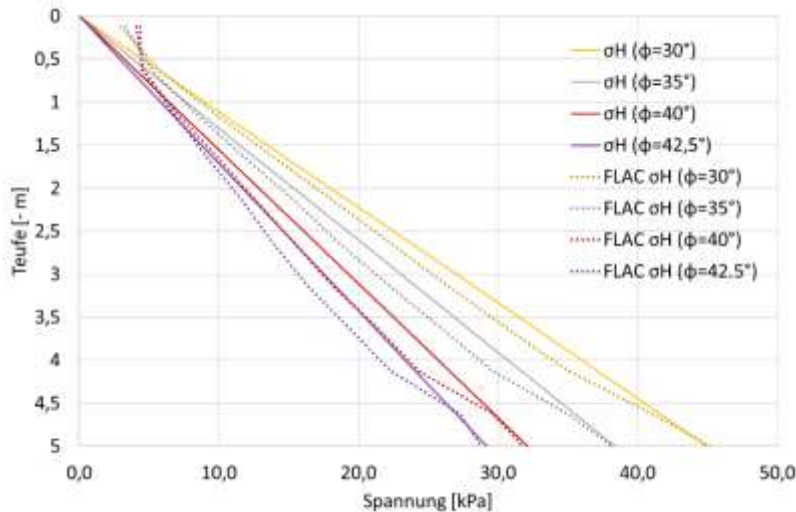


Abbildung 5-16: Vergleich der Erddruckverlauf, senkrecht auf der Kokillenoberfläche, aus der analytischen Lösung und numerische Berechnung

Die Interface-Elemente wurden an der Kontaktfläche zwischen Kokille und Sandfüllung eingesetzt, wie in der Abbildung 5-17 gezeigt ist. Für eine optimale Leistung wurden zwei separate Interface-Flächen verwendet: eine an der Kokillenoberfläche und eine andere am Kokillenboden. Die Anwendung von Interface-Elementen gibt den Vorteil die Interaktion zwischen der Sandfüllung und Kokillenoberfläche realistisch zu betrachten. Dazu bieten Interface-Elemente eine visuelle Darstellung der Rückholung der Kokille an (slip), indem es überprüft werden kann, wann der Kontakt zwischen Kokillenoberflächen und den umgebenden Sand, nicht mehr existent ist. Hierzu sind die Scherparameter der Interface-Elemente auf den Materialparameter des Sandes und der Kokille angelehnt und basieren auf die Werte in der Tabelle 5-2 und der Tabelle 5-3. Die durchschnittlichen Normal- und Scherspannungen sowie die Normal- und Scherverschiebungen entlang der Kontaktfläche wurden in FLAC3D mit einer eigens geschriebenen Routine (FISH-Funktion) erfasst. Die Interaktion zwischen der Sandfüllung und der Oberfläche des Stahl liners wurde in dieser Analyse nicht berücksichtigt.

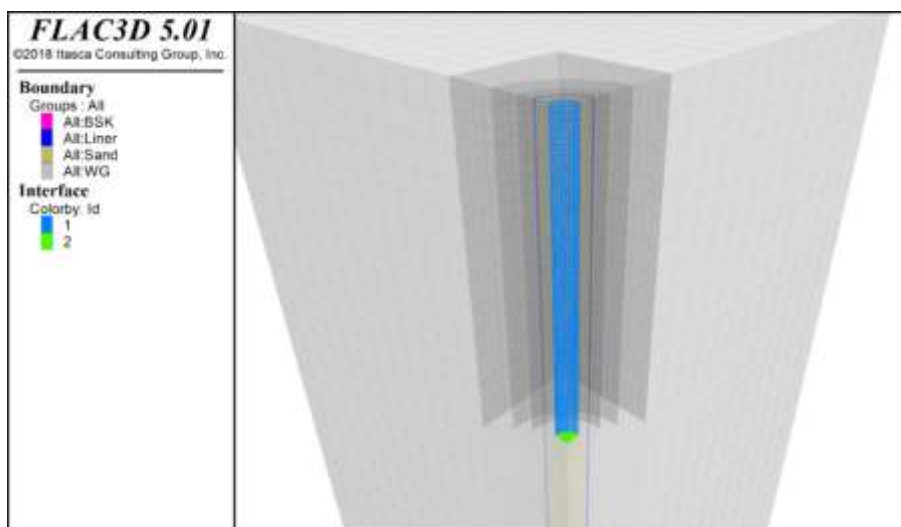


Abbildung 5-17: Numerisches Modell mit Interface-Elementen aus FLAC3D an der Kontaktfläche zwischen Kokille und Sandfüllung

Das Ziehen der Kokille wurde durch eine einwirkende Kraft am Kokillenkopf simuliert. Dabei wurde das Eigengewicht der Kokille berücksichtigt. Die Kraft wurde schrittweise erhöht. Dies wird ebenfalls und durch eine FISH-Routine gesteuert. Die Simulation wurde fortgeführt, bis im Modell eine „Lockerung“ an der gesamten Kontaktfläche zwischen der Oberfläche der Kokille und des Sandes festzustellen war (siehe Abbildung 5-18). Die ermittelten Kräfte stimmen mit den analytischen Lösungsansätzen überein.

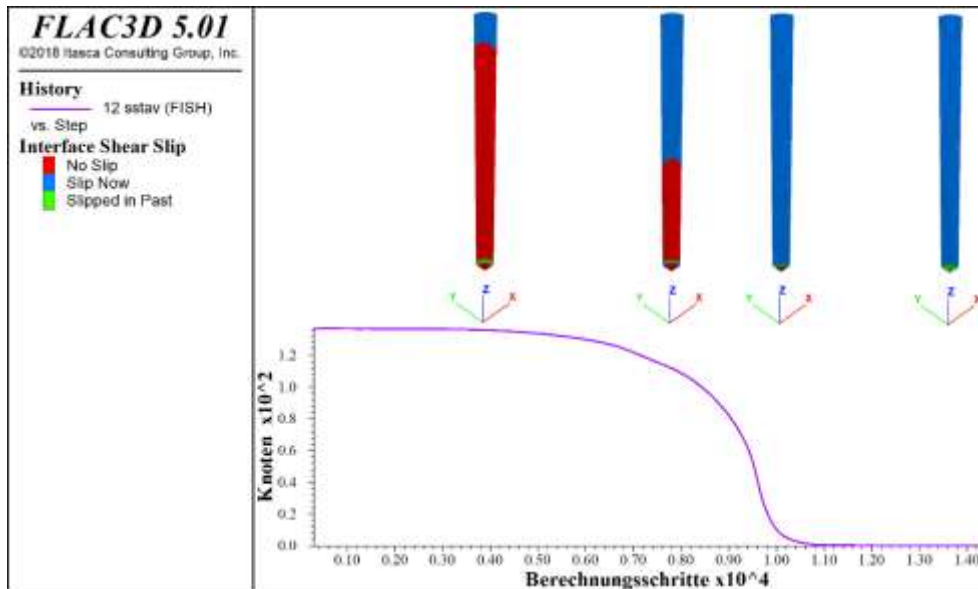


Abbildung 5-18: Visualisierung des Zeitpunktes der komplette Befreiung der Kokille

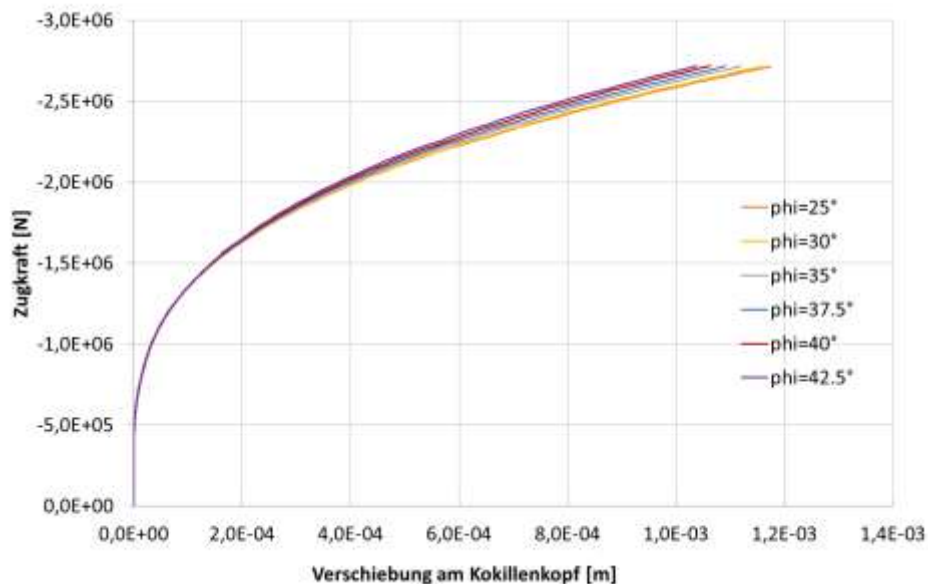


Abbildung 5-19: Ziehekraft vs. Verschiebung am Kokillenkopf unter Variation des Scherwinkel von Sand

## 5.4 Entnahme des Sandversatzes

Ist die rückzuholende Kokille bereits mit Sand versetzt oder sollen im Anschluss weitere Kokillen aus einem Bohrloch entnommen werden, muss der vorhandene Sandversatz wieder entfernt werden. Dies kann mit der in Herold et al. (2018) entwickelten Vorrichtung erfolgen. Eine ausführliche Beschreibung der Saugvorrichtung für den Sandversatz in einem vertikalen Einlagerungsbohrloch ist in Herold et al. (2018) zu finden. Der Aufbau der Saugkokille ist in Abbildung 5-20 dargestellt. Das Funktionsprinzip kann auf die vertikale Bohrlochlagerung im Kristallin übertragen werden. Technische Anpassungen ergeben sich aus der Größe der Kokillen und des Bohrlochinnendurchmessers. Die Saugvorrichtung befindet sich in einem Transferbehälter, dessen äußerer Aufbau vergleichbar ist mit dem Transferbehälter der Bohrlochkokillen. Der Transferbehälter der Saugkokille ist ebenso mit der Einlagerungsvorrichtung handhabbar.

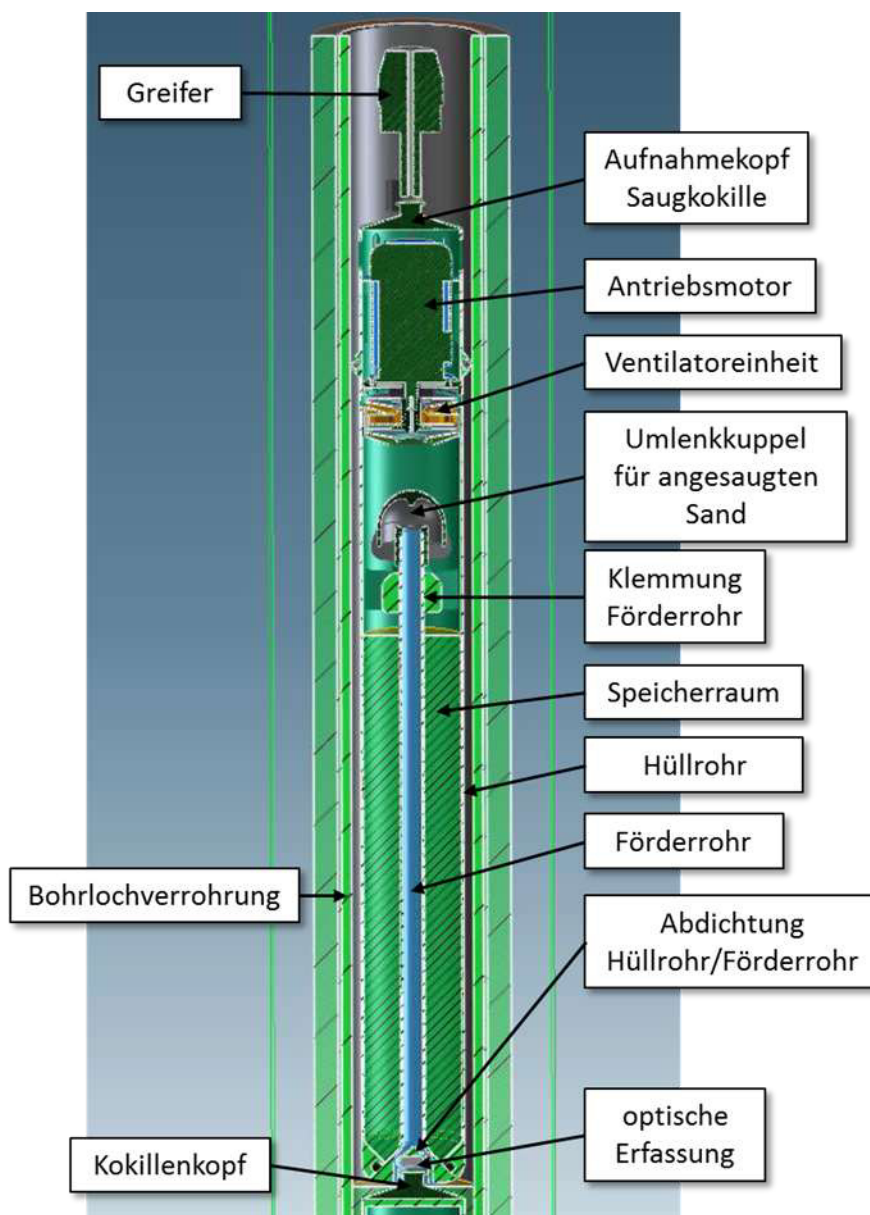


Abbildung 5-20: Schnittbild Saugvorrichtung im Bohrloch, (Herold et al., 2018)

Sande sind nicht bindige Böden, dessen Korngrößenbereich zwischen 0,063 mm und 2,00 mm liegt (Okrusch & Matthes, 2013). Der hohe Quarzanteil (Siliziumdioxid) führt zu einem hohen Widerstand des Sandes gegen Verwitterungsprozesse. Die Scherfestigkeit vom Sand wird primär durch seine Lagerungsdichte, Kornform, Korngrößenverteilung sowie die Belastung beeinflusst. Die äußeren Belastungen über die Berührungspunkte (Kontaktpunkte) der Sandkörner werden in Spannungen und Reibungen umgewandelt. Zum einen durch den Kontakt zwischen den Sandkörnern selbst und zum anderen durch den Kontakt zwischen den Sandkörnern mit einer Begrenzungsfläche, wie dem Behälter und dem Innenliner. Aufgrund der Wechselwirkungen zwischen den Sandkörnern nimmt die Lagerungsdichte dieser Körner sowie deren Kornform großen Einfluss auf das mechanische Verhalten von Sand (Kolymbas, 2018). Die Lagerungsdichte lässt sich primär in eine lockere und eine dichte Lagerung unterscheiden. Dicht und locker gelagerte Sande verhalten sich unter einer gleichen Scherbeanspruchung unterschiedlich, wie in der Abbildung 5-21 dargestellt ist. Die Lagerungsdichte und die Kornform des Sandes wirken sich ebenso auf den Winkel des Scherwiderstandes aus. Bei locker gelagerten, runden Sanden kann es unter wesentlich geringeren Belastungen zu Setzungen und/oder Kompaktionen kommen.

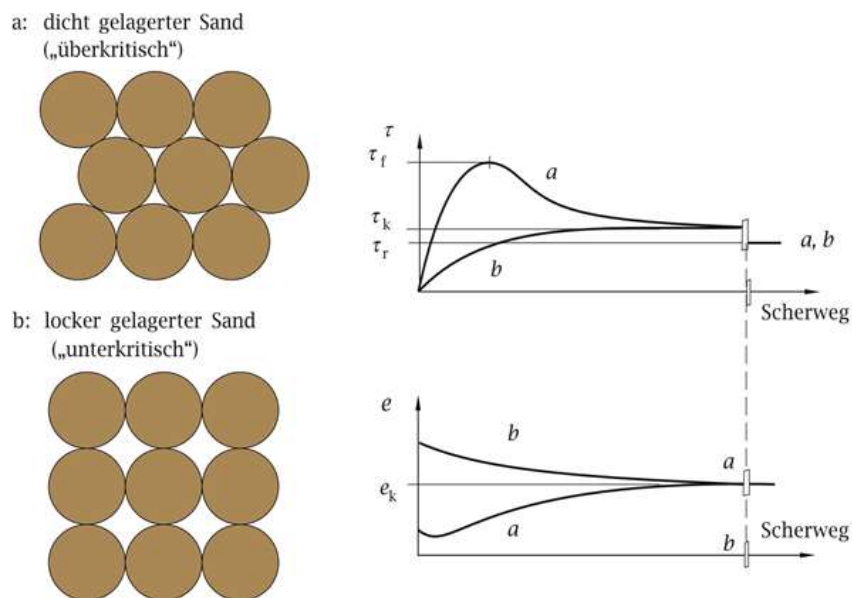


Abbildung 5-21: Lockere (links) vs. dichte (rechts) Lagerung Abhängigkeit der Schubspannung und der Porenzahl  $e$  zum Scherweg (Kolymbas, 2018)

Tabelle 5-3: Tabellarische Beziehung zur Ableitung des Scherwinkels und des dränierten Young's Modul  $E'_s$  von Quarzsand

Gewichtssonde, halbe Um- dreung/0,2m	Bezogene Lagerungsdichte	Winkels des Scherwiderstands $\varphi$ [°]	Dräniertes Young's Modul $E'_s$ [MPa]
0 - 10	sehr locker	29 - 32	< 10
10 - 30	locker	32 - 35	10 - 20
20 - 50	mitteldicht	35 - 37	20 - 30
40 - 90	dicht	37 - 40	30 - 60
> 80	sehr dicht	40 - 42	60 - 90

Eine Zementation des Sandes aufgrund der gekoppelten mechanisch, thermisch und chemische Einwirkungen in Nahfeldbereich kann sich negativ auf den Rückholprozess auswirken. Aus diesem Grund ist das Kompaktionsverhalten von Sand zu untersuchen um mögliche Zementationsprozesse auszuschließen.

Wesentliche Prozesse der Diagenese sind die Kompaktion und die Zementation. Die wichtigsten Prozesse der Diagenese gehen auf den Porenraum des Sediments zurück. An den Prozessen der Diagenese sind Minerale- und Gesteinspartikel, Porenlösung und Gase aus dem Porenraum beteiligt. Bei einer Kompaktion des Bodens verringert sich der Porenraum unter einer Belastung, denn der Kontakt zwischen einzelnen Körner wird enger und der Sand verdichtet sich (Okrusch & Matthes, 2014), (Vinx, 2015). Zementation ist dagegen ein chemisch-physikalischer Prozess, bei dem Minerale, wie Quarz oder Calcit, über wässrige Lösungen in die Porenräume des Bodens transportiert und dort als Zemente ausgefällt werden. Dadurch verringert sich die Porosität des Ausgangsmaterials und währenddessen werden die Körner des Sediments miteinander verkittet. Die Umwandlung von Sedimenten zu Sedimentgesteinen resultiert aus erhöhten Belastungsdrücken und Temperaturen (Okrusch & Matthes, 2014).

Die Diagenese findet in einem Temperaturbereich von 0 °C bis zu einer Höchsttemperatur von  $150 \pm 50$  °C statt (s. Abbildung 5-22). Oberhalb dieser Temperaturen beginnt die Gesteinsmetamorphose. Der Belastungsbereich der Diagenese liegt dann zwischen 0 bis etwa 0,50 GPa. Durch Belastungsdrücke, beispielweise durch jüngere Sedimentüberdeckung, kann eine Kompaktion und Entwässerung eintreten. Nach Vinx (2015) verringert sich bei diesem Vorgang der Porenraum, d.h. der Kontakt der Körner wird enger und das Sediment verdichtet sich.

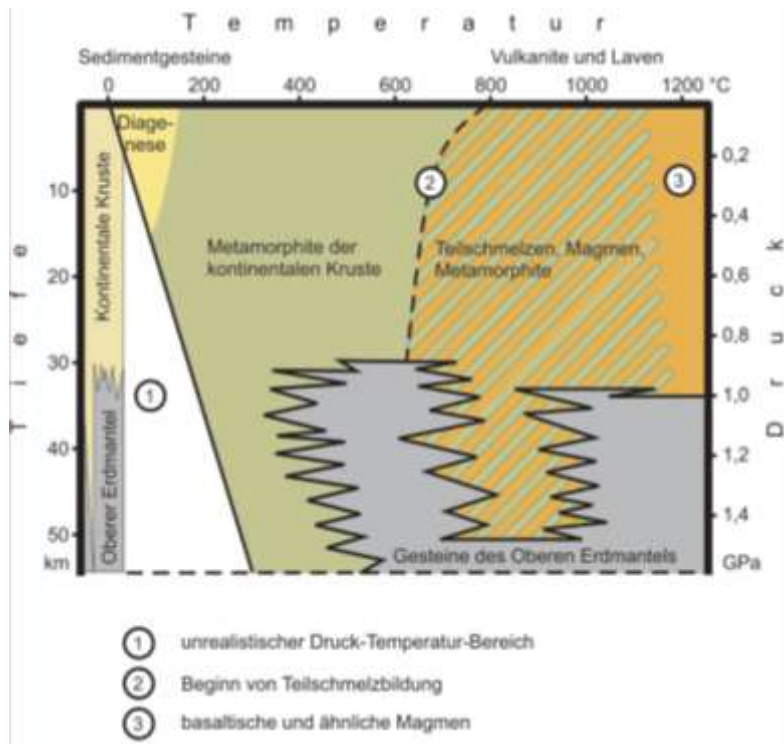


Abbildung 5-22: Schematische Darstellung der Bildungsbereiche der wesentlichen Gesteinsgruppen in Abhängigkeit von Druck und Temperatur (Vinx 2015)

Einen weitaus größeren Einfluss auf die Verfestigung von Sedimenten hat nach Okrusch & Matthes (2014) der chemisch-physikalische Prozess der Zementation. Bei der Zementation verkittet ein Bindemittel die Körner miteinander. Dieses Bindemittel entsteht primär bei der Drucklösung der Quarzkörner. Bei der Drucklösung werden unter Druck stehende Quarzkörner gelöst und chemische Bestandteile werden an das Porenwasser abgegeben. Die Abbildung 5-23 illustriert die Deformation eines Quarzkorns durch eine Drucklösung.

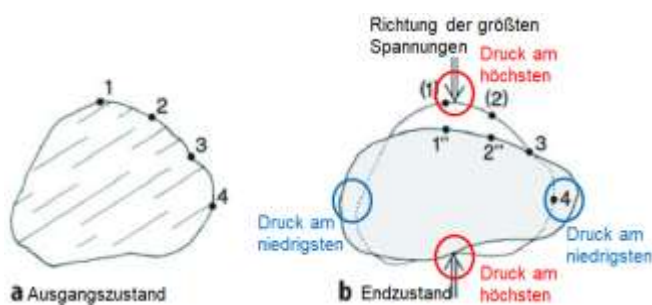


Abbildung 5-23: Deformation eines Quarzkorns durch Drucklösung (Okrusch & Matthes 2013)

Durch eine erhöhte Belastung an den Kornkontaktflächen, die senkrecht oder unter einem großen Winkel zur Belastungsrichtung liegen, kommt es zu einer Drucklösung. Die Quarzkornbereiche im Druckschatten werden nicht gelöst. Das gelöste Material wird entlang der Kornoberfläche in einem Bereich geringeren Drucks (Druckschatten) transportiert. Hier wird aus



der Porenlösung der Quarz wiederausgefällt und es bilden sich Anwachssäume. Diese Anwachssäume (Kornwachstum) verbinden/verkitten die Quarzkörner miteinander. Für die Drucklösung muss ein geringer Fluid-Film auf den Quarzkörner sein. Okrusch & Matthes (2013) führen weiterhin aus, dass dies durch einen Porenraum begünstigt wird, der die Porenlösung zirkulieren lässt

## 5.5 Freilegen des Bohrloches – Rückbau des Widerlagers und des Dichtelementes

Das Freilegen des Bohrloches umfasst den Rückbau des Hartgesteinswiderlagers und den Rückbau der Bentonitdichtung inkl. Filterschicht. Im ersten Schritt muss das Hartgesteinswiderlager entnommen werden.

Jobmann & Burlaka (2019) skizzieren die Konstruktion des Hartgesteins Widerlagers als trapezförmiges, aus Einzelsteinen zusammengesetztes Element. Die Steine sollen aus einem Baustoff gefertigt sein, der eine zum Wirtsgestein vergleichbare Festigkeit und Dauerhaftigkeit aufweist. Idealerweise sind die Blöcke/Steine auch aus dem Wirtsgestein oder vergleichbarem arteigenen Gestein gefertigt. Der Einsatz von Beton ist aus Gründen der Langzeitsicherheit/Beständigkeit nicht vorgesehen. Der Einbau der Blöcke erfolgt mit Manipulatoren oder Löffelbaggern. Nach dem Einbau und mit einsetzendem Quelldruck des Dichtelementes wird sich das Widerlager im Gebirge verspannen. Ein zerstörungsfreier Rückbau des Widerlagers ist nicht möglich. Zur Entnahme des Widerlagers bzw. der einzelnen Blöcke muss dieses mit Kompaktbaggern oder Manipulatoren und Hydraulikhämmern gebrochen und mit Grabwerkzeugen auf dem Bohrloch entfernt werden. Sobald der kraftschlüssige Verbund des Widerlagers aufgelöst ist, können die einzelnen Steine/Blöcke mit dem Manipulator entnommen werden.

Zur Auswahl einer geeigneten Methode zum Wiederaufschluss des Bohrlochverschlusses müssen die Materialeigenschaften zum Zeitpunkt der Rückholung bekannt sein. Da anzunehmen ist, dass sich mit fortschreitender Dauer des Verschlusses die Eigenschaften verändern, wird eine technische Lösung angestrebt die, unabhängig von der Dauer des Verschlusses, universell einsetzbar ist (Jobmann & Burlaka, 2019). Ein Grund hierfür ist die Tatsache, dass zum Zeitpunkt der Planung ungewiss ist, wann eine Rückholung erforderlich wird.

Der Bentonit im Bohrlochverschluss erlaubt durch seine geringe hydraulische Durchlässigkeit und sein Quellvermögen eine Abdichtung des Bohrloches gegen das restliche Grubengebäude. Mit dem Einbau ist das Material erdfeucht bzw. teilgesättigt und hat eine begrenzte Festigkeit, die im Wesentlichen von der Einbaudichte bestimmt wird. Juvankoski (2013) hat gezeigt, dass die einaxiale Druckfestigkeit von kompaktiertem MX-80 Bentonit bis ca. 13 MPa betragen kann. Vorkompaktierte Bentonitblöcke mit einer Trockendichte von 1700 kg/m<sup>3</sup> weisen eine einaxiale Druckfestigkeit von ca. 4 MPa auf. Mit den genannten Festigkeiten zwischen 4 MPa und 13 MPa entspricht das Material beim Einbau einem geringsten Gebirge bzw. eher einem Boden. Die Entnahme mit Grabwerkzeugen ist damit grundsätzlich möglich.

Mit voranschreitender Verschlussdauer und zutretender Lösung sättigt der Bentonit weiter auf und das Quellen setzt ein. Mit steigendem Wassergehalt neigt das tonige Material beim Graben mehr und mehr zum Verkleben der Grabwerkzeuge. Die Entnahme ist so immer noch möglich, die Grableistung wird aber reduziert sein.

Die technische Herausforderung bei der Entnahme des Bentonits liegt nicht im Gewinnungsvorgang selbst. Das Graben ist technisch einfach umzusetzen. Die Geometrie des Bohrloches erschwert aber den Einsatz konventioneller Geräte wie etwa (Tunnel- oder Tief-) Löffelbaggern. Zum einen bedingt die erforderliche Grabtiefe von ca. 3 m den Einsatz von Kompaktbaggern, Abbruchrobotern oder typischer Tunnelbagger, wie sie bereits in Herold et al. (2018) beschrieben sind. Zum anderen beschränkt der enge Bohrlochdurchmesser (0,9 m) den Arbeitsbereich des Baggers und verhindert ein effektives Graben. Der Einsatz von Schallengreifern kann hier den Grabvorgang erleichtern. Trotzdem bleibt der Arbeitsraum sehr beengt. Alternativ kann daher der Bentonit mit einem Saugbagger entnommen werden. Mobile Saugbagger als Aufbauten auf konventionelle LKWs sind in der Lage über mehrere Dezimeter und bis in ca. 15 m Tiefe loses Material abzusaugen. Die tatsächliche Saugleistung hängt dabei auch von der Art und Korngröße des Materials ab. Aus dem Tiefbau sind kleinbauende Manipulatoren mit integriertem Einlass für eine Saugleitung bekannt. Zusätzliche Werkzeuge etwa zum Lösen oder Brechen stärker verfestigter Bereiche oder dem Putzen der Bohrlochwandung werden aber zusätzlich benötigt. Zusätzlich ist zu beachten, dass alle Tätigkeiten die die Rückholung bzw. die Entnahme der Kokillen vorbereiten im KB stattfinden.

## **5.6 Bohrloch für Entnahme vorbereiten**

Nach dem Rückbau des Bohrlochverschlusses liegt die verschlossene Bohrlochverrohrung und im Bereich des Dichtelementes ebenso die Bohrlochkontur frei. Im Bereich des Widerlagers ist die Bohrlochkontur aufgeweitet. Vor der Entnahme des Sandversatzes und der Kokillen sind die Kontur im Bereich des Bohrlochverschlusses zu sichern und die Bohrlochschleuse zu errichten. Im Anschluss kann die Bohrlochverrohrung geöffnet werden.

Das Bohrlochinnere/der Innenraum der Verrohrung sind dem Sperrbereich zugeordnet. Mit dem Öffnen des Innenliners wird ein direkter Zugang zum Sperrbereich (Innenraum des Liners) geschaffen. Es ist dafür Sorge zu tragen, dass bis zum Einbau der Bohrlochschleuse kein unbefugter Zugang zum Sperrbereich erfolgt. Vorbeugend zu einer möglichen Kontaminationsverschleppung müssen alle Arbeitsschritte am Innenliner unter einer temporären Einhausung erfolgen. Ziel der Einhausung ist die vorübergehende Abtrennung des Arbeitsbereiches vom restlichen KB. Dies erlaubt eine bessere Kontrolle aller ein- und ausgehender Personen, Ausrüstung, Materialien und Medien. Da alle Bohrlochüberfahrungsstrecken als Bildstrecken ausgeführt sind und (zumindest im Referenz ewG) nur kurz sind kann die Einhausung der ganzen Blindstrecke erfolgen. Für die Dauer der Arbeiten an der offenen Verrohrung ist der eingehauste Bereich separat zu bewettern. Die Sonderbewetterung ist bis in den Arbeitsbereich im Bohrloch zu führen. Die Einhausung wird an eine kontinuierliche Raumluftüberwachung angeschlossen, vgl. dazu auch Herold et al.(2018).

## 5.7 Wiederauffahrung für eine Rückholung

Die Neuerrichtung der Rückholungsstrecken beginnt im Referenzkonzept am Füllort vom Schacht oder am Rampenfuß, um eine Wiederauffahrung durch alle Bereiche des Grubengebäudes zu berücksichtigen. Bei der Errichtung des Grubengebäudes wird im kristallinen Gestein aufgrund der hohen Gesteinsfestigkeit und damit verbundener hoher Standfestigkeit auf konventionellen Vortrieb mittels Bohren und Sprengen gesetzt, vgl. Bertrams et al. (2017). Der Vortrieb mit Teil- oder Vollschnittmaschinen ist im Vergleich dazu sehr zeitintensiv und mit hohem Verschleiß der Werkzeuge verbunden. Bei hohen Gesteinsfestigkeiten kann die Auffahrung mittels Teilschnittmaschine (TSM) außerdem zu so hohen Erschütterungen führen, dass eine Auffahrung mittels Bohren und Sprengen im Vergleich gebirgsschonender abläuft. Der Prozess der Wiederauffahrung beginnt im Referenzkonzept außerhalb der multiplen ewG. In diesen Zugangsstrecken zum ewG sind hydraulisch wirksame Klüfte denkbar. Unabhängig von ihrer Anordnung sind folgende Verschlusselemente wiederaufzufahren:

- Widerlager aus Beton
- Asphaltabdichtung
- Bentonitabdichtung (Ca-Bentonit),
- Aufsättigungskammer aus Schotter
- Versatzmaterial (Ausbruchsmaterial oder Ausbruchsmaterial-Bentonit-Gemisch)

Das Betonwiderlager wird zunächst durch einen Hydraulikbagger oder Manipulator mit Hydraulikmeißel gelöst. Größere Brocken können von diesem direkt auf der Sohle zerkleinert werden. Ein Lader kann das zerkleinerte Haufwerk abtransportieren. Nach Jobmann & Burlaka (2019) sollen die Bentonitabdichtungen durch den Einbau von vorkompaktierten Blöcken mit einer Trockendichte der kompaktierten Blöcke von ca.  $\rho \approx 1800 \text{ kg m}^{-3}$  und einem Quelldruck von 0,5 MPa erfolgen. Je nach verwendeter Bentonitsorte ist dieser Wert zu prüfen und ggf. anzupassen. Der Quelldruck löst sich beim Abtragen des Widerlagers. Der nichtkohäsive Bentonit des Dichtelementes wird sich lockern bzw. im begrenzten Umfang eine Volumenzunahme erfahren. Zum Lösen des Bentonits werden normale Grabwerkzeuge genutzt. Das gelöste Material kann von dem Lader anschließend abtransportiert werden. Der Schotter in den angeschlossenen Aufsättigungskammern verbleibt über die gesamte Dauer des betrachteten Zeitraumes locker, begünstigt durch die Sättigung mit Lösungszutritten oder eingeleitetem Wasser. Der Schotter kann einfach mit dem Lader geladen und gefördert werden.

Die Asphaltabdichtung verhält sich etwas anders. Sie weist eine Zähigkeit auf die eine Verformung beim Entfernen angrenzender Dichtelemente erwarten lässt. Die Zähigkeit der Asphaltabdichtung wird das angrenzende Material verkleben und ein maschinelles Laden erschweren. Jobmann & Burlaka (2019) skizzieren für die Asphalt-Elemente einen Kalteinbau in Blockform. Eine Monolithisierung erfolgt zum einen durch den Druck der Blöcke selbst, also das Eigengewicht, und zum anderen durch den Druckaufbau während des Quellprozesses im Bentonit-Element. Ein vergleichbares Konzept wurde bereits durch Knoll et al. (2010) unter in situ Bedingungen erprobt. Das dort untersuchte Asphalt-dichtelement wurde für einen Streckenverschluss im Salz bzw. Carnalitit entwickelt. Im Rahmen der Untersuchungen wurde ein Dichtelement aus vorgefertigten Gussasphaltblöcken im Kalteinbau erprobt, siehe Abbildung 5-24. Die Gussasphaltblöcke haben einen Bindemittelanteil zwischen 12 % bis 20 % Oxidationsbi-

tumen. Der Zuschlag besteht aus Natursand und Tonschiefermehl. Die einzelnen Blöcke wurden nach dem Einbau monolithisiert. Dazu wurde auf die Stirnseite des Verschlusses ein Gummkissen aufgebracht, über das Druck (bis 4 bar) und Temperatur (bis 60 °C) aufgebracht werden konnten. Um eine bessere Anbindung an die Kontur zu gewährleisten wurde diese mit einem Bitumenvoranstrich versehen. Zusätzlich wurde ein kurzer Schlitz in die Kontur gefräst, siehe Abbildung 5-24.



Abbildung 5-24: links: Einbau der Asphaltsteine, mitte: Gebirgsschlitz mit Voranstrich und Asphaltstein, rechts: fertige Asphaltmauerung vor dem Einbau des Druckkissens, nach Knoll et al. (2010)

Das Asphaltdichtelement kann trotz starker Verformung als noch standfest zwischen Sohle und Firste angenommen werden. Ein Lösen durch schneidende Verfahren ist nicht vorgesehen. Das Bindemittel würde die Schneidwerkzeuge verkleben. Das Material soll ebenso wie die anderen Verschlussmaterialien mit einem (Löffel-)Bagger und entsprechenden Grabwerkzeugen abgetragen werden.

Die Wiederauffahrung des Grubengebäudes im Zuge der Rückholung ist durch die Entnahme des Versatzes gekennzeichnet. Tatsächliche Neuauffahrungen im standfesten Wirtsgestein werden nur untergeordnet stattfinden. Da das Versatzmaterial deutlich weicher als das ursprüngliche Wirtsgestein ist. Basierend auf den von Jobmann & Burlaka (2019) beschriebenen Wirkprinzipien des Streckenverschlusses und dem damit einhergehenden Wasserzutritt, ist über die gesamte Streckenlänge von mindestens erdfeuchtem Material auszugehen. TSM sind in ihrer Funktion sehr anfällig gegenüber feuchtem Material, d.h. sie „verkleben“ und hohe Standzeiten für die Reinigung der Maschine sind zu erwarten. Von den Verschlussbauwerken ist nur das Widerlager grundsätzlich geeignet, um von einer TSM aufgefahren zu werden. Die Gesamtlänge der Widerlager ist jedoch im Vergleich zu den restlichen Verschlussbauwerken sehr gering. Außerdem ist der Einsatz von TSM bei „mixed-face“ Bedingungen häufig nicht effizient, was im Fall der verschiedenen aufgereihten Verschlussbauwerke und auch der Entnahme des Versatzes der Fall ist. Damit ist eine TSM für diesen Anwendungsfall nicht geeignet. Während der Betriebszeit, also in einem Zeitraum < 100 Jahren, ist davon auszugehen, dass das Versatzmaterial, ausgenommen die Widerlager, in einem lockeren, leicht lösbaaren Zustand bleiben. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Materialeigenschaften ein Lösen und Transportieren mit Hilfe von Ladern möglich macht. Diese waren bereits bei der

Auffahrung im Einsatz und in ihrer Handhabung beim Personal bekannt. In der Detailbetrachtung der Wiederauffahrung stellen die spezifischen Eigenschaften der unterschiedlichen Dichtelemente die Technik vor wechselnde Herausforderungen. Stärker kompaktierte Bereiche können auch mit Tunnelbaggern gelöst und mit den Ladern gefördert werden.

Am Übergang zwischen den Haupt- und Bohrlochüberfahrungsstrecken sind ebenfalls Betonwiderlager verbaut. Hinter diesem Widerlager ist die gesamte Länge der Bohrlochüberfahrungsstrecken mit einem Gemisch aus aufbereitetem Ausbruchmaterial und Bentonit verfüllt (Jobmann & Burlaka, 2019). Die Richtstrecken innerhalb eines ewG werden analog zu den Bohrlochüberfahrungsstrecken versetzt und mit einem Streckenverschluss abgeschlossen. Der zugesetzte Bentonit wird das Porenvolumen des versetzten Ausbruchmaterials über die Zeit ausfüllen. Während der angenommenen Standzeit, innerhalb derer es noch zu einer Rückholung kommen kann wird das Material sich verfestigen, jedoch insgesamt brüchig bleiben. Das Lösen kann daher ebenfalls mit dem bereits eingesetzten Fahrladern und/oder Tunnelbaggern durchgeführt werden. Die Streckenlänge, die hier wiederaufgefahren werden muss, kann sehr lang sein, aufgrund der Feuchte des Versatzmaterials ist hier der Einsatz einer TSM trotzdem nicht geeignet. Ob ein Hydraulikmeißel überhaupt eingesetzt werden muss, oder sich das Material beim Entfernen des Widerlagers selbstständig löst und einfach geladen werden kann, hängt von der Standzeit des Versatzes zum Zeitpunkt der Rückholung ab.

Die Betonwiderlager am Eingang der Bohrlochüberfahrungsstrecken sollen nach Jobmann & Burlaka (2019) aus Niedrig-pH-Beton erstellt werden. Entsprechende Betonrezepturen weisen im Allgemeinen erhöhte Festigkeiten auf. Das Lösen des Widerlagers durch Bohren und Sprengen ist grundsätzlich möglich, soll aber nicht angewendet werden. Stattdessen soll, wie an den anderen Verschlusselementen auch, der Rückbau mit Hilfe von (Tunnel-)Baggern oder Manipulatoren erfolgen. Eine schneidende Gewinnung mit TSM ist auch hier grundsätzlich denkbar. Allerdings erfordert die erhöhte Betonfestigkeit zum einen den Einsatz schwerer TSM mit entsprechender Schneidleistung und zum anderen ist für die bisher beschriebenen Arbeitsschritte kein Einsatz von TSM geplant. Das Vorhalten der Geräte speziell für diesen Anwendungsfall wird deshalb nicht favorisiert. Stattdessen soll die vorhandene Technik genutzt werden.

## **5.8 Einteilung in Strahlenschutzbereiche**

Alle Grubenräume in denen die Gebinde gehandhabt werden oder diesen wettertechnisch nachgeschaltet sind, sind dem KB zugeordnet. Alle Arbeitsschritte in Verbindung mit der Rückholung finden dementsprechend auch im KB statt. Anders als im Einlagerungsbetrieb finden somit auch alle eher bergbaulichen Tätigkeiten im KB statt. Dies gilt auch für die Wiederauffahrung bereits versetzter oder verschlossener Bereiche. Im Zuge der Wiederauffahrung werden alle Grubenteile, die vor der Verfüllung oder dem Verschluss Teil des KB waren, ebenfalls wieder dem KB zugeordnet. Es ist dafür Sorge zu tragen, dass im KB potenziell vorhandene Kontaminationen nicht im Grubengebäude verschleppt werden. Das anfallende Haufwerk muss vor dem Verlassen des KB gemäß § 44 StrlSchV, (2018) auf Kontamination/Aktivierung hin geprüft und ggf. gemäß § 29 StrlSchV (2018) freigemessen werden. Dies kann beispielsweise notwendig sein, um das Haufwerk über Tage aufzuhalten



oder anderweitig zu nutzen. Die radiologische Überwachung der Neuauffahrung und das potenzielle Freimessen des gesamten Haufwerks stellen einen großen technischen und zeitlichen Aufwand dar und beeinflussen damit die Errichtungs- und Betriebsdauer des Rückholungsbergwerks.

Zur Erleichterung der Rückholungsarbeiten besteht theoretisch die Möglichkeit, die Bohrlochüberfahrungsstrecken oder die Hauptstrecken vor dem Versatz aus dem KB zu entlassen. Dies ist mit einem erheblichen zeitlichen und technischen Aufwand verbunden, würde aber eine spätere Rückholung evtl. erleichtern. Dies gilt aber nur soweit wie potenzielle Kontaminationen oder Freisetzungen entlang der geplanten Streckenachsen ausgeschlossen werden können. Zum heutigen Zeitpunkt und auch während eines zukünftigen Einlagerungsbetriebes ist nicht bekannt ob eine Rückholung überhaupt umgesetzt wird bzw. warum eine Rückholung notwendig wird. Der Nutzen, resultierend aus dem Entlassen von Grubenteilen aus dem KB als vorsorglich getroffene Maßnahmen zur potenziellen Erleichterung der Rückholung, ist im Vergleich zum notwendigen Aufwand daher äußerst fraglich. Mit Blick auf die in Abschnitt 5.2 skizzierten Szenarien einer selektiven Rückholung wird deutlich, dass solche Tätigkeiten auch im laufenden Endlagerbetrieb erfolgen können. Die Arbeiten müssen dann in der aktuellen Gestalt der Strahlenschutzbereiche durchgeführt werden. Eine vorzeitige Aufhebung der KBs ist damit nicht zielführend.

Zur Minimierung einer möglichen Kontaminationsverschleppung sollten die Bohrlochüberfahrungsstrecken in denen eine Rückholung stattfinden soll, für den Rückbau des Bohrlochverschlusses und die Neuerrichtung der Bohrlochsleuse eingehaust werden.

## **5.9 Konturbehandlung/Umgang mit Ausbau**

Bei der Planung des einsöhligen Grubengebäudes werden Querschnittsprofile zugrunde gelegt, die die jeweiligen Mindestmaße für die vorgesehenen Anwendungen garantieren. Für zusätzlichen Ausbau oder eine Konvergenz während der Auffahrung bzw. während der Betriebsphase, müsste demnach zusätzliches Material ausgebrochen werden. Bertrams et al. (2017) beschreiben für die Errichtung der einzelnen Grubenräume gebirgsschonendes Sprengen als Vorzugsvariante. Aufgrund der Annahmen zur Standfestigkeit und zum Gebirgsverhalten werden weiterhin, Ausbauempfehlungen für bergmännische Auffahrungen nach dem Q-System gegeben. Demnach sind im gewählten Gebirge für temporäre Grubenbaue keine Stützmittel nötig. Dies gilt ebenso für die Bohrlochüberfahrungsstrecken. Mit zunehmender Standzeit oder aufgrund größerer Querschnitte wird erst zur Bedarfsankerung und schließlich zu einer Systemankerung ohne bzw. mit Spritzbeton geraten. Die Ausbauempfehlungen sind in Abschnitt 4.3 detailliert beschrieben.



## 5.10 Wassertechnik und Klimavorausbetrachtung

### 5.10.1 Wetterführung im Normalbetrieb bzw. Einlagerungsbetrieb

Das Grubengebäude für die Einlagerungsvarianten der vertikalen Bohrlochlagerung besteht aus einem Doppelstreckensystem und davon senkrecht abzweigenden Blindstrecken. Die Blindstrecken werden mit einer Länge von 110 m aufgefahren und dienen als Einlagerungs- bzw. Bohrlochüberfahrungsstrecken. Die Erschließung der einzelnen Einlagerungsfelder oder ewGs bzw. Bohrlochüberfahrungsstrecken erfolgt über das zentrale Doppelstreckensystem, wobei an eine Doppelstrecke mehrere Einlagerungsfelder bzw. ewGs angeschlossen sein können. Jede Doppelstrecke besteht aus zwei gleich großen Hauptstrecken und regelmäßigen Querschlägen zwischen diesen. Letztere dienen der Wetterführung und der Bereitstellung von Fluchtwegen. Die Feste zwischen den Hauptstrecken ist ca. 17 m breit. Die Querschläge liegen maximal 400 m auseinander. Abbildung 5-25 zeigt eine schematische Darstellung des Grubengebäudes sowie Wetterführung und Transportwege.

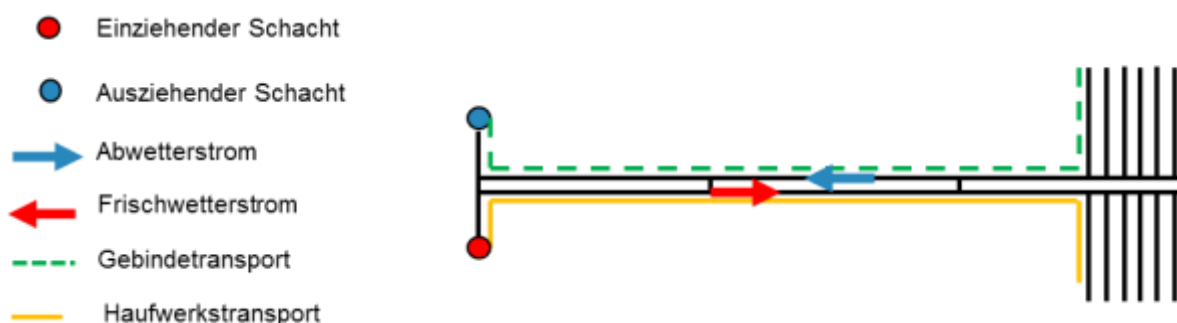


Abbildung 5-25: Schematische Darstellung des Grubengebäudes, (Bertrams et al., 2017)

Die Wetterführung innerhalb eines Doppelstreckensystems und des gesamten Endlagers erfolgt einsöhlig. Die Versorgung des Grubengebäudes mit Frischwettern erfolgt allein über die für die Einlagerung notwendigen Strecken. Damit wird das Hohlraumvolumen des Endlagers minimiert und es werden keine zusätzlichen Migrationspfade für Radionuklide geschaffen.

Die frischen Wetter ziehen über den einziehenden Schacht der zentralen Doppelschachtanlage in das Grubengebäude. Je nach Lage der einzelnen ewGs können mehrere Doppelstrecken zur Erschließung der Einlagerungsfelder bzw. ewGs aufgefahren werden. Die Wetterströme können innerhalb des Grubengebäudes durch Wetterbauwerke gesteuert und zwischen verschiedenen Einlagerungsflügeln bzw. Doppelstrecken verteilt werden. Innerhalb einer Doppelstrecke ziehen die Frischwetter in der dem einziehenden Schacht zugewandten Strecke in die Einlagerungsfelder ein und über die zweite Hauptstrecke zurück, in Richtung des ausziehenden Schachtes. Zur Steuerung des Volumenstroms und zur Vermeidung von Wetterkurzschlüssen sind alle Querschläge mit entsprechenden Wetterbauwerken (Wetter-schleusen, Wettertüren oder Wetterwiderständen) ausgerüstet. Die Betriebspunkte der Auf-fahrung und der Einlagerung sind so angeordnet, dass die Wetter stets vom ÜB in den KB ziehen. Über die Querschläge ist eine Auffrischung der Wetter möglich.

Die Auffahrung der Haupt- und Bohrlochüberfahrungsstrecken sowie alle weiteren bergbau-lichen Tätigkeiten sind dem Überwachungsbereich (ÜB) zugeordnet. Während der Ausrichtung

des Grubengebäudes liegen alle Strecken im ÜB. Mit dem Beginn der Einlagerung wird das entsprechende Einlagerungsfeld bzw. Teile davon in den Kontrollbereich (KB) überführt. Der gesamte Gebindetransportweg und alle vollständig aufgefahrenen Bohrlochüberfahrungsstrecken dieses Einlagerungsfeldes werden dem KB zugeordnet. Innerhalb der Querschläge und der Hauptstrecke entstehen so Übergänge zwischen beiden Strahlenschutzbereichen. An diesen Übergängen ist im Normalbetrieb kein Übergang von Personen und Material zwischen den Strahlenschutzbereichen vorgesehen. Die Übergänge werden mit wetterdurchlässigen Absperrungen oder Wettertoren ausgestattet. Damit die Übergänge im Notfall als Fluchtweg genutzt werden können, werden die Tore mit alarmgesicherten Fluchttüren ausgestattet.

### 5.10.2 Klimavorausberechnung für eine Bohrlochüberfahrungsstrecke

Blindstrecken, wie beispielsweise die Bohrlochüberfahrungsstrecken werden stets sonderbewettert. Während des Vortriebs (Bohren und Sprengen) erfolgt die Bewetterung blasend, da die auftretenden Sprengschwaden soweit wie möglich verdünnt werden sollen, siehe Abbildung 5-26. Bertrams et al. (2017) berücksichtigen für die Dimensionierung der Strecken zwei parallele Luttenstränge mit je 700 mm Durchmesser. Mit einer entsprechenden Lüfterleistung ist so ein Volumenstrom von bis zu 16,8 m<sup>3</sup>/s über eine Länge von bis zu 400 m möglich. Bei einem angenommenen Verbrauch von ca. 4 m<sup>3</sup>/min\*kW entspricht das rund 250 kW Leistung der Dieselmotoren für die Technik in der Einlagerungstrecke.

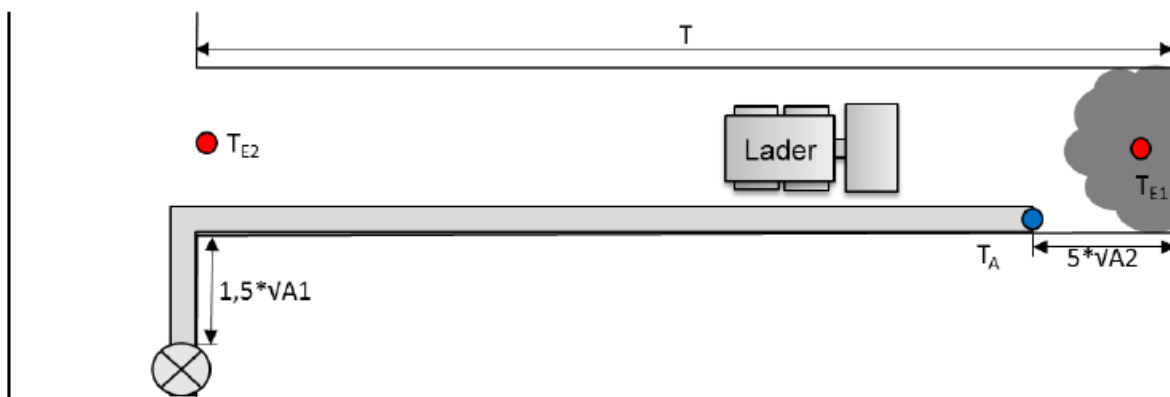


Abbildung 5-26: Ideallisierte Verhältnisse in den Bohrlochüberfahrungsstrecken am Beispiel der Auffahrung als größter Wetterverbraucher (Bertrams et al., 2017)

Nach der Errichtung der Strecken und nach dem Übergang zum KB, also während des Einlagerungsbetriebes kann die Bewetterung auch saugend erfolgen. Die saugende Bewetterung bietet aus strahlenschutztechnischer Sicht den Vorteil, dass die potenziell kontaminierten Wetter vor Ort gesammelt und über einen definierten Weg (die Lutte) abgeführt werden. Diese Vorteile gelten auch für den Rückholungsbetrieb. Während der Rückholung werden Teile des KB wieder geöffnet. Eine mögliche Kontamination kann nicht ausgeschlossen werden, so dass das Sammeln der Wetter vor Ort grundsätzlich eine Reduzierung der radiologischen Belastung darstellt. An geeigneter Stelle kann weiterhin eine Filteranlage aufgestellt werden. Aus bergbaulicher/klimatechnischer Sicht, ist die saugende Bewetterung allerdings ungünstiger zu bewerten. Die Kühlung der Arbeitsbereiche wird erschwert. Frische Wetter ziehen durch die gesamte Strecke und erwärmen sich dabei, bevor sie zu ihrem eigentlichen Zielort kommen.

Zur Überprüfung unter welchen Randbedingungen die geltenden bergbehördlichen Vorgaben der KlimaBergV eingehalten werden können, erfolgt zunächst auf Basis des in Abschnitt 5.1 beschriebenen Einlagerungskonzeptes eine Simulation der erwarteten Temperaturerhöhung im Umfeld der Einlagerungsbohrlöcher. Im Modell wird unter Ausnutzung der Symmetrie eine Elementarzelle um ein einzelnes Bohrloch herum abgebildet, siehe Abbildung 5-27. Durch eine Spiegelung an den Seitenrändern des Modells entsteht ein theoretisch unendliches Einlagerungsfeld. Damit gibt das Modell die Temperaturbedingungen innerhalb eines potenziell heißesten Teils des Einlagerungsfeldes wieder. Die Beobachtungspunkte P1 und P7 liegen an Firste bzw. Sohle der Bohrlochüberfahrungsstrecke. Der Beobachtungspunkt P2 liegt am Stoß der Strecke. Die Beobachtungspunkte P3 bis P6 liegen in der Feste, senkrecht zur Streckenachse. Der Beobachtungspunkt P8 liegt in der Streckenachse direkt am Modellrand, also in der Mitte zwischen zwei Bohrlöchern.

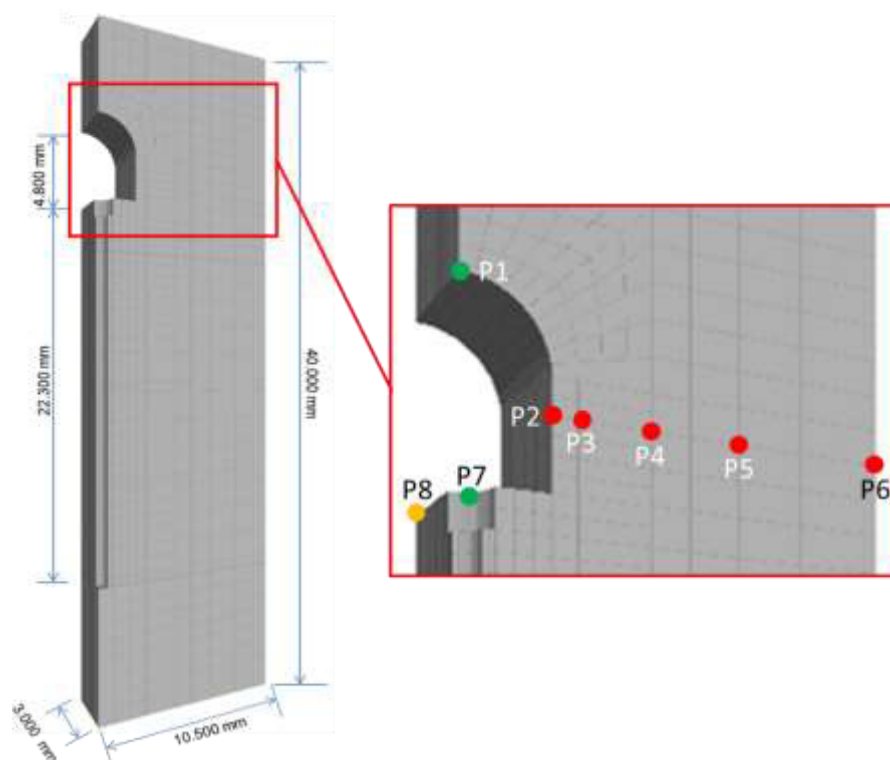


Abbildung 5-27: Modellaufbau und Beobachtungspunkte

Die durchgeführten Modellrechnungen berücksichtigen zum einen eine versetzte Bohrlochüberfahrungsstrecke. Die thermischen Eigenschaften des Versatzes wurden vereinfachend gleich den Eigenschaften des Wirtsgesteins angenommen. Gegenüber einem Versatzmaterial auf Basis von Bentonit weist die Hohlräumfüllung damit günstigere Wärmeleiteigenschaften auf. Als zweite Rechenvariante wurde eine offene, luffterfüllte Strecke simuliert, die den Wärmefluss eher behindert. Die luffterfüllte Strecke bildet Zeiträume kurz nach der Einlagerung ab.

Abbildung 5-28 stellt die Temperaturverläufe in beiden Simulationen gegenüber. Erwartungsgemäß treten an der Sohle, nahe zu den Abfallgebänden die höchsten Temperaturen auf. Fünf Jahre nach der Einlagerung werden für die verfüllte Strecke 40 °C erreicht. In der parallelen Betrachtung der unverfüllten Strecke werden 43 °C und damit leicht höhere Temperaturen an der Sohle erwartet. An der Firste kehrt sich dieses Verhältnis um. Grundsätzlich gilt, das nur

um wenige Kelvin unterschiedliche Temperaturen erreicht werden. Es bleibt aber zu beachten, dass die Modellvariante „offene Strecke“ eine eher theoretische Betrachtung darstellt, da in der Simulation keine Bewetterung und damit keine Wärmeabfuhr betrachtet wurde. Praktisch würde eine Bewetterung und damit auch eine Wärmeabfuhr erfolgen, was zu niedrigeren Temperaturen führt. Die getroffenen Annahmen überschätzen somit die Temperatur und sind als konservativ anzusehen. Ein Temperaturmaximum innerhalb der Strecke wird in beiden Fällen nach ca. 70 Jahren erreicht. Zu diesem Zeitpunkt sind an den Kokillen bereits sinkende Temperaturen zu erwarten, vgl. Abbildung 5-29. Ein Maximum tritt dort ca. 55 Jahre nach der Einlagerung auf.

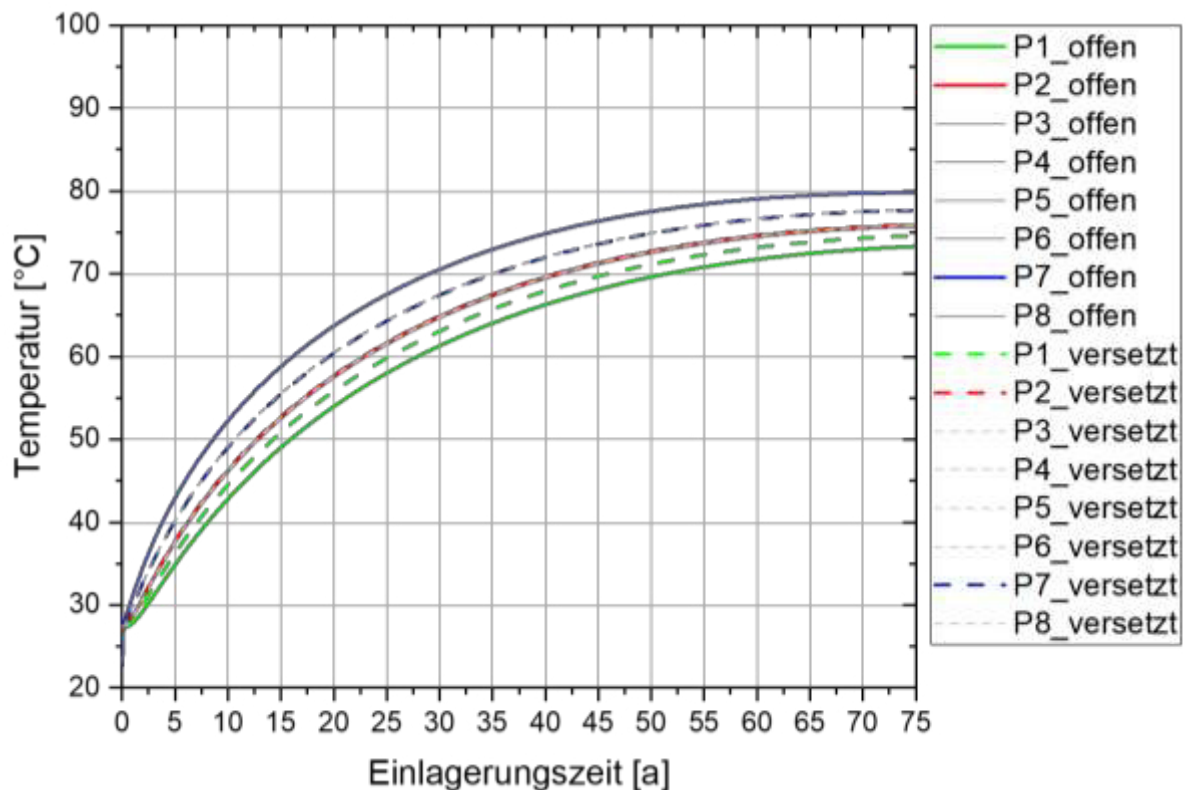


Abbildung 5-28: Temperaturentwicklung um die versetzte und offene Bohrloch-überfahungstrecke während der ersten 75 Jahre nach Einlagerung

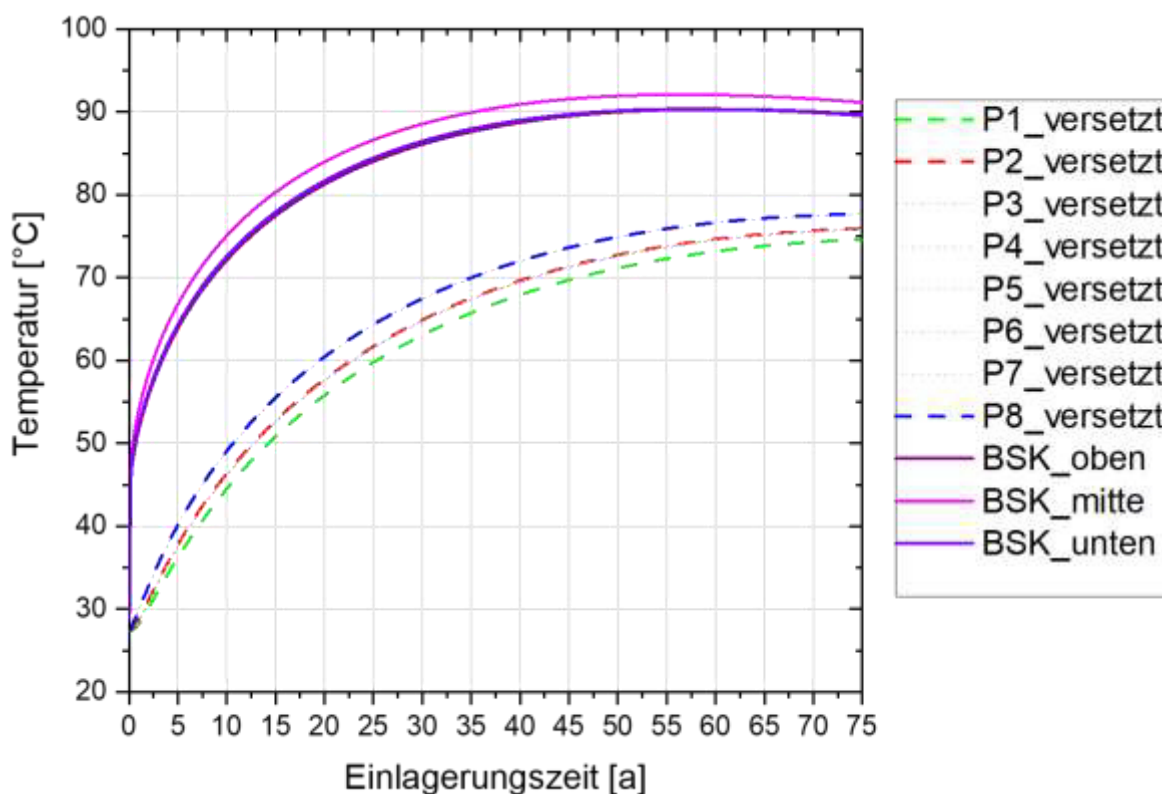


Abbildung 5-29: Temperaturentwicklung um die versetzte Bohrlochüberfahrgsstrecke und an den drei eingelagerten Kockilen eines Bohrloches während der ersten 75 Jahre nach Einlagerung

Für die Klimavorausberechnung werden in Anlehnung an Abschnitt 5.2 zwei Szenarien bzw. Zustände definiert. Für Rückholungstätigkeiten innerhalb einer Einzelstrecke wird angenommen, dass diese Vorgänge bereits früh oder während des laufenden Einlagerungsbetriebes stattfinden. Die Temperaturentwicklung im Rechenfall „offene Strecke“ ist hier maßgebend.

Im zweiten Szenario wird eine möglichst späte Rückholung und damit tendenziell die Rückholung des ganzen Einlagerungsfeldes angenommen. In diesem Fall ist die Rechenvariante „verfüllte Strecke“ maßgebend. Herold et al. (2018) und Bollingerfehr et al. (2014) schätzten eine Einlagerungsdauer von ca. 40 Jahren ab. Zu diesem Zeitpunkt sind in den Bohrlochüberfahrgsstrecken Temperaturen von ca. 70 °C zu erwarten. Im Maximum werden Temperaturen von 76 °C in den Bohrlochüberfahrgsstrecken erwartet.

Die geltenden Vorgaben nach KlimaBergV müssen während des Rückholungsbetriebes eingehalten werden. Konkret dürfen in untertägigen Bergbauaktivitäten außerhalb des Salzbergbaus ab Effektivtemperaturen von größer 30 °C Personen nicht mehr beschäftigt werden. Ausnahmen sind im Einzelfall unter der Einhaltung zusätzlicher Auflagen (z.B. verkürzte Arbeitszeit und zeitliche Begrenzung der Tätigkeit) bis 32 °C Effektivtemperatur möglich.

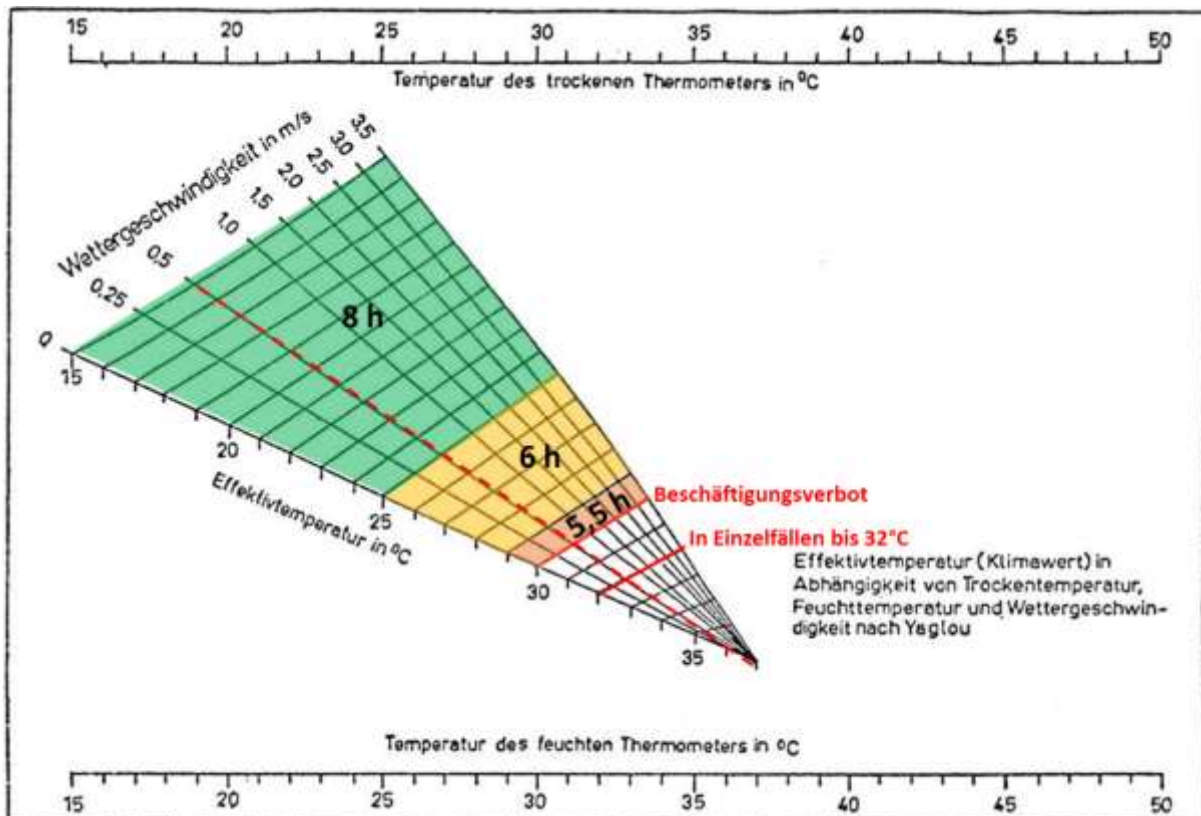


Abbildung 5-30: Yalgou-Nomogramm zur Ermittlung der Effektivtemperatur nach Anlage 1 KlimaBergV (1983), (rot Wettergeschwindigkeit in der Modellstrecke)

Bertrams et al. (2017) berücksichtigt für die Dimensionierung der Strecken zwei parallele Luttenstränge mit je 700 mm Durchmesser. Mit einer entsprechenden Lüfterleistung ist so ein Volumenstrom von bis zu 16,8 m<sup>3</sup>/s über eine Länge von bis zu 400 m möglich. Bei einem angenommenen Verbrauch von ca. 4 m<sup>3</sup>/min\*kW entspricht das rund 250 kW Leistung der Dieselmotoren für die Technik in der Einlagerungstrecke. Im „Referenz ewG“ nach Jobmann et al. (2020) sind die Bohrlochüberfahrungsstrecken in ihrer Länge auf 110 m begrenzt. Die Nutzung der in Bertrams et al. (2017) konzipierten Sonderbewetterung ist nicht notwendig. Der Einsatz einer Einzellutte (D = 0,8 m) ausgestattet mit einer entsprechenden Lüfterleistung ist zur Versorgung der Verbraucher ausreichend. Die größten Verbraucher sind die Entnahme des Versatzes sowie der Einbau von Versatz mit einem Wetterbedarf von ca. 23 m<sup>3</sup>/s und einem erwarteten Wärmeeintrag von ca. 300 kW dieselgetrieben bzw. 100 kW bei rein elektrischem Antrieb, vgl. Herold et al. (2018).

Aus den Modellrechnungen lassen sich Grenzzustände ableiten bis zu denen keine zusätzlichen Kühlmaßnahmen notwendig sind. In Abbildung 5-31 sind die Grenzwerte der Effektivtemperatur unter Berücksichtigung der Modellannahmen und entsprechenden Druckbedingungen auf ein h-x-Diagramm übertragen und so Temperaturbereiche definiert bis zu denen eine Einhaltung der Temperaturvorgaben möglich ist. Mit steigenden Gebirgstemperaturen in den Bohrlochüberfahrungsstrecken erhöhen sich auch die Wettertemperaturen. Somit wird mit zunehmender Einlagerungsdauer die Einhaltung der Grenzwerte ohne zusätzliche technische Maßnahmen erschwert.



Einen signifikanten Einfluss hat hier die rel. Luftfeuchte. Für gesättigte Wetter, also sehr hohe Luftfeuchten, können Effektivtemperaturen von 25 °C bereits ohne zusätzlichen Wärmeeintrag aus den Abfällen erreicht werden. Mit der Abnahme der rel. Luftfeuchte sinkt die Effektivtemperatur und ein zusätzlicher Wärmeeintrag ist damit tolerierbar. Da die Zustandsgrößen der Wetter stark von den Standortbedingungen abhängig sind, kann auf Basis des „Referenz ewG“ und der generischen Standortmodelle nur ein vorläufiges Temperatur- bzw. Zeitfenster ausgewiesen werden. Für die Eingangszustände der Wetter wird ein Bereich von 20 °C bis 25 °C Trockentemperatur und 50 % bis 100 % relative Luftfeuchte definiert. Es wird angenommen, dass innerhalb der Bohrlochüberfahrungsstrecken kein signifikanter Feuchteintrag aus dem Gebirge stattfindet. Für sehr feuchte Zustände ist dann nur eine Erwärmung um ca. 4 Kelvin tolerierbar. Dies entspricht einer Einlagerungsdauer von wenigen Monaten. Für trockenere Zustände sind dagegen Gebirgstemperaturen bis 48 °C tolerierbar. Dies entspricht einer Einlagerungsdauer von ca. zehn Jahren.

Die nach KlimaBergV vorgeschriebene Verkürzung der Arbeitszeit unter Effektivtemperaturen bis 29 °C erlaubt eine weitere Steigerung der beherrschbaren Gebirgstemperaturen. Unter sehr günstigen (trockenen) Bedingungen wären so auch Gebirgstemperaturen bis 66 °C oder eine Rückholung ohne zusätzlichen Kühlaufwand bis maximal 30 Jahre nach der Einlagerung möglich.

Effektivtemperaturen von 30 °C und damit ein Beschäftigungsverbot sind unter feuchten Bedingungen bereits ab Gebirgstemperaturen von 48 °C (oder zehn Jahren Einlagerungsdauer) zu erwarten. Für sehr trockene Bedingungen wird der Grenzwert von 30 °C Effektivtemperatur erst bei deutlich höheren Gebirgstemperaturen, nahe an der Maximaltemperatur erreicht. Dies liegt auch daran, dass die Einlagerungstrecken vergleichsweise kurz sind und damit auch die Verweildauer der Wetter kurz ist. Zu beachten ist, dass mit höheren Gebirgstemperaturen in den Einlagerungstrecken die Gebirgstemperatur im gesamten Einlagerungsfeld steigt, was wiederum die Eingangstemperaturen der Wetter beeinflusst.

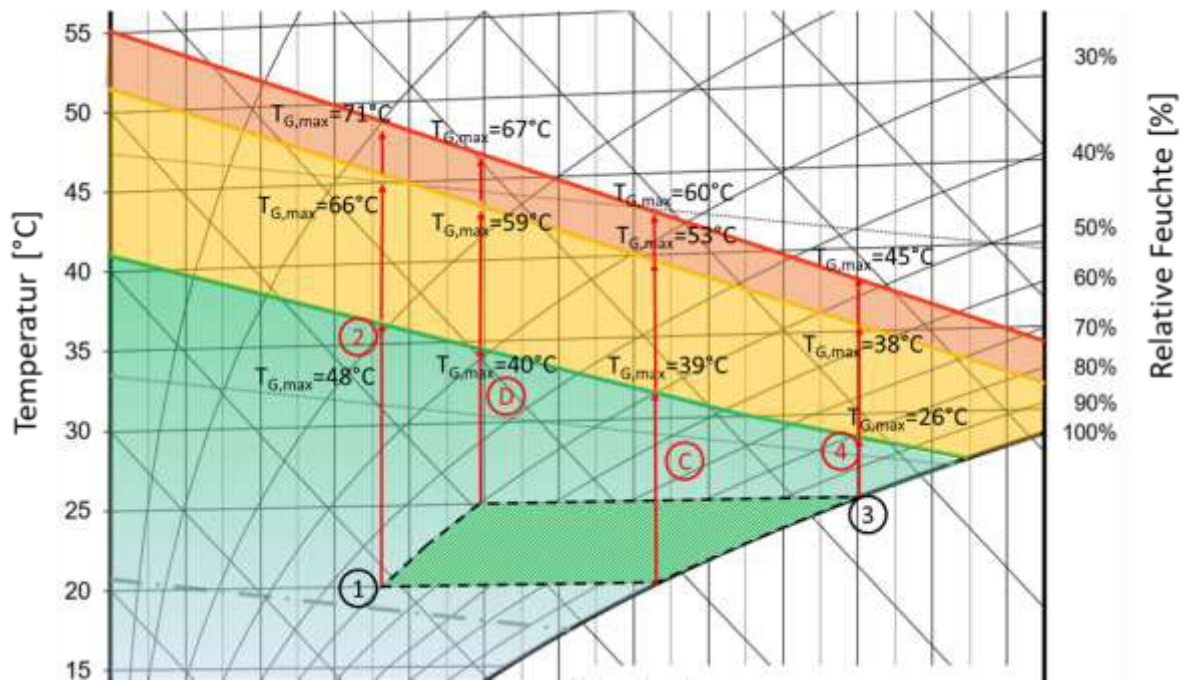


Abbildung 5-31: Temperaturgrenzen übertragen auf das h-x-Diagramm und tolerierbare Gebirgstemperaturen unter den angenommenen Umgebungsbedingungen

### 5.10.3 Bewetterungs- und Kühlkonzept in einem Einlagerungsfeld

Nach den in Abschnitt 5.2 beschriebenen Möglichkeiten kann eine Rückholung auch ganze Einlagerungsfelder betreffen. Die zuvor beschriebenen Prozesse zur Neuauffahrung der Strecken und eigentlichen Rückholung würden dann bis zu einem gewissen Grad parallelisiert werden. In einem Einlagerungsfeld bzw. Rückholungsbereich würden also Arbeiten an mehreren Betriebspunkten und in mehreren Einlagerungstrecken stattfinden. Diese Betriebspunktkonzentration wirkt sich auch auf die Bewetterung und Kühlung aus.

Zur Bewertung der Effekte wird angenommen, dass innerhalb des Einlagerungsfeldes bis zu drei Betriebspunkte gleichzeitig, verteilt auf drei Bohrlochüberfahrungsstrecken, aktiv sind. Die stattfindenden Tätigkeiten sind die Neuauffahrung bzw. Versatzentnahme einer Bohrlochüberfahrungsstrecke, der Rückbau eines Bohrlochs und Entnahme der Behälter selbst.

Während im Einlagerungsbetrieb die Entwicklung der Betriebspunkte gegen den Wetterstrom vorgesehen ist, soll die Rückholung in umgekehrter Reihenfolge dazu erfolgen (siehe Abbildung 5-32). Die Rückholung beginnt dort, wo die frischen und kühlen Wetter in das Einlagerungsfeld einziehen. Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erläutert sollen die Blindstrecken saugend bewettert werden.

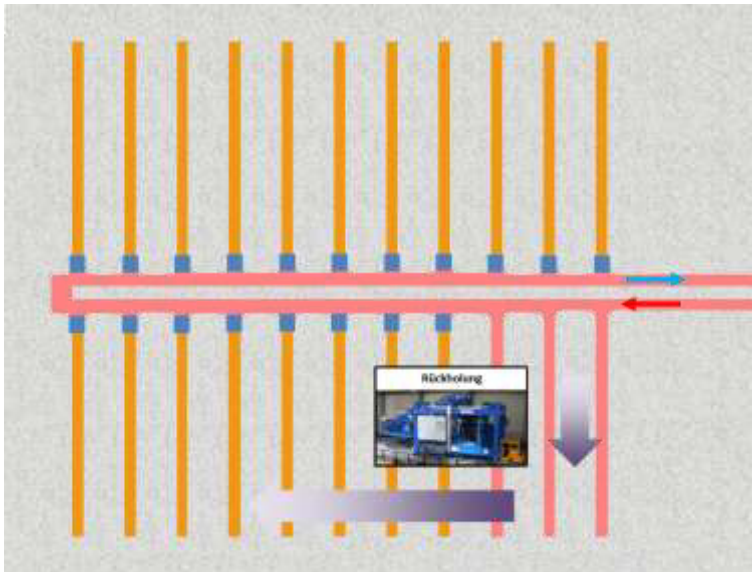


Abbildung 5-32: Schematische Darstellung der Rückholungsreihenfolge in der Referenz-ewG-zelle

Jeder Betriebspunkt wird mit einer eigenen Sonderbewetterung ausgerüstet. Für jeden Teil wird ein Mindestvolumenstrom von  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  definiert. In der Hauptstrecke müssen somit wenigstens  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  plus ein Zuschlag zur Vermeidung von (Wetter-)Kurzschlüssen bereitgestellt werden. Als Faustformel gilt ein Betrag von 30 % des Gesamtbedarfs, in Summe also  $78 \text{ m}^3/\text{s}$ . Die Hauptstrecken besitzen einen lichten Querschnitt von je ca.  $52 \text{ m}^2$ . Die Wettergeschwindigkeit in regelmäßig befahrenen Strecken soll auf maximal  $6 \text{ m/s}$  begrenzt sein. Der Volumenstrom der ein- bzw. ausziehenden Wetter innerhalb eines ewGs ist damit auf maximal  $312 \text{ m}^3/\text{s}$  begrenzt. Damit stehen grundsätzlich ausreichende Wetterkapazitäten bereit. Die benötigten Kapazitäten sind ca.  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  und entsprechen einer Wettergeschwindigkeit von ca.  $1,5 \text{ m/s}$ .

Bei der Gestaltung der Sonderbewetterungen ist darauf zu achten, dass die einzelnen Lüfter bzw. deren Einlass einen hinreichend großen Abstand zueinander haben. Für die saugende Bewetterung ist dies immer gegeben, da die Lutten in unterschiedlichen Strecken liegen. Als Faustformel gilt somit ein Mindestabstand von etwa der Quadratwurzel des Streckenquerschnittes ( $> \sqrt{A}$ ). Weiterhin sollten die Abwetter der einzelnen Teilströme hinter dem letzten aktiven Betriebspunkt in den Hauptwetterstrom zurückgeführt werden. Andernfalls wären die Wetter immer belastet und der Wärmeeintrag aus den einzelnen Strecken würde sich aufsummieren.

In Abbildung 5-33 sind vergleichend die (trockenen) Temperaturverteilungen für die beiden Systeme dargestellt. Durch die in Reihe geschaltete Anordnung der Sonderbewetterungen werden in jede nachgeschaltete Strecke ca.  $2 \text{ K}$  zusätzlich an Wärme eingetragen. Der Anstieg ist nicht linear. Je nach Umgebungstemperatur werden so die Grenzwerte der KlimaBergV überschritten. Verdeutlicht wird dies auch in Abbildung 5-34, in der die Simulationen für Gebirgstemperaturen zwischen  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  wiederholt wurden. Bei parallellaufenden Sonderbewetterungen treten in allen Strecken/Betriebspunkten gleiche Temperaturen auf. Allein

die berücksichtigten Maschinen erzeugen einen Unterschied (vgl. Abbildung 5-34, links). Eine Überschreitung der Grenztemperatur nach KlimaBergV findet erst bei Gebirgstemperaturen größer 50 °C statt. Bei dem in Reihe geschalteten System sind deutlichere Unterschiede zwischen den Strecken zu erkennen, die mit steigender Gebirgstemperatur ebenso wachsen. In den abwetterseitigen Betriebspunkten tritt eine Überschreitung des Grenzwertes bereits deutlich früher auf.

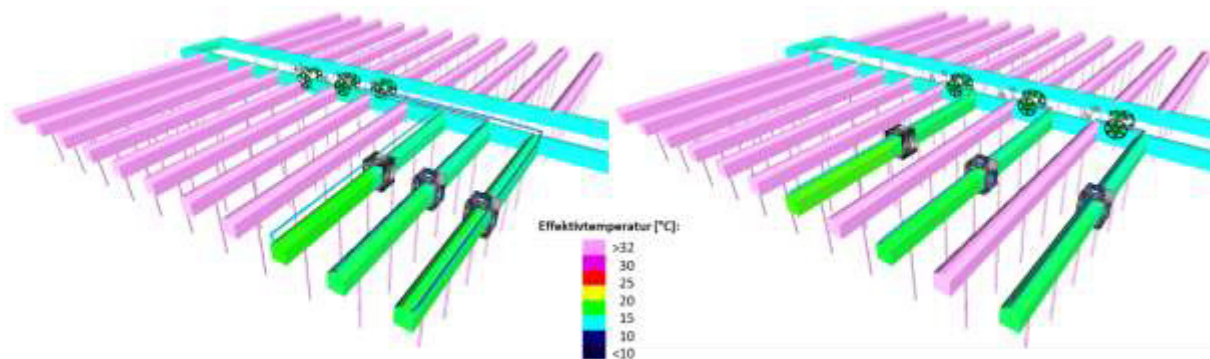


Abbildung 5-33: Visualisierung der Trockentemperaturen (pink stellt noch nicht errichtete Strecken dar), links: alle Lüfter hinter dem letzten aktiven Betriebspunkt, rechts: Lüfter sind in Reihe angeordnet

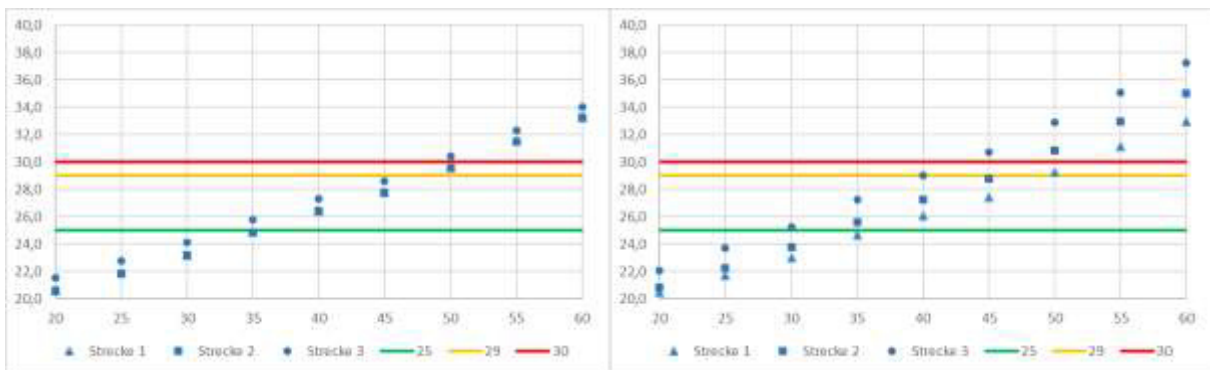


Abbildung 5-34: Trockentemperaturen im Vergleich, links: alle Lüfter hinter dem letzten aktiven Betriebspunkt, rechts: Lüfter sind in Reihe angeordnet

Der Einsatz von Wetterkühlern stellt eine weitere Maßnahme zur Gewährleistung günstiger Umgebungsbedingungen dar. Wie bereits erläutert erschwert die angestrebte saugende Bewetterung die zielgerichtete Kühlung sonderbewetterter Strecken. Kühler können nicht in den Luttensträngen eingebaut werden und gekühlte Teilströme direkt an den Betriebspunkt fördern. Stattdessen müssen sie zentral in den Hauptstrecken oder in den Bohrlochüberfahrungsstrecken eingesetzt werden. Je weiter entfernt vom eigentlichen Zielort die Kühlleistung eingebracht wird, desto ineffizienter ist die Maßnahme. Für die zuvor gezeigten Fallbeispiele ist einmal ein Kühler direkt in der Hauptstrecke vorgesehen und einmal einzelne Kühler in den Bohrlochüberfahrungsstrecken. In beiden Fällen wird eine Gesamtkühlleistung von 900 kW angenommen. Diese wird über drei Einzelkühler a 300 kW oder einen einzelnen fiktiven Kühler bereitgestellt. Abbildung 5-35-rechts zeigt die erwarteten Effektivtemperaturen für den Fall drei

einzelner Wetterkühler. Die Effektivtemperatur überschreitet erst ab 50°C Gebirgstemperatur den Grenzwert von 25 °C. Für tiefere Temperaturen werden Effektivtemperaturen Teils unter 20 °C erwartet. Dies zeigt, dass die angenommene Kühlleistung für diese Fälle zu hoch ist. In Abbildung 5-35-links sind dagegen deutlich höhere Effektivtemperaturen zu erkennen. Dort wird nur ein zentraler Kühler angenommen und es kommt zu der zuvor beschriebenen ineffektiven Kühlwirkung.

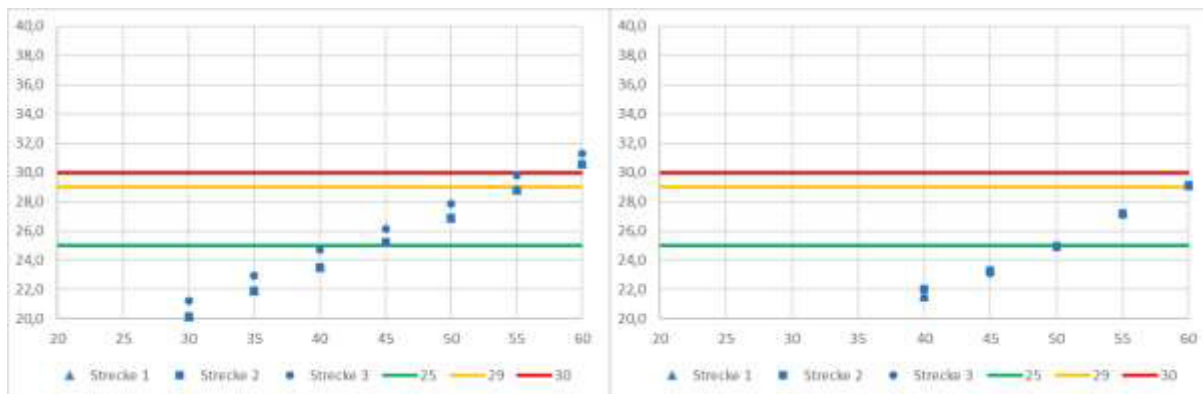


Abbildung 5-35: vorläufig, Vergleich Kühlwirkung mit zentraler Kühlung in den Hauptstrecken (links) und einzelnen Kühlern in den Bohrlochüberfahrungsstrecken (rechts) bei gleicher Gesamtkühlleistung

Die durchgeführten Vergleichsrechnungen zeigen, dass durch eine gezielte Steuerung der Wetter und auch durch eine Kühlung möglichst nah am Betriebspunkt, eine Einhaltung der Vorgaben nach KlimaBergV trotz zusätzlichem Wärmeeintrag aus dem Gebirge bzw. den Abfällen möglich ist.

Für die Versorgung des gesamten Grubengebäudes sind die gleichen Aspekte wie auch im Einzelfeld zu beachten. In Reihe geschaltete Einlagerungsfelder beeinflussen sich. Wärmeeinträge addieren sich auf, Wetter werden verbraucht. Wärme, die Wetterströmen an einer Stelle durch Kühler entzogen wird, muss an anderer Stelle wieder in den Wetterstrom abgegeben werden. Wenn eine hohe Kühlleistung benötigt wird, kann neben dem Einsatz dezentraler Kühler auch eine zentrale Kühlanlage mit einem entsprechenden Leitungsnetz errichtet werden.



## 6 Rückholungskonzept für das modifizierte KBS-3 Konzept

### 6.1 Übersicht zum Endlager- und Einlagerungskonzept

Im modifizierten KBS-3 Konzept trägt der Behälter gemeinsam mit einem umliegenden Buffer die Funktion zum Einschluss der Radionuklide. Das Konzept wird allgemein auch als Konzept „einschlusswirksame Barriere (ewB)“ bezeichnet. Diese Funktion muss in diesem Konzept somit nicht oder nicht ausschließlich vom Gebirge übernommen werden. Das Wirtsgestein hat hinsichtlich des Einschlusses keine nachweisrelevante Bedeutung. Es dient durch seine Standfestigkeit in erster Linie dem Schutz der Behälter und des zugehörigen Buffers.

Behälter, ebenso wie der Buffer, müssen den Anforderungen an eine sichere, langfristige Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle gerecht werden. Entsprechende Anforderungen an das Zusammenwirken von Gebirge, Behälter und Buffer wurden in Bertrams et al. (2017) definiert. Sicherheitstechnische Zielsetzungen wurden ebenso in Jobmann et al. (2020) definiert. Hervorzuheben ist, dass der Endlagerbehälter unter den Standortbedingungen für 1 Mio. Jahre technisch dicht sein muss. Die Hülle des Endlagerbehälters muss ausreichend dick sein, um der Korrosion im Nachweiszeitraum zu widerstehen. Die Temperaturen werden an der Behälteroberfläche durch entsprechende Beladung der Abfallbehälter und angepasste Einlagerungsgeometrie auf 100 °C begrenzt, um eine Beeinträchtigung der Funktion des Buffers auszuschließen. Um die Behälter zu schützen, werden sie mit einem Buffer aus kompaktiertem quellfähigem Material vollständig umschlossen. Auf Grund seiner Eigenschaften liefert er eine mechanische, hydraulische, chemische und biologische Schutzfunktion für den Behälter. Außerdem hat der Buffer Rückhalteigenschaften für Radionuklide, so dass er im Fall eines Behälterdefektes Radionuklide noch eine Zeit lang zurückhalten kann bevor sie freigesetzt werden.

Das Einlagerungskonzept für ein Endlager nach dem Konzept der einschlusswirksamen Barriere entspricht einer vertikalen Bohrlochlagerung und ist an das skandinavische Einlagerungskonzept (KBS-3 Konzept) angelehnt. Unter der Bezeichnung „modifiziertes KBS-3 Konzept“ wurde durch Bertrams et al. (2017) sowie Jobmann & Burlaka (2019) ein entsprechendes generisches Einlagerungs- und Endlagerkonzept für deutsche Kristallinformationen entwickelt. Die für die Rückholbarkeit relevanten Aspekte werden nachfolgend kurz zusammengefasst. Weiterführende Informationen sind in Bertrams et al. (2017) sowie Jobmann & Burlaka (2019) zu finden.

Die Konfiguration zur Einlagerung in kurzen vertikalen Bohrlöchern ist in Abbildung 6-1 dargestellt. Die Einlagerungsbohrlöcher haben eine Tiefe von etwa 11 m und einen Durchmesser von 1,20 m. Die Bohrlöcher werden nicht verrohrt. Befüllt werden die Bohrlöcher mit vorkompaktierten Buffer-Elementen. Im Bohrlochtfesten werden zylindrische Platten eingesetzt. Über die Bohrlochlänge in der der Behälter positioniert werden soll, werden Buffer-Ringe eingebracht. Der Behälter wird dann in den verbleibenden Ringhohlraum eingeführt bevor am Kopfbereich die abdeckenden Bentonit-Platten eingebracht werden. Um die Kokille entsteht so ein mindestens 0,3 m dicker Buffer. Nach dem Einbau jedes einzelnen Bentonit-Bauteils, wird der zum technischen Einbau notwendige Ringspalt an der Gebirgskontur mit Bentonitmehl weitestgehend befüllt (Jobmann & Burlaka, 2019).



Oberhalb der abschließenden Bentonitplatte wird zunächst eine Filterschicht aufgebracht, die dafür sorgt, dass von oben eindringende Fluide flächig auf dem Buffer verteilt werden. Den Abschluss des Bohrloches bildet ein Hartgesteinswiderlager, bestehend aus einzelnen Festgesteinsblöcken. Dieses wird konisch im Gebirge verankert.

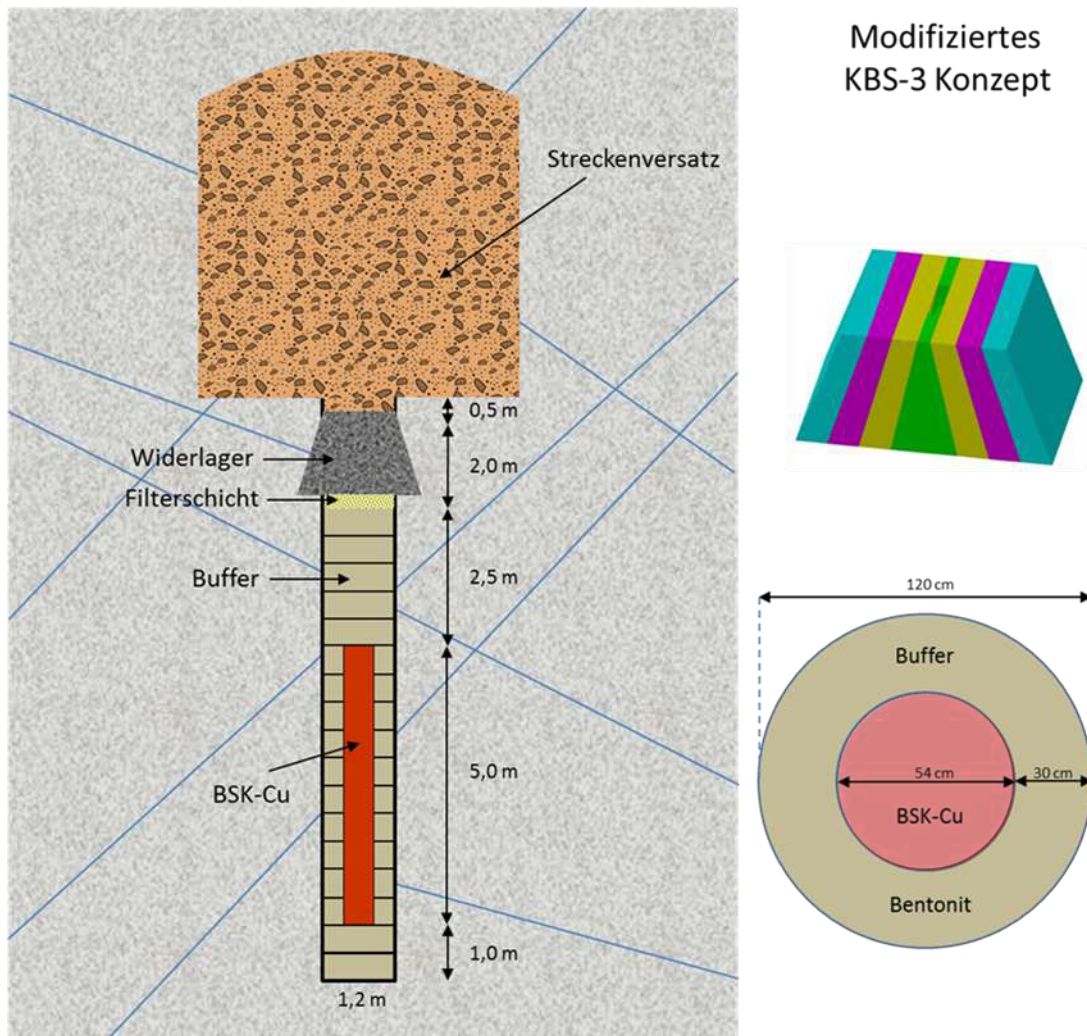


Abbildung 6-1. Konfiguration zur Einlagerung gemäß dem modifizierten KBS3 Konzept, (Jobmann & Burlaka, 2019)

Die Geometrie der Bohrlochüberfahrungsstrecke wird von der Einlagerungstechnik und dem Einsatz eines Bohrlochkellers bestimmt. Bertrams et al. (2017) berücksichtigen einen Bohrlochkeller und weist einen Streckenquerschnitt von ca. 35 m<sup>2</sup> aus. Die bereits in Abschnitt 5.1 aufgeführten Argumente zum Wegfall eines Bohrlochkellers wurden beispielsweise in GRS (2020) und auch Bertrams et al. (2021) berücksichtigt. Beide Vorhaben gehen von einer Bohrlochüberfahrungsstrecke ohne Bohrlochkeller aus.

Die Endlagerbehälter werden als Kokillen, vergleichbar zur BSK ausgeführt. Der Einlagerungsbehälter wird mit einer Kupferschicht ummantelt, um sie gegen mögliche Wassereintritte aus dem Gebirge zu sichern. Gegenüber der BSK-RCu für das in Abschnitt 5.1 beschriebene Konzept „multipler ewG“ wird die Kupferschicht von 5 auf 50 mm erhöht. Mit Ausnahme der Dicke

der Kupferhülle und der nicht-konischen Form ist der Behälter identisch mit der rückholbaren Kokille des Konzeptes zum multiplen ewG.

Aus anderen Einlagerungskonzepten der vertikalen Bohrlochlagerung bekannte Maßnahmen zur Gewährleistung der Rückholbarkeit sind im modifizierten KBS-3 Konzept nicht implementiert. Auf die in GRS (2012a) vorgeschlagene konische Außenform der Kokille wird verzichtet, da der dicke Kupfermantel im Schmiede- oder Rückholverfahren hergestellt wird. Wie in Abschnitt 5.3 gezeigt, führt die konische Form zu keinem signifikanten Vorteil beim Ziehen. Eine Sandverfüllung um die Kokille wird ebenso nicht berücksichtigt, da ein direkter Kontakt zwischen Buffer und Kokille angestrebt wird.

Die wesentliche Schutzfunktion des Buffers ist, den Behälter vor äußeren Einwirkungen zu schützen und ihn damit in seiner Einschlussfunktion zu unterstützen. Der Buffer ermöglicht eine Stabilisierung des hydrochemischen Milieus, wodurch Korrosionsprozesse minimiert werden. Gleichzeitig wird sichergestellt, dass korrosionsfördernder Material-(Kolloid-), Lösungs- und Gastransport so gering wie möglich gehalten wird. Gleiches gilt für die mikrobielle Korrosion. Der direkte Kontakt des Buffers mit dem Behälter, in Kombination mit der sehr kleinen Porosität, Porendurchmessern und einem begrenzten Wasser- und Nährstoffangebot minimieren die mikrobielle Aktivität. Jobmann & Burlaka (2019) definieren für die vorkompaktierten Ringe und Platten des Buffers eine Einbautrockendichte von 2.000 kg/m<sup>3</sup>.

Die Bohrlochüberfahrungsstrecke wird nach erfolgter Einlagerung versetzt. Als Versatzmaterial ist ein Gemisch aus aufbereitetem Ausbruchsmaterial und Bentonit vorgesehen. Das Versatzmaterial ist damit zum Versatz im Konzept „multipler ewG“ vergleichbar, siehe Abschnitt 5.1.

## **6.2 Rückholungskonzepte im skandinavischen Grundkonzept**

### **6.2.1 Schweden (SKB)**

In den schwedischen Sicherheitsvorschriften für die Entsorgung radioaktiver Abfälle (SSMFS 2008) wird dem Betreiber des Endlagers eingeräumt, dass dieser während des Baus und des Betriebes Maßnahmen ergreifen kann, die in erster Linie darauf abzielen, die Rückholung des Lagermaterials entweder während des Betriebs oder nach dem Verschluss zu erleichtern. Vorschriften erlauben, dass die Rückholbarkeit im Tiefenlagerkonzept berücksichtigt werden kann, aber es ist keine feste Auslegungsanforderung.

Die Möglichkeit der Rückholung der eingelagerten Behälter ist Teil des schwedischen Einlagerungskonzepts bis zum Ende der ersten Stufe des Betriebs. Das schwedische Endlager soll in zwei Stufen gebaut und betrieben werden. Nach der ersten Stufe, die die Einlagerung von etwa 400 Kanistern umfasst, werden die gewonnenen Erfahrungen analysiert und eine Entscheidung getroffen, wie mit den restlichen ausgedienten Brennelementen verfahren werden soll. Bis zu diesem Zeitpunkt werden die Strecken offengehalten, aber die Einlagerungsbohrlöcher mit dem Bentonitbuffer verfüllt, der die Kanister umgibt. SKB kann auch eine Entscheidung treffen, die Einlagerung zu beenden, die Behälter zurückzuholen und sie wieder in ein Zwischenlager zu bringen. Die SKB hat beschlossen, die Möglichkeit der Rückholung in der

Anfangsphase des Betriebs, d.h. die Einlagerung von bis zu 400 Kanistern im Tiefenlager, in ihr Design aufzunehmen. Daher hat SKB Rückholungsoptionen und -techniken untersucht und getestet, siehe z.B. Kristensson & Börgesson (2015), Eng (2008) oder Nirvin (2007). Solange die Einlagerungsbohrlöcher und -strecken offenbleiben, können Kanister im umgekehrten Einlagerungsbetrieb mit den gleichen Geräten wie bei der Einlagerung zurückgeholt werden. Wenn andererseits bereits Bentonit eingebaut und ggf. gequollen ist, können andere Techniken erforderlich sein, um den Kanister aus dem Bentonitpuffer zu befreien. Die SKB hat drei Szenarien für die Rückholung identifiziert, siehe Tabelle 6-1.

Tabelle 6-1: Rückholungszeitpunkte und erwartete Umgebungsbedingungen im schwedischen Endlagerkonzept

<b>Zustand Einlagerung/Verschluss</b>	<b>Zustand des Bentonits</b>
Einlagerung noch nicht abgeschlossen	<u>ohne Wasseraufnahme/ohne Quellen</u>
Einlagerung abgeschlossen	<u>ohne Wasseraufnahme/ohne Quellen</u>
Sonstige Zustände	<u>mit Wasseraufnahme und Quellen</u>

SKB hat verschiedene Methoden zum Befreien eines Kanisters aus einem Einlagerungsbohrloch untersucht, getestet und demonstriert. SKB identifizierte vier Techniken, mit denen der Bentonitpuffer entfernt werden kann: mechanisch, hydrodynamisch, thermisch und elektrisch. Die folgende Tabelle fasst die von SKB in Betracht gezogenen Techniken zusammen. Details finden sich z.B. in einem Bericht von Kalbantner & Sjöblom (2000). Die SKB führte in den Jahren 1999 bis 2006 in ihrem unterirdischen Forschungslabor einen umfassenden Test zur Rückholung von Kanistern durch, vgl. Abbildung 6-2. Die Zusammenfassung des Tests ist in Kristensson & Börgesson (2015) veröffentlicht und wird im Weiteren kurz zusammengefasst.

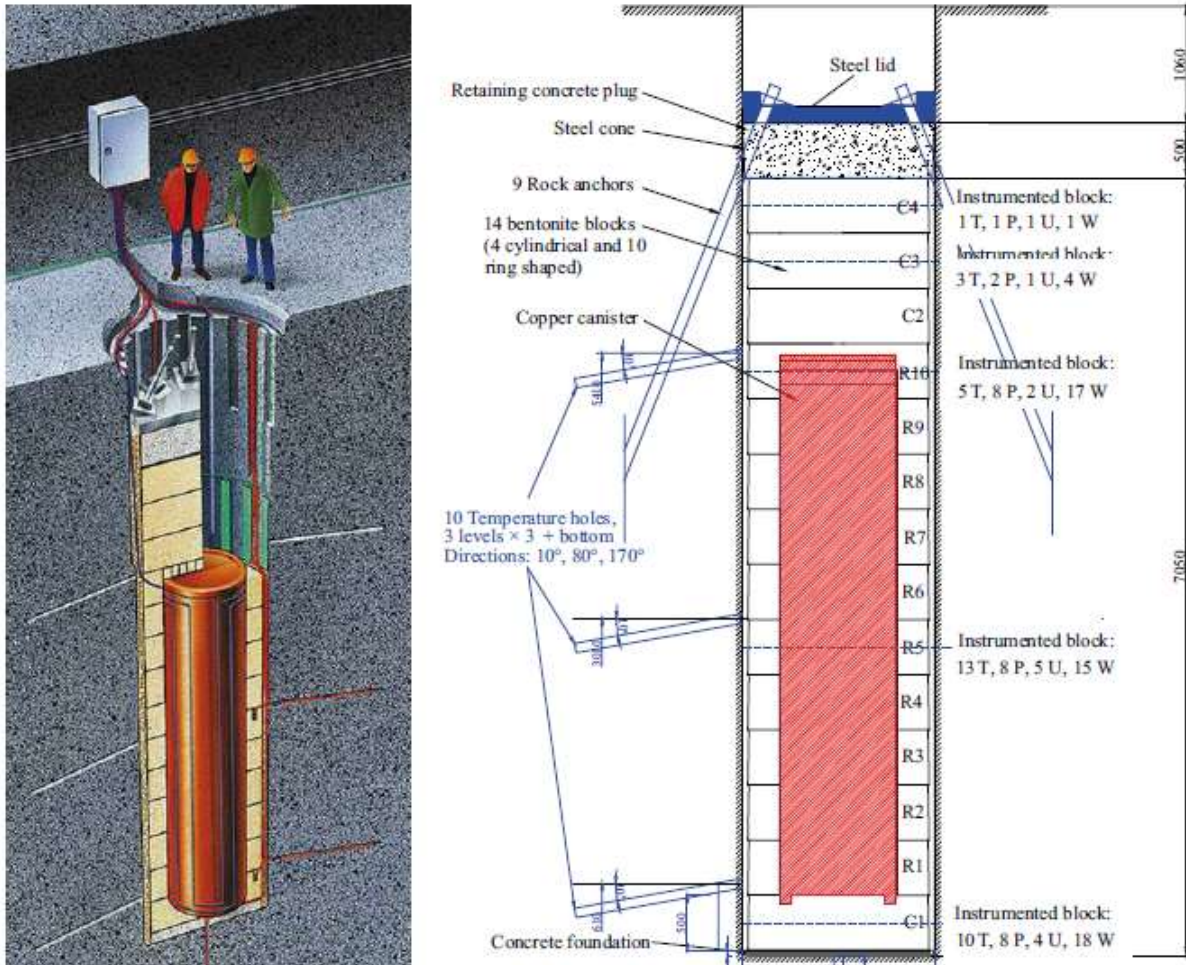


Abbildung 6-2: links: Illustration des Aufbaus des Kanister Rückholungstests der SKB, rechts: Geometrie und Komponenten des Versuchs (Kristensson & Börgesson 2015)

Das Experiment erfolgte nach dem KBS-3 Einlagerungskonzept. Das Bohrloch ist ca. 8 m tief und ca. 1,8 m im Durchmesser. Der Endlagerbehälter wurde als Dummy mit den Abmessungen des Endlagerbehälters (ca. 4,8 m lang und ca. 1 m im Durchmesser) und mit einem integrierten Erhitzer ausgeführt. Der Bentonitbuffer wurde aus dem Referenzmaterial MX-80, ein Na-Bentonit, erstellt. Technische Lücken zwischen den Ringen bzw. Formsteinen des Buffers und der Bohrlochkontur wurden mit Bentonitpellets und losem Bentonit verfüllt. Am Bohrlöchkopf wurde ein kurzes Betonwiderlager errichtet, das zusätzlich durch Gebirgsanker gesichert wurde. Um die Aufsättigung des Buffers zu beschleunigen wurden an der Bohrlochkontur durchlässige Filtermatten angebracht und mit Grubenwasser gespeist. Damit war es möglich sowohl den Temperaturverlauf als auch die Sättigung zu kontrollieren. Nach fünf Jahren Versuchsdauer wurde der Versuch schließlich zurückgebaut.

Der Dummy wurde bis zu einer Temperatur von 100 °C an der Behälteroberfläche erhitzt. An der Bohrlochkontur stellten sich Temperaturen bis ca. 65 °C ein.



Der Rückbau wurde von einem detaillierten Untersuchungsprogramm und Probenahmen begleitet. Für den oberen Teil des Buffers konnte beobachtet werden, dass der Puffer homogenisiert wurde. Dort wo der Buffer vollständig gesättigt war, konnten keine offenen Stellen gefunden werden. Der Rückbau ab der Mitte des Behälterdummys bis zu dessen Ende erfolgte nach dem hydrodynamisch/chemischen Verfahren. Detaillierte Beschreibungen sind in Nirvin (2007) und Eng (2008) zu finden. Dabei wird der Buffer durch eine verdünnte Calciumchlorid-Lösung (4 M.%) unter turbulenten Strömungsbedingungen aufgeschlämmt und anschließend abgepumpt. In gleicher Menge wie der Slurry abgepumpt wurde, wurde über Düsen frische Lösung zugeführt. Um die Gesamtmenge des benötigten Wassers zu reduzieren wurde der Slurry über eine Zentrifuge gereinigt. Der Bentonit wurde abgeschieden und die Lösung konnte in den Kreislauf zurückgeführt werden. Der Aufbau der Anlage ist schematisch in Abbildung 6-3 dargestellt.

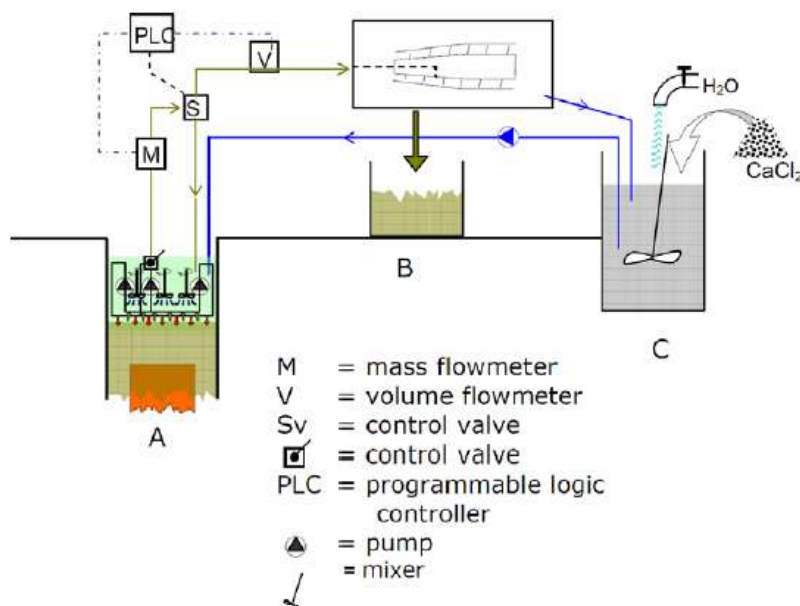


Abbildung 6-3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus, (Kristensson & Börgesson, 2015)

Innerhalb des Einlagerungsbohrlochs wird die Lösung über mehrere Düsen auf die Oberfläche aufgebracht, siehe Abbildung 6-4. Die Vorrichtung ist außerdem mit Quirlen und Pumpen ausgestattet. Die Quirle halten die Suspension in Bewegung und mit den Pumpen wird der entstandene Slurry aus dem Bohrloch gepumpt. Die Dauer, die das Bentonit zur Wasseraufnahme benötigt, wirkt sich jedoch einschränkend auf die potenzielle Geschwindigkeit der Rückholung aus. Das eingebrachte Wasservolumen muss ausreichend dimensioniert werden, damit das Bentonit eine Verschlammung eingeht und somit das Quellvermögen des Bentonits überwunden wird. Denkbar ist es eine Verknüpfung der Eigenschaft zur Verschlammung mit einer mechanischen Krafteinwirkung zu kombinieren, um die Entfernung des Bentonitpuffers zu beschleunigen (Kalbantner & Sjöblom, 2000).

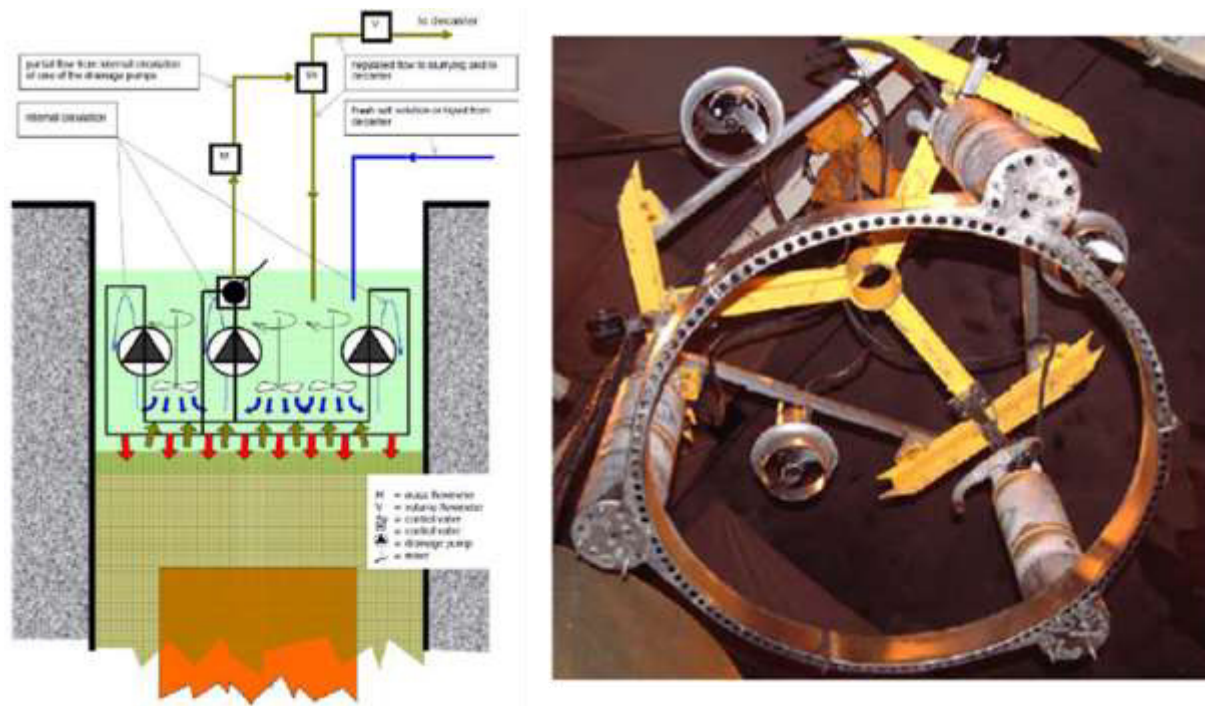


Abbildung 6-4: links: Detailzeichnung der Ausrüstung im Bohrloch, rechts: Foto der Vorrichtung mit Düsen, Mixern und Pumpen (Kristensson & Börgesson, 2015)

Das Ausspülen des Buffers war nicht ganz gleichmäßig um den Umfang des Kanisters herum. Die Höhe des Buffers variierte um den Kanisterboden um bis zu 100 cm. Dies führte jedoch zu keinen Problemen bei der Entnahme. Der Spülvorgang konnte erfolgreich durchgeführt werden. Störungen ergaben sich aus dem Versuchsaufbau und den enthaltenen Sensoren und Kabeln. Diese beschädigten die Vorrichtung und führten zu Unterbrechungen. Eine verlässliche Abschätzung der Leistung über die gesamte Versuchsdauer ist daher nicht möglich. Innerhalb des längsten störungsfreien Arbeitszeitraums von 7 Stunden (eine Schicht) konnten 656 kg Bentonit gelöst werden. Dies entspricht einer Leistung von 93 kg/h. Übertragen auf das Design des Einlagerungsbohrloches wäre so das Freispülen eines Behälters in ca. 180 Stunden möglich. Im Einlagerungskonzept werden zwei Bentonitblöcke oberhalb des Endlagerbehälters und zehn Bentonitringe um den Endlagerbehälter entfernt. Zusammen ergeben sich hier 16,5 Tonnen Bentonit (Nirvin, 2007) (Eng, 2008).

Nirvin (2007) erprobte das Niederdruckverfahren ( $p < 10 \text{ bar}$ ) zum Lösen des Bentonitpuffers mit einer Maschine, die mit drei offenen Kunststofftanks ( $V_{\text{H}_2\text{O}} = 2,2 \text{ m}^3$ ) ausgestattet ist, eine speziell gefertigte Düse ( $d_0 = 1,09 \text{ mm}$ ) verwendet und den Slurry aufbereitet, um das Wasser wieder verwenden zu können. Zur Wasseraufbereitung wird ein sogenannter Decanter verwendet, der für die Abscheidung des Wassers von Bentonit entwickelt wurde. Erreicht der Slurry im Bohrloch einen Massenanteil von 5 % Bentonit und damit eine Dichte von  $1055,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  wird dieser abgepumpt und zum Decanter geleitet (Nirvin, 2007).



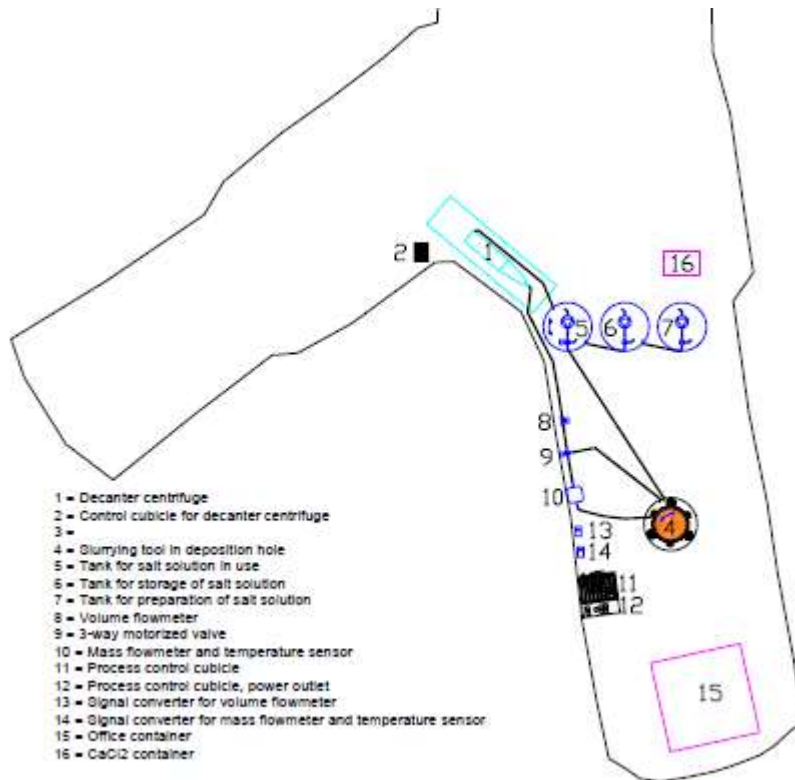


Abbildung 6-5: Versuchsaufbau, nach Nirvin (2007)

Die erprobte Technik wird als einsatzfähig eingeschätzt (Kristensson & Börgesson, 2015), Eng (2008), Nirvin (2007). Beim späteren Einsatz im Endlager wird der Kopfbereich des Bohrloches zunächst mit Manipulatoren entfernt, um so einen Arbeitsraum für den Spülvorgang zu schaffen.

### 6.2.2 Finnland (Posiva)

Das finnische Kernenergiegesetz verlangt eine Grundsatzentscheidung "*Decision-in-Principle*" (*DiP*) für den Bau von Anlagen, die als Tiefenlager für radioaktive Abfälle dienen. Posiva beantragte im Jahr 2000 die erste DiP, die am Ende des Standortauswahlverfahrens stand. Die Rückholbarkeit war ursprünglich weder im Gesetz gefordert noch im Antrag auf DiP enthalten. Nach öffentlichen Konsultationen und einigen politischen Verhandlungen wurde das Konzept der Rückholbarkeit in die Grundsatzentscheidung aufgenommen. Die konzeptionelle Einbeziehung der Rückholbarkeit in das Entsorgungsprogramm erhöhte die Akzeptanz der Öffentlichkeit für die Tiefenlagerung. Die Rückholbarkeit wird auf Konzeptebene betrachtet. Es gab keine technischen Anforderungen (Lehtonen, 2010).

Rückholbarkeit ist allein in den DiP verankert. Es gibt keine vergleichbare gesetzliche Regelung wie etwa in Deutschland. Die Anforderung nach Rückholbarkeit ist in den DiP wie folgt formuliert:

*"Die Entsorgung ist so zu gestalten, dass das geschlossene Lager ohne unnötige Schwierigkeiten wieder geöffnet werden kann, wenn es in Zukunft für notwendig erachtet wird, wenn*

*Fortschritte in der Abfallhandhabung erzielt werden. Die Kanister müssen lange genug rückholbar sein, gleichzeitig darf die Rückholbarkeit die Sicherheit der Entsorgung nicht gefährden. // Die Konstruktion des Kanisters muss die Rückholbarkeit von abgebrannten Brennelementen aus dem Tiefenlager erleichtern." (Posiva 2012)*

Die finnische Regulierungsbehörde (STUK) hat festgestellt, dass durch das Entsorgungskonzept von POSIVA "... die Rückholung von Abfällen, solange die Abfallkanister intakt geblieben sind, auch wenn dies erhebliche technische und wirtschaftliche Ressourcen erfordern würde" möglich ist (Lehtonen 2010).

*"Bei der Rückholung werden mechanische Belastungen auf den Kanister ausgeübt, die es zu bewerten gilt. Die Rückholbarkeit ist mit installationsgleichen Methoden möglich, solange die Kanister intakt sind, was vor allem von den Korrosionsprozessen und der Korrosionsrate abhängt, die von den chemischen und mikrobiologischen Bedingungen in der Nähe des Kanisters abhängen. Die für die Rückholung erforderlichen Kosten und Sicherheitsmaßnahmen erhöhen sich, da die Integrität des Kanisters verloren geht. // Die Anforderungen an die Eindämmung, Chemikalien- und Korrosionsbeständigkeit beziehen sich eng auf die Anforderung an die Rückholbarkeit, da die Kanister nur so lange zurückgeholt werden können, wie sie intakt sind. Der Verschlussprozess muss so gestaltet sein, dass er eine Rückholbarkeit unter Berücksichtigung der Sicherheitsfunktion des Lagers ermöglicht. Die Anforderungen an die mechanische Festigkeit des Kanisters hängen mit den Belastungen zusammen, die während der Rückholung auf die Kanister ausgeübt werden." (Posiva 2012)*

Die technische Beschreibung der Rückholung wurde bereits in der Entwurfsphase des Lagers berücksichtigt. Es wurde eine Studie (Saanio & Raiko 1999) durchgeführt, in der der Rückholprozess von Kanistern berücksichtigt wurde. Die Rückholbarkeit ist nicht das primäre Ziel des Tiefenlagers. Das Konzept des Tiefenlagers beinhaltet jedoch einige Funktionen, die die Rückholung des Kanisters in Zukunft erleichtern könnten. Das sind: (1) mechanisch starke und langlebige massive Kupfer-Eisen-Kanister und (2) Grubengebäude im Hartgestein, die langlebig sind und die den Rückbau von Tunnelversatz in Zukunft technisch ermöglichen.

Die Rückholbarkeit in verschiedenen Phasen des Lebenszyklus:

- Solange der Bentonitpuffer noch nicht in den Einlagerungslöchern installiert ist, können Kanister mit der gleichen Ausrüstung wie beim Einlagerungsvorgang leicht entnommen und an die Oberfläche gebracht werden. Technisch gesehen handelt es sich hierbei nicht um eine Rückholung, sondern um einen umgekehrten Betrieb, da kein Versatzmaterial oder Bentonit zu entfernen ist; der Kanister wird mit der gleichen Ausrüstung und Vorgehensweise aus dem Einlagerungsbohrloch entnommen, nur in umgekehrter Reihenfolge.
- Nach dem Füllen des Einlagerungsbohrloches und/oder dem Versatz der Bohrlochüberfahrungsstrecken und/oder dem Einbau von Betonpfropfen gilt der Vorgang als Rückholung. Die Rückholung besteht aus folgenden, möglichen Aufgaben, bevor der Kanister schließlich aus dem Einlagerungsbohrloch gehoben wird: Rückbau des Betonpfropfen am Eingang der Bohrlochüberfahrungsstrecken, Entfernen des Versatzes und Entfernen des Bentonits aus dem Einlagerungsbohrloch

- Es gibt verschiedene Methoden, um den Kanister mit gesättigtem Bentonit aus dem Bentonitbuffer zu lösen. Diese Methoden wurden beispielsweise in einem SKB-Bericht (Kalbantner & Sjöblom 2000.) überprüft.
- Nach dem Verschluss des Tiefenlagers ist die Rückholung der Kanister technisch noch möglich. Die Verfüllung der Schächte und Tunnel wird entfernt und es müssen möglicherweise zusätzliche Stützsysteme und neue Strecken im Tiefenlager gebaut werden. Danach werden die Kanister wie oben beschrieben entnommen.

### 6.2.3 Rückholbarkeit in ähnliche Konzepten - Japan (NUMO)

Auch im japanischen Tiefenlagerkonzept soll die langfristige Sicherheit durch ein Multibarrienkonzept gewährleistet werden. Für die Tiefenlagerung vorgesehen sind hochaktive Abfälle aus der Wiederaufbereitung und schwachaktive Abfälle einschließlich langlebiger Nuklide, die durch den Betrieb und die Stilllegung der Wiederaufbereitung und MOX-Herstellung entstehen. Die hochaktiven Abfälle sind hauptsächlich verglaste Abfälle, die in rostfreien Kanister als primäre Abfallbehälter verpackt werden. Die Primärbehälter werden mit einem zusätzlichen Metalloverpack versehen. Das Einlagerungskonzept für die hochaktiven Abfälle basiert auf dem Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung (siehe Abbildung 6-6) und ist mit dem skandinavischen KBS-3-Konzept vergleichbar (NUMO 2013).

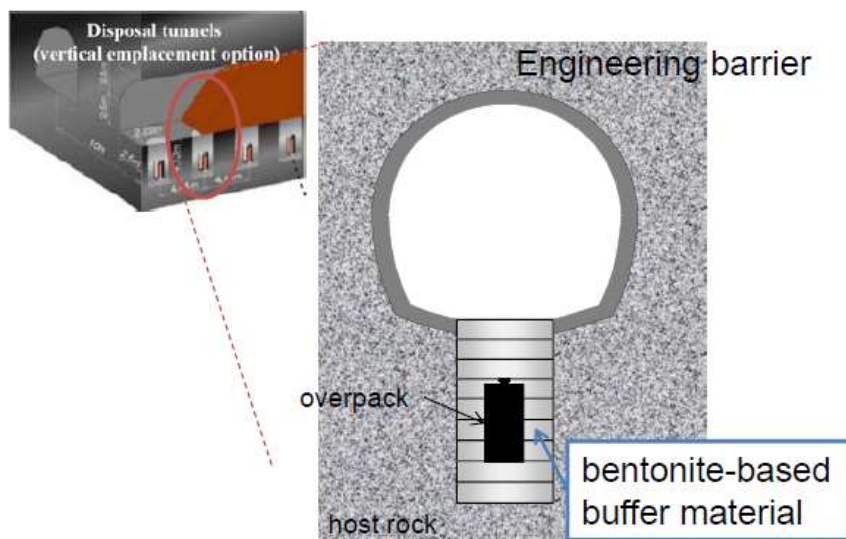


Abbildung 6-6: Einlagerungskonzept Japan (Toguri et al., 2010)

Die Einlagerungsbereiche werden in der Betriebsphase versetzt bzw. verschlossen. Während der Verschluss- bzw. Stilllegungsphase werden die noch offenen Zugangsstrecken und Schächte verfüllt. Die Oberflächenanlagen werden dekontaminiert und demontiert, sobald sie nicht mehr benötigt werden. Abbildung 6-7 veranschaulicht die verschiedenen Schritte der Lebensdauer des Tiefenlagers.

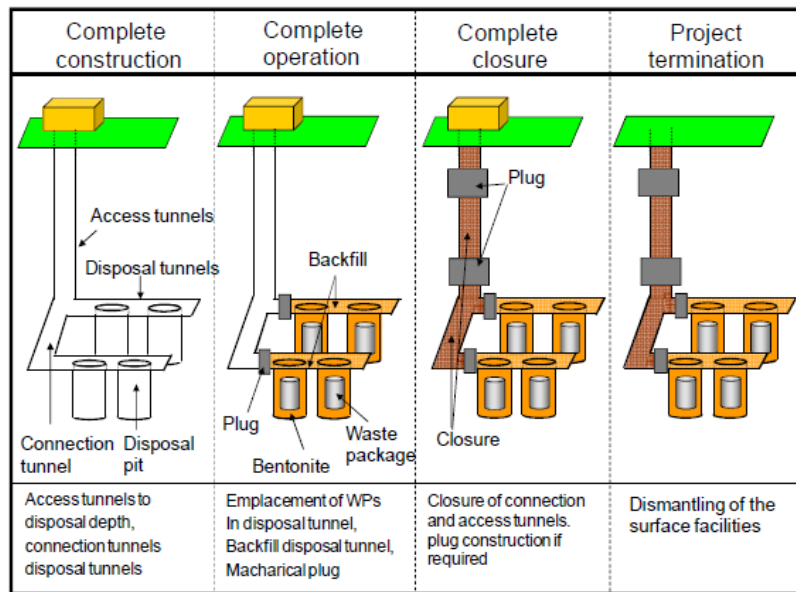


Abbildung 6-7: Schematische Darstellung des schrittweisen Verschlusskonzepts, (NUMO 2013)

Nach NEA (2012) gibt es zwei Verordnungen, die eine Rückholbarkeit beinhalten:

- (1) "Grundlegende Richtlinie zu den Sicherheitsvorschriften für die HLW-Entsorgung", die im Jahr 2000 von der Kommission für nukleare Sicherheit erlassen wurde.
- (2) "Sicherheitsverordnungen für die geologische Entsorgung radioaktiver Abfälle", die vom Unterausschuss für die Sicherheit radioaktiver Abfälle der Agentur für nukleare und industrielle Sicherheit (NISA) im September 2006 herausgegeben wurde.

Die Erste verlangt, dass *„Während der Bau- und Betriebsphase müssen Daten im Hinblick auf den Verschluss des Lagers gesammelt werden, um die Zuverlässigkeit der Sicherheitsbewertung zu bestätigen. Es ist wichtig, die Möglichkeit der Rückholung zu erhalten, bis diese Bestätigung abgeschlossen ist.“* (NEA, 2012)

Weiterhin wird gefordert: *„... Rückholbarkeit bis zum Zeitpunkt des Verschlusses des Lagers, als Voraussetzung für die Gewährleistung der Sicherheit ist es notwendig, ein Design zu wählen, das die Rückholbarkeit berücksichtigt und konkrete Rückholmaßnahmen in den Phasen vor der Entscheidung über den Verschluss zu gewährleisten.“* (NEA, 2012)

*„Reversibilität bedeutet die Fähigkeit, einen von einer Reihe von Schritten, die in einem Tiefenlager-Projekt unternommen werden, rückgängig zu machen. Die Rückholbarkeit ist ein Sonderfall der Reversibilität, d.h. es ist möglich, eingelagerte Endlagerbehälter zu entnehmen.“* (NUMO, 2013)

Nach NUMO (2013) soll die Rückholbarkeit während der Betriebsphase möglich sein und in die Konzepte implementiert werden. Die Betriebsphase umfasst nach der in NUMO (2013)

gegebenen Beschreibung die Einlagerung der Endlagerbehälter, die Verfüllung der Einlagerungsbereiche und den möglichen Beobachtungszeitraum bis zur Entscheidung über den vollständigen Verschluss des Tiefenlagers, siehe Abbildung 6-8.

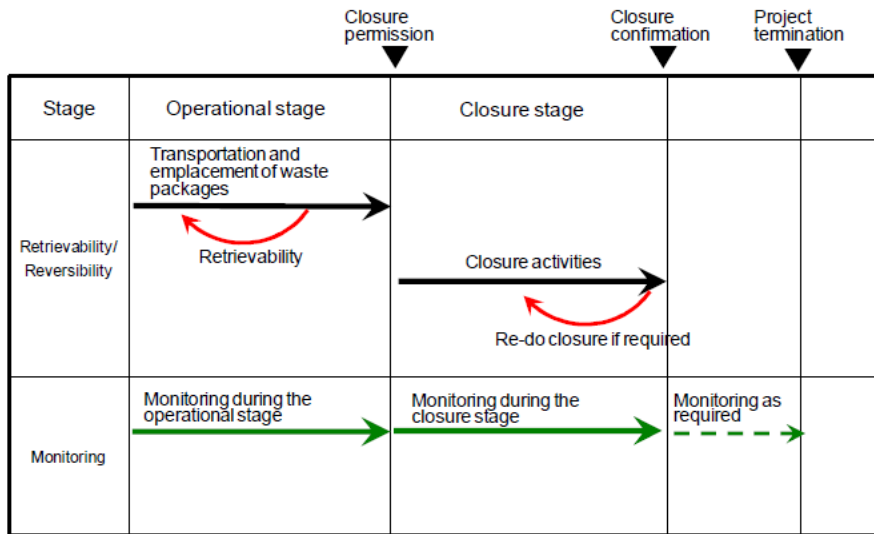


Abbildung 6-8: Schematische Darstellung des Konzepts für Rückholbarkeit und Beobachtung sowie Monitoring, (NUMO, 2013)

NEA (2012) fasst eine erste Machbarkeitsstudie zusammen, die kritische technische Fragen auch im Zusammenhang mit der Rückholbarkeit der Gebinde untersucht. Das skizzierte Rückholungskonzept sieht vor, die meisten Arbeitsschritte mit konventioneller Technik, wie sie aus dem Berg- und Tunnelbau bekannt ist, realisiert werden können. Die Entnahme des bereits gesättigten (Bentonit-)Puffers wurde als der technisch kritischste Prozess identifiziert. NEA (2012) führt weiterhin aus, dass in zusätzlichen Studien unterschiedliche Ansätze für die Entnahme des Bentonitpuffers untersucht wurden. Diese Ansätze sind:

- Überbohren
- Freispülen
- Einsetzen eines Spezialbehälters zur Isolierung des Gebindes vom Puffer

Das Konzept des Freispülens der Behälter wurde als geeignet identifiziert und bis hin zur technischen Reife entwickelt sowie erfolgreich erprobt Toguri et al. (2010) und RWMC (2019).





Abbildung 6-9: Blick ins Testbohrloch (RWMC, 2019)



Abbildung 6-10: Spülprozess (RWMC, 2019)

Nach Toguri et al. (2010) wird die Entfernung des Bentonitpuffers vereinfacht, wenn das Na-Bentonit zuvor mindestens 10 Minuten lang mit einer 4 %-igen flüssigen Salzlösung eingeweicht wurde. Hierbei wurde festgestellt, dass anschließend mit dem eingestellten Druck von 4 bar an einer Düse mit  $d_0 = 2 \text{ mm}$  die flüssige Salzlösung bei einem Volumenstrom von maximal  $4,5 \frac{\text{l}}{\text{min}}$  eine Probe des Bentonitpuffers entfernt werden konnte. Dabei beträgt die Menge an Salzlösung, die pro Runde zur Entfernung der Probe ausgestoßen wird, maximal einen Liter (Toguri et al., 2010). Weshalb eine Runde mit dem Niederdruckstrahl in ca. 13,4 Sekunden abgeschlossen sein kann.

Im Konzept wurden Proben untersucht, die zu 70 % aus Na-Bentonit und zu 30 % aus Quarzsand bestanden und eine Trockendichte von  $1,6 \frac{\text{Mg}}{\text{m}^3}$  bei einer Sättigung von 46 % besaßen (Toguri et al., 2010).

Für die Durchführung der Pufferentfernung im Test wurde die Salzlösung über die Pufferprobe gegeben, sodass die ungesättigten Bereiche des Puffers mit der flüssigen Salzlösung infiltriert



wurden. Nach einer Mindesteinwirkzeit von 10 Minuten wurde die Probe mit dem Niederdruckstrahl der flüssigen Salzlösung verschlämmt und der Slurry mittels eines Vakuums abgesaugt. Diese Schritte wurden wiederholt, bis die Pufferentfernung abgeschlossen werden konnte (Toguri et al., 2010).

Nach den abgeschlossenen Tests, wurde mit einem Prototyp der Niederdrucktechnik eine Erprobung in einem maßstabsgetreuen Versuch durchgeführt. Dazu wurden 48 Düsen ( $d_0 = 2,2 \text{ mm}$ ) eingesetzt, um bei einem Druck von 6 bar einen Volumenstrom von  $250 \frac{\text{l}}{\text{min}}$  auszustößen. Die Düsen sind in drei Kreisringen angeordnet und rotieren in einer Geschwindigkeit von  $3 \frac{\text{min}}{90^\circ}$  um den Endlagerbehälter herum. Der Slurry wird ebenfalls mit einer Geschwindigkeit von  $250 \frac{\text{l}}{\text{min}}$  abgepumpt. In Imai et al. (2018) ist die Entfernungsdauer gegenüber der Masse des Puffers aufgetragen, wodurch Rückschlüsse auf die Gesamtdauer der Pufferentfernung gezogen werden können. Es ergibt sich eine Spülleistung von ca. 100 kg/h, was mit den Erfahrungen aus dem in situ Versuch im URL Äspö vergleichbar ist.

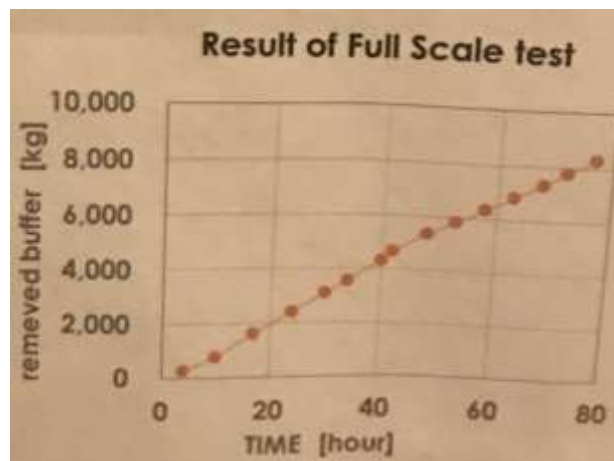


Abbildung 6-11: Zeitbedarf bei der Entfernung des Bentonitpuffers im insitu-Versuch, nach Imai et al. (2018)

### 6.3 Selektive Rückholung

Eine selektive Rückholung führt zu unterschiedlichen Szenarien mit unterschiedliche Anforderungen. Die technischen Lösungen für einzelne Szenarien können dabei modulartig aufeinander aufbauen bzw. miteinander verknüpft werden. Die Beschreibung der unterschiedlichen Stufen der selektiven Rückholung soll im Folgenden an dem in Bertrams et al. (2017) und Jobmann & Burlaka (2019) entwickelten Einlagerungskonzept hergeleitet werden. Eine Beschreibung der technischen Konzepte zur Gewährleistung der Rückholbarkeit und die technische Umsetzung der Rückholung ist in den nachfolgenden Abschnitten zu finden.

Tabelle 6-2 fasst die unterschiedlichen Zustände einer selektiven Rückholung zusammen. Das früheste und technisch einfachste Rückholungsszenario ist die Entnahme der zuletzt eingelagerten BSK-Cu aus dem noch offenem Bohrloch. In diesem Fall entspricht die Rückholung einer Umkehrung des Einlagerungsvorgangs. Betriebliche Gründe können die Ursache für einen solchen Rückholungsschritt und sollten daher in jedem Fall bei der technischen Auslegung der Einlagerungsvorrichtung beachtet werden. Zusätzliche Arbeitsschritte werden nötig, wenn der Buffer bereits vollständig eingebaut ist und wieder entfernt werden muss. Sofern auch andere Bohrlöcher noch unverschlossen sind, kann auch hier durch eine einfache Wiederholung der Arbeitsschritte zurückgeholt werden. Wichtige Prozesse sind:

- Entnahme der BSK-Cu aus dem Bohrloch
- Rückbau des Buffers

Die Komplexität der Rückholung steigt weiter wenn das Bohrloch verschlossen ist, da dann zusätzlich das Hartgesteinwiderlager zurückzubauen ist. Im Anschluss müssen die Arbeitsschritte zur Entnahme des Buffers und der BSK-Cu wiederholt werden. Mit der Anzahl der Bohrlöcher aus denen rückgeholt werden soll, steigt der Arbeitsaufwand weniger aber die Komplexität der Aufgabe. Wichtige Prozesse sind:

- Rückbau Widerlager

Die Prozesskette der notwendigen Arbeitsschritte wird um den Rückbau des Abschlusswiderlagers und der Entnahme des Streckenversatzes erweitert, sobald die Bohrlochüberfahrungsstrecke verfüllt ist. Wichtige Prozesse sind:

- Rückbau des Abschlusswiderlagers
- Entnahme des Versatzes in den Bohrlochüberfahrungsstrecken








Die Rückholung eines ganzen Einlagerungsfeldes wird um die Prozessschritte des Rückbaus der Verschlüsse in den Zugangsstrecken und die Entnahme des Streckenversatzes ergänzt. Wichtige Prozesse sind:

- Rückbau Streckenverschluss
- Entnahme Versatz der Hauptstrecken

Entsprechend der bisherigen Ausführungen verlangt die selektive Rückholung in dem folgenden Fall zusätzlichen Untersuchungsbedarf gegenüber einer Rückholung des ganzen Endlagers: Konkret ist zu untersuchen, wie eine Rückholung einer Teilmenge der eingelagerten Endlagerbehälter aus einem Einlagerungsfeld, das bereits verfüllt und verschlossen wurde, mit anschließender Wiedererrichtung des Verfüll- und Verschlusssystemes umgesetzt werden kann ohne dabei andere Einlagerungsbereich zu beeinträchtigen. Die folgenden besonderen Anforderungen einer selektiven Rückholung im Konzept mKBS-3 können also mit Blick auf die wesentlichen Elemente der Einschlusswirksamkeit identifiziert werden:

- Bei der Entfernung von Verschlüssen im Bereich von Störungszonen muss die Möglichkeit erhalten bleiben, die Verschlüsse an gleicher Stelle in mindestens gleicher Qualität neu zu errichten (sofern entsprechende Verschlüsse vorhanden sind– in diesem Grubengebäude nicht der Fall)
- Keine Beeinträchtigung der rückgeholt Behälter im Fall der weiteren Nutzung der Behälter zur Endlagerung
- Keine Beeinträchtigung des Wirtsgesteins im Fall der weiteren Nutzung der Bohrlöcher zur Endlagerung
- Keine Beeinträchtigung von Behälter-Buffer-Wirtsgesteinsystemen in der Nähe von Rückholungsprozessen, z.B. durch Überfahrung der Bohrlöcher durch die Transport- und Rückholungstechnik

Tabelle 6-2: Szenarien für die selektive Rückholung beim modifizierten KBS-3 Konzept, NEA (2011)

Rückholungsprozesse						
	R-Scale Stage 2 - Gebinde im Einlagerungsbohrloch		R-Scale Stage 3 – Einlagerungsbohrloch verschlossen		R-Scale Stage 4 – Zugangsstrecken verschlossen	
Maßnahmen sind je nach Umfang der Rückholung mehrfach und im Wechsel zu wiederholen						
Aufnahme und Transport des Behälters nach ü.T.	Rückholung des eingelagerten Behälters vor Einbau des Buffers	Rückholung des eingelagerten Behälters nach Einbau des Buffers	Rückholung des eingelagerten Behälters nach Einbau des Buffers und Verschluss des Bohrlochs	Rückholung der Behälter aus mehreren Bohrlöchern einer Bohrlochüberfahrungsstrecke nach Einbau des Buffers und Verschluss der Bohrlöcher	Rückholung des eingelagerten Behälter nach Einbau des Buffers und Verschluss der Bohrlöcher und Verfüllung der Bohrlochüberfahrungsstrecke	Rückholung eines oder mehrerer Behälter nach Einbau des Buffers und Verschluss des Einlagerungsfeldes, in dem sich die Behälter befinden
Freilegen des Behälters						
Öffnung des Bohrlochverschlusses						
Wiederauffahrung der Bohrlochüberfahrungsstrecke						
Wiederauffahrung der für die Rückholung notwendigen Richtstrecken, Durchörterung von Verschlussbauwerken						

## 6.4 Entnahme des Behälters

Die Entnahme der Behälter aus dem noch nicht verschlossenem Bohrloch stellt den einfachsten Rückholungsfall dar. Zu diesem Zeitpunkt sind noch alle Einbauten bzw. Betriebsmittel zur Einlagerung der Behälter installiert. Die wichtigste Komponente stellt die Bohrlochschleuse dar. Sie dient der Abgrenzung des Bohrlochinneren zum restlichen Grubengebäude und ermöglicht zielgenaue Aufsetzen des Transferbehälters auf dem Bohrloch.

Das Ziehen der Kokillen aus dem unverfüllten Bohrloch muss mit der Einlagerungsmaschine möglich sein, siehe Abschnitt 5.3. Eine Einlagerungsvorrichtung für BSK wurde durch Filbert et al. (2010) bereits entworfen, ein Prototyp gebaut und auf einem Versuchsstand getestet. Im Rahmen dieser Demonstrationsversuche wurde der Einlagerungsvorgang mit einem Behälterdummy mehr als 1.000-mal wiederholt. Zum Ende des Einlagerungsvorganges wurde der Behälterdummy durch eine Umkehrung des Einlagerungsvorganges wieder aus dem Versuchsbohrloch entnommen. Damit konnte mit den Versuchen die Eignung der Einlagerungsvorrichtung zur Rückholung der BSK ebenfalls nachgewiesen werden. Für die BSK-RCu steht dieser technische Nachweis noch aus. Es wird aber angenommen, dass ein Ziehen der Kokille ebenso möglich ist.

Die Entnahme der Kokille aus dem Bohrloch endet, wenn die BSK-Cu mit dem Transferbehälter auf dem Transportwagen abgelegt ist. Transferbehälter und Transportwagen sind die gleichen, wie sie für die Einlagerung verwendet wurden. Mit der Transporttechnik kann die Kokille im Anschluss vom Einlagerungsort abtransportiert werden.

## 6.5 Rückbau des Bentonitbuffers

Die in Abschnitt 6.2 beschriebenen Einlagerungs- bzw. Rückholungskonzepte in anderen internationalen Entsorgungsprogrammen sehen für eine Rückholung der Behälter aus einem bereits mit einem Bentonitbuffer besetzten Bohrloch das Freispülen der Behälter vor. Das Grundkonzept des Freispülens basiert auf einer Kombination aus hydraulischem, druckbasiertem Lösen des Bentonits und der Herabsetzung der Kohäsion im Bentonit mit Hilfe einer geeigneten (salinaren) Lösung. Aus den vorkompaktierten Bentonitformsteinen wird durch die Einwirkung der Lösung eine pumpbare Suspension erzeugt.

Die physikalisch-chemische Grundlage der Slurrybildung bildet das Eindringen der gelösten Kationen in den Bentonit bzw. zwischen die einzelnen Tonminerale. Im Zuge dessen werden die Kationen statt Wasser in die Zwischenschichten der quellfähigen Tonminerale eingelagert. Wasser liegt dann frei zwischen den Mineralen vor. Nach Toguri et al. (2010) geht dadurch die (elektrochemische) Bindung zwischen den Mineralen verloren und damit sinkt auch die Kohäsion. Eine hohe Trockendichte, ein hoher Montmorillonitanteil und/oder ein hoher herrschender (Quell-)druck/Einspannung verhindern bzw. begrenzen diesen Austauschprozess. An freien Oberflächen und damit tendenziell geringer Einspannung kann der Austausch dagegen deutlich besser ablaufen. Die ungebundenen Tonminerale bilden Kolloide die dann wiederum Basis für den Slurry sind. Durch die zusätzliche Spülung der Lösung wird die Kationenaufnahme und damit die chemisch gesteuerte Entfestigung des Bentonits hydromechanisch begünstigt (Komine et al., 2009).

In den drei internationalen Konzepten werden Na-Bentonite der Typen MX-80 oder Kunigel-V1 eingesetzt. MX-80 ist ein Handelsname für US-amerikanische Na-Bentonite. Kunigel-V1 ist ebenfalls ein Handelsname und beschreibt japanische Na-Bentonite. Beide Typen sind trotz der unterschiedlichen Herkunft in ihrer mineralogischen Zusammensetzung und hydromechanischem Verhalten vergleichbar Komine et al (2009) und IAEA (2013).

In Hinblick auf die Langzeitstabilität sollte der Bentonit-Typ entsprechend den hydro- und geochemischen Eigenschaften am Standort ausgewählt werden. Aufgrund der fehlenden Kenntnisse über die Hydrochemie des Endlagerstandorts im Kristallin in Deutschland kann eine abschließende Wahl des Bentonittyps heute noch nicht erfolgen. Eine pauschale Bewertung zur besseren oder schlechteren Eignung von Na- oder Ca-Bentoniten ist ebenso nicht möglich. Jobmann & Burlaka (2019) definieren für das modifizierte KBS-3-Konzept einen Ca-Bentonit vom Typ Salzdetfurth als Referenzmaterial für Dichtelemente der einzelnen Verschlüsse. Wesentliches Argument für diese Festlegung ist der bereits erfolgte Nachweis der Funktionalität dieses Materials, siehe dazu Breidung (2002) und Jobmann (2002), ein durch eine Vielzahl von unterschiedlichen FuE-Vorhaben erarbeiteter fundierter Wissensstand zu diesem Material sowie die Verfügbarkeit in deutschen Lagerstätten (GRS, 2012b).

Komine et al. (2009) merken an, dass das Lösungsvermögen salinärer Wässer/Lösungen an einem Ca-Bentonit sehr gering ist. Ebenso sind Ca-Bentonite resistenter gegen eine Illitisierung. Breidung (2002) unterstreicht diese Beobachtung ebenfalls, was ein Argument zur Auswahl eines Ca-Bentonits für den Einsatz im salinaren Milieu und im Salzdetfurth-Versuch war. Auch mit Ca-Bentonit (z.B. Calcigel) können hohe Quelldrücke und niedrige hydraulische Leitfähigkeiten erreicht werden. Die Eigenschaften von natürlichen Na-Bentoniten und natürlichen Ca-Bentoniten sind bei hohen Trockendichten ( $> 1,5 \text{ g/cm}^3$ ) fast gleichwertig (Breidung 2002).

Birgersson et al. (2009) stellen heraus, dass Ca-Montmorillonit mit einem Ionentyp aufgrund des Ionen-Ionen-Korrelationseffekts in Systemen mit mehrwertigen Gegenionen keine Kolloide freisetzt. Das Problem der Kolloidfreisetzung kommt von einwertigen Gegenionen und der geringen Ionenstärke des externen Wassers. Bereits 20 % Natriumionen in der Zwischenschicht reichen aus, um unter ungünstigen Umständen das Verhalten von Montmorillonit in einen solbildenden Zustand zu versetzen. Montmorillonit mit ~90 % Calcium oder mehr verhält sich ähnlich wie reiner Calciummontmorillonit und gibt keine Kolloide ab. Unter Bedingungen niedriger Ionenstärke produziert Na-Montmorillonit Kolloide, reiner Ca-Montmorillonit dagegen nicht. Missana et al. (2018) zeigt dies in Versuchen und unterstreicht damit auch Kjellander et al. (1988). Montmorillonit mit Calcium oder Magnesium als Gegenion bildet keine kolloidalen Systeme, selbst wenn es mit destilliertem Wasser in Verbindung kommt. Mit anderen Worten, die kritische Gerinnungskonzentration von  $\text{Ca}^{2+}$  für Ca-Montmorillonit ist Null. Das Problem der starken Quellung und Kolloidfreisetzung tritt nur dann auf, wenn monovalente Gegenionen vorhanden sind. Relativ geringe Mengen an Natrium in den Austauschpositionen in einem Ca-dominierten Montmorillonit bewirken, dass der Bentonit ähnlich wie ein Na-Bentonit wirkt. Die chemische Grundlage hinter diesem Effekt wird von Hofmann (2003) wie folgt beschrieben:

*"Enthalten Smektitte als Zwischenschichtkationen Na oder Li und beträgt die Schichtladung weniger als 0,5 Ladungen je Formeleinheit  $(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}$ , können diese Minerale durch osmoti-*



*sche Quellung die Schichtabstände in Wasser oder Lösungen mit geringen Ionenkonzentrationen so stark vergrößern, dass sich die einzelnen Silikatschichten voneinander trennen. Die ehemaligen Zwischenschichtkationen bilden eine diffuse Ionenwolke (Doppelschicht) um die diskreten Partikel, deren Dichte mit zunehmendem Abstand von der Partikeloberfläche abnimmt. Aufgrund der gleichnamigen Ladung dieser Ionenwolken stoßen sich die Partikel gegenseitig ab und es bildet sich eine kolloidale Dispersion (Gel)." Hoffmann(2003)*

*"Bei Erhöhung der Elektrolytkonzentration wird die Doppelschicht zusammengedrückt und ermöglicht die Annäherung der Partikel [...]. Zwischen Konzentration und Dicke der Ionenschicht besteht ein exponentieller Zusammenhang. Ist die Lösungskonzentration entsprechend hoch, so dass sich die Teilchen soweit annähern, bis die schwachen Van-der-Waals Kräfte die elektrostatische Abstoßung übertreffen, bilden sich Aggregate. Man bezeichnet diese Anlagerung von Partikeln als Koagulation, die dazu nötige Salzkonzentration als „kritische Koagulationskonzentration“." Hoffmann(2003)*

Nach Liu & Neretnieks (2006) wird die hydromechanische Stabilität von Bentonit, besonders Na-Bentonit, stark von der Konzentration von Calcium und anderen zweiwertigen Kationen im Porenwasser beeinflusst. Wenn der Bentonit Wasser mit einer Calciumkonzentration ausgesetzt wird, die niedriger ist als die kritische Koagulationskonzentration, kann das Tongel ein Sol bilden und die Tonpartikel können vom durchfließenden Wasser mitgerissen werden. Eben dieser Effekt wird in den internationalen Rückholungskonzepten ausgenutzt und erlaubt das Lösen des Bentonitbuffers mit niedrigen Drücken und der Zugabe salinärer Lösungen. Als salinare Lösung ist im skandinavischen Konzept beispielsweise eine  $\text{CaCl}_2$ -Lösung (4 Gew.-%) vorgesehen. In Japan wird eine  $\text{NaCl}$ -Lösung (bis 6 Gew.-%) berücksichtigt.

Eine direkte Übertragung der zuvor beschriebenen internationalen Rückholungskonzepte auf das deutsche modifizierte KBS-3 Konzept ist durch die Auswahl des Bentonits eingeschränkt. Ein hydrodynamisches Verfahren mit niedrigen Drücken und salinaren Lösungen ist für die vorgesehenen Ca-Bentonite des Buffers weniger effektiv anwendbar. Weiterhin scheint durch den sehr zeitaufwändigen Spülvorgang § 13 (2) EndlSiAnfV (2020) nicht erfüllt: *„Die Rückholung ist so zu planen, dass der dafür voraussichtlich erforderliche technische und zeitliche Aufwand den der Einlagerung nicht unverhältnismäßig übersteigt.“*

Auf Basis unterschiedlicher physikalisch/chemischer Prozesse sind zumindest theoretisch verschiedene alternative Verfahren zur Entnahme des Buffers denkbar, vgl. Abbildung 6-12. Die Anwendung chemischer Verfahren (wie Bohren und Sprengen) werden ausgeschlossen. Ebenso werden thermische Verfahren (wie Gefrierverfahren) ausgeschlossen. Pneumatischen Verfahren sind ohne den zusätzlichen Einsatz von abrasiven Zuschlägen (z.B. Sandstrahlverfahren) nicht anwendbar. Da abrasive Zuschläge auch die Behälteroberfläche angreifen, wird von diese Verfahren ebenso abgesehen. Als Potenziell geeignet werden mechanische und hydraulische Verfahren angesehen. Eine indirekte Maßnahme stellt die Anpassung des Endlagerkonzeptes dar, in Folge derer die Entnahme des Buffers oder Behälters erleichtert wird.

Einen indirekten Beitrag zum Rückbau des Bentonitbuffers kann durch eine Konzeptanpassung erreicht werden. Damit sind eine grundlegende Überarbeitung des Bohrlochaufbaus und/oder der eingesetzten Materialien gemeint. Eine naheliegende Konzeptanpassung wäre

der Einsatz eines Na-Bentonits als Buffermaterial und damit die Schaffung der technischen Grundlage für den Einsatz der gleichen Rückholungstechniken wie in Schweden, Finnland oder Japan. Ein Freispülen eines Buffers auf Basis eines Na-Bentonits wäre dann entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 6.2 möglich. Trotzdem scheint durch den sehr zeitaufwändigen Spülvorgang § 13 (2) EndlSiAnfV (2020) nicht erfüllt: „Die Rückholung ist so zu planen, dass der dafür voraussichtlich erforderliche technische und zeitliche Aufwand den der Einlagerung nicht unverhältnismäßig übersteigt.“ Womit diese Konzeptanpassung kein geeignetes Mittel zur Gewährleistung der Rückholbarkeit darstellt.

Die Implementierung zusätzlicher Bohrlocheinbauten, vergleichbar mit den Einlagerungskonzepten multipler ewG (siehe Abschnitt 5) oder der vertikalen Bohrlochlagerung in Salz oder Tongestein wie in Herold et al. (2018) steht dem in Jobmann et al. (2020) beschriebenen Sicherheitskonzept der einschlusswirksamen Barrieren und deren Zusammenwirken entgegen. Der Einbau zusätzlicher Liner oder Sandschichten wird daher ebenso verworfen.

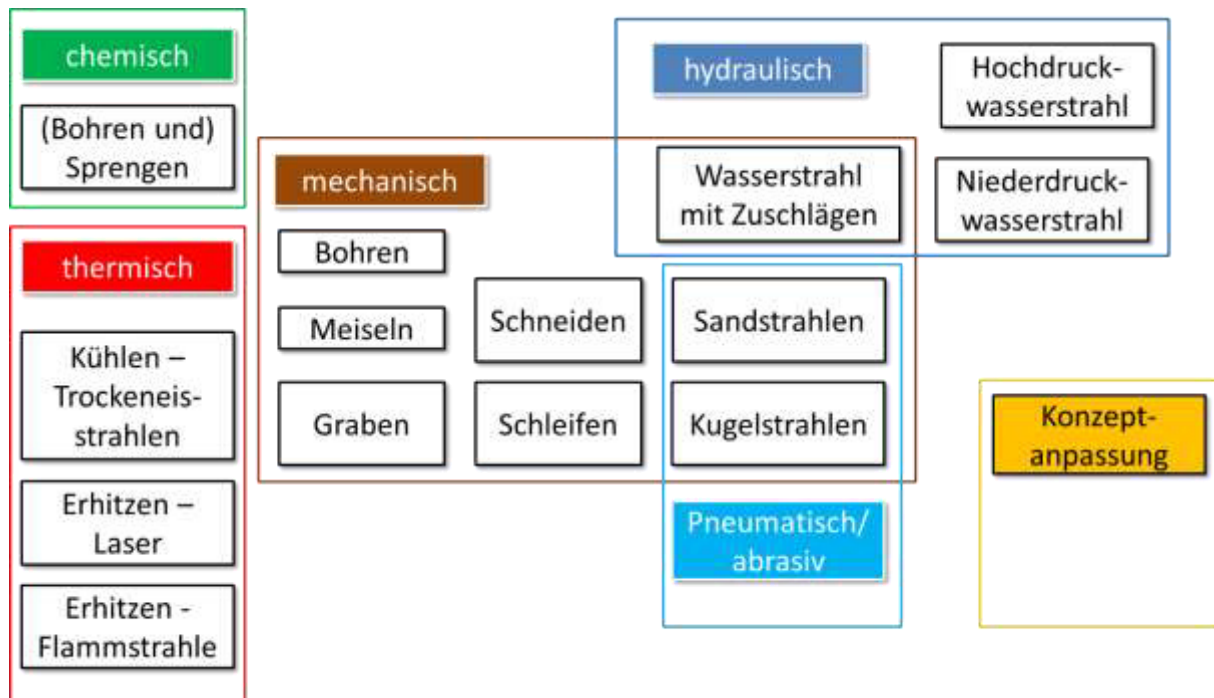


Abbildung 6-12: Übersicht der theoretisch möglichen Verfahren zur Entnahme des Buffers

### 6.5.1 Niederdruckverfahren

Niederdruckverfahren zum Freispülen des Behälters sind als Rückholungskonzept in Schweden und Japan bereits technisch erprobt, vgl. Abschnitt 6.2. Für das deutsche modifizierte KBS-3 Konzept scheint dieses Verfahren so nicht anwendbar, da statt einem Na-Bentonit ein Ca-Bentonit als Buffermaterial eingesetzt wird. Die Anwendung eines hydrodynamisch/chemischen Verfahrens zur Entnahme des Buffers erfordert eine Konzeptanpassung und den Einsatz eines Na-Bentonites als Buffermaterials.

Im modifizierten KBS-3 Konzept wären mit dem Niederdruckverfahren in Summe 7,3 m<sup>3</sup> kompaktierter Bentonit zu entfernen. Davon entfallen ca. 2,8 m<sup>3</sup> auf die Bufferscheiben am Bohrlochkopf und ca. 4,5 m<sup>3</sup> auf die Bufferringe um den Behälter. Bei der in Jobmann & Burlaka (2019) definierten Trockendichte von 2000 kg/m<sup>3</sup> entspricht dies einer Masse von ca. 14.600 kg Bentonit.

Im schwedischen in situ Versuch wurde eine Spülleistung von ca. 93 kg/h ermittelt. Für den japanischen Versuch wird eine vergleichbare Leistung von ca. 100 kg/h angegeben. Bei einer Rate von 100 kg/h würde der Rückbau des Buffers ca. 150 h dauern. Das entspricht rund 19 vollen 8-h Schichten oder unter der Annahme eines durchgängigen 3-Schicht-Betriebes 7 Arbeitstagen. Wartungsintervalle und auch der Aufbau der Anlage sind dabei noch nicht berücksichtigt. § 13 (2) der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung scheint damit nicht erfüllt: „Die Rückholung ist so zu planen, dass der dafür voraussichtlich erforderliche technische und zeitliche Aufwand den der Einlagerung nicht unverhältnismäßig übersteigt.“ (EndlSiAnfV, 2020)

### 6.5.2 Hochdruckverfahren

Bei der Anwendung des Hochdruckverfahrens ( $p < 100 \text{ bar}$ ) wird angenommen, dass Bentonit mit Hilfe einer mechanischen Krafteinwirkung des Hochdruckfreistrahls abgetragen wird (Kalbantner & Sjöblom, 2000). Dazu muss die Kraft des Freistrahls am Auftreffpunkt mindestens die Druckfestigkeit des Bentonits überwinden. Wird die Annahme getroffen, dass die mit dem Freistrahle eingebrachte Flüssigkeit nicht mit dem Bentonit in Wechselwirkungen tritt und keine dämpfenden Eigenschaften eines Wasserfilms auf der Oberfläche des Bentonits vorliegt, kann eine Aussage darüber gemacht werden, welche Dauer und welcher Wasseraufwand nötig ist, um den Bentonitpuffer, um den Endlagerbehälter zu entfernen.

Mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung, der Impulserhaltung und der Erhaltung der Energie kann der Freistrahle für das Hochdruckverfahren ( $p < 100 \text{ bar}$ ) im Abstand  $x$  zum Düsenaustritt berechnet werden (Schlichting & Gersten, 2006). Unter Berücksichtigung der Herstellerangaben von Firma Lechler zu der Hochdruck-Flachstrahldüse 6FH mit einem Innendurchmesser von 1 mm und einem Strahlwinkel von 20° ist der Druckverlauf im Freistrahle zu berechnen (Lechler, 2020):

$$p_0 = \rho \cdot c_0 = \rho \cdot \frac{0,32 \cdot x}{d_0} \cdot \sqrt{\frac{p_x}{\rho}}$$

$p_0$	Freistrahldruck beim Düsenaustritt	[MPa]
$\rho$	Dichte der verwendeten Flüssigkeit	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
$c_0$	Freistrahlaustrittsgeschwindigkeit	$\left[\frac{m}{s}\right]$
$x$	Abstand zw. Düse u. Auftreffpunkt	[m]
$d_0$	Innendurchmesser der Düse	[m]
$p_x$	Freistrahldruck am Auftreffpunkt	[MPa]

Bei der Verwendung der oben erwähnten Größen ergibt sich der Freistrahldruck beim Düsenaustritt zu  $p_0 = 75 \text{ bar}$ . Ein Druck von  $p_0 = 80 \text{ bar}$  wird durch die Hochdruck-Flachstrahldüse 6FH von Lechler bei einem Volumenstrom von  $\dot{V} = 4,08 \frac{l}{min}$  bereitgestellt (Lechler, 2020). Wodurch die höchste gemessene Druckfestigkeit von vorkompaktierten Bentonitblöcken ( $p < 62 \text{ bar}$ ) überwunden werden kann (vgl. Abschnitt 5.5). Eine technische Realisierung durch marktgängige Komponenten kann demnach für das Hochdruckverfahren ( $p < 100 \text{ bar}$ ) möglich sein.

Kalbantner & Sjöblom (2000) haben die Entfernung des Bentonits mit Hilfe des Hochdruckverfahrens ( $p > 100 \text{ bar}$ ) getestet. Hierbei überraschte die Effizienz dieses Verfahrens so sehr, dass das Hochdruckverfahren ( $p < 100 \text{ bar}$ ) aufgrund eines komplexen Testsystemaufbaus nicht näher betrachtet wurde. Vergleichbare Anwendungsbeispiele sind auch aus anderen Ingenieurdisziplinen bekannt, siehe Lei (2017).

Kalbantner & Sjöblom (2000) gehen davon aus, dass die Entfernung des Bentonitpuffers mit dem Hochdruckverfahren ( $p < 100 \text{ bar}$ ) durch die Funktionsweise der direkten Kräfteinwirkung auf das Bentonit, einem Abrisseffekt von Bentonitbruchstücken sowie dem Spülen von gelockertem Bentonit durchgeführt werden kann. Aufgrund des angenommenen Spüleffektes, der bei diesem Verfahren auftritt, postulieren Kalbantner & Sjöblom (2000), dass hohe Volumenströme von ca. 4000 l/min erforderlich werden. Damit entstehen auch größere Volumina an Schlämmen bzw. Wasser-Bentonit-Gemischen. Die Dauer zur Entfernung von Material in der Menge eines Bentonitpuffers wird auf ca. 1 h geschätzt. Voraussichtlich benötigt jedoch die Entfernung des Bentonitpuffers aufgrund dessen Eigenschaften länger (Kalbantner & Sjöblom, 2000).

### 6.5.3 Mechanische Verfahren

Entscheidend für den Einsatz mechanischer Verfahren zum Lösen des Bentonits sind dessen Festigkeitseigenschaften. Die Bandbreite der mechanischen Festigkeit kompaktierter Bentonite wurde bereits in Abschnitt 5.5 beschrieben. Schmidt et al. (1992) stellen heraus, dass das Festigkeitsverhalten eines Bentonites stark von der Dichte und dem Wassergehalt abhängt und eine Korrelation in der Deviatorspannung von  $\sigma_3$  möglich ist. Bei geringer Dichte ist der Winkel der inneren Reibung sehr hoch und nimmt mit zunehmender Dichte ab.

Konsistenzgrenzen nach DIN 18122-1 werden in der Bodenmechanik genutzt, um die Eigenschaften bzw. Zustandsformen bindiger Böden bei unterschiedlichen Wassergehalten zu beschreiben. Es wird zwischen Schrumpfgrenze, Ausrollgrenze und Fließgrenze unterschieden. Mit Blick auf die mechanische Gewinnbarkeit ist besonders die Ausrollgrenze relevant, bei dessen Überschreiten der bindige Boden von halbfest zu plastisch übergeht. Im plastischen Bereich muss im Allgemeinen mit einem Verkleben der Schneid- oder Grabwerkzeuge gerechnet werden. Die Konsistenzgrenzen sind empirische Werte.

Schmidt et al. (1992) beschreibt für einen MX-80 (Na-Bentonit) eine Ausrollgrenze von 47 % (Wassergehalt). Vergleichbare Werte, in der Größenordnung um 50 % Wassergehalt sind in anderen Literaturstellen für andere Bentonite zu finden.

Juvankoski (2012) benennt für Benotitformsteine im skandinavischen KBS-3 Konzept einen Anfangswassergehalt von 17 %, was einer Sättigung von ca. 80% entspricht. Die Dichte der Bentonitblöcke und -ringe liegt bei ca. 2000 kg/m<sup>3</sup> bzw. einer Trockendichte von ca. 1700 kg/m<sup>3</sup>. Entsprechende Formsteine wurden auch im Experiment verwendet. Kristensson & Börgesson (2009) beschreiben, dass durch eine zusätzliche Filtermatte an der Kontur die Sättigung des Buffers beschleunigt wurde. Die Filtermatte wurde während der ersten zwei Jahre nicht zusätzlich mit Druck beaufschlagt. In der zweiten Hälfte der Versuchsdurchführung betrug der Wasserdruck 0,8 MPa.

Während des Rückbaus erfolgte eine Probennahme durch Kernbohrungen. Es konnte eine weitgehende Homogenisierung der Eigenschaften festgestellt werden. Weite Teile an der Mantelseite des Buffers bis an den Behälter waren gesättigt. Im Bereich über dem Behälter wurde keine Sättigung erreicht. Die Trockendichte nahe der Mantelfläche reduzierte sich in Folge der Homogenisierung. Der Wassergehalt in den gesättigten Bereichen lag bei ca. 30 % (Johannesson, 2007).

Dueck et al. (2011) bestätigen in zusätzlichen hydromechanischen Untersuchungen das aus vorangegangenen Untersuchungen (beispielsweise Dueck et al. (2010) und Karnland et al. (2009)) bekannte Materialverhalten. Druckfestigkeit bzw. maximale Deviatorspannung beim Versagen sind von der Sättigung bzw. der Porenzahl und Trockendichte abhängig, vgl. Abbildung 6-13. Für den gesättigten Bentonitbuffer ist damit mit einer Abnahme der Festigkeit zu rechnen. Aufgrund der praktischen Erfahrungen aus der Probennahme während des Retrieval Tests und den aus der Literatur bekannten Werten der Atterberg Grenzen kann bei dem Bentonitbuffer von einer halbfesten Konsistenz ausgegangen werden.

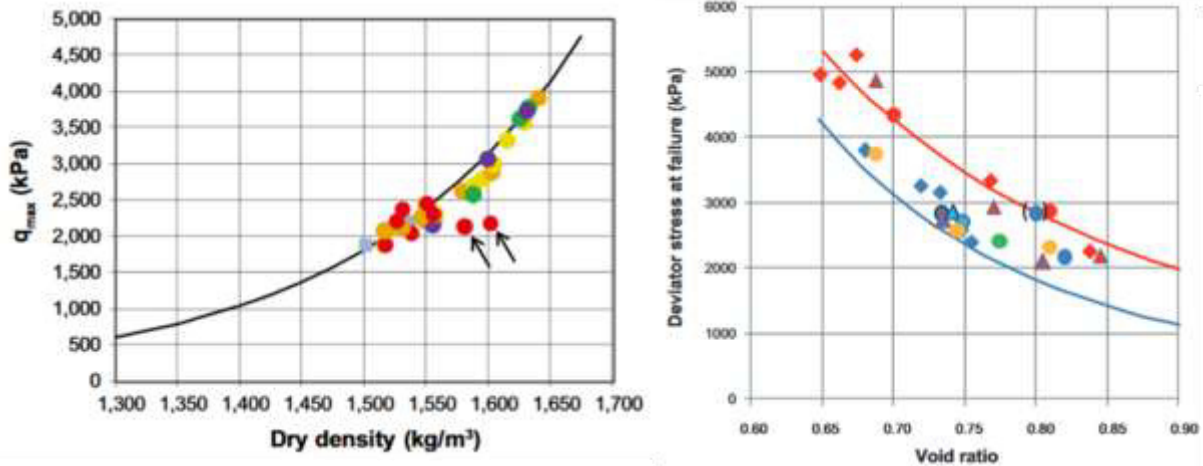


Abbildung 6-13: links: Maximale Deviatorspannung als Funktion der Trockendichte nach (Dueck et al., 2011), rechts: Maximale Deviatorspannung als Funktion der Porenzahl (Karnland et al., 2009)

Jobmann & Burlaka (2019) beschreiben für das Referenzmaterial Ca-Bentonit einen Anfangswassergehalt von <10 %. Vergleichbare Materialuntersuchungen wie für den zuvor beschriebenen MX-80 aus dem schwedischen Versuchsprogramm liegen nicht vor. Es wird angenommen, dass die Erkenntnisse übertragbar sind und der Bentonitbuffer mit steigender Sättigung und Homogenisierung der Dichte an Festigkeit verliert. Die geringe Menge an aufzunehmendem Wasser bis zur Sättigung führt nicht zu einer Überschreitung der Atterbergschen Grenzen. Das Material kann über den Rückholungszeitraum hinweg als halbfest beschrieben werden. In diesem Zusammenhang muss auch auf Garitte et al. (2015) verwiesen werden, die für das Schweizer Einlagerungskonzept Untersuchungen zum Lastabtrag von Bentonitblöcken unter verschiedenen Umgebungsbedingungen durchführten.

## Bohren

Aufgrund der geringen Druckfestigkeit und Verschleißwirkung von Bentonit eignen sich insbesondere drehende Bohrverfahren zum Freilegen der Behälter. Dabei wird der Bohrer unter permanentem Andruck gedreht um das Gestein spanend zu lösen. Das Bohrklein muss durch eine luft- bzw. wasserbasierte Spülung oder mechanisch ausgetragen werden. Um die Konsistenz nicht zu ändern, wird von einer Wasserspülung abgesehen. Eine Luftspülung sollte zur Minimierung einer eventuellen Kontaminationsverschleppung möglichst als Absaugung ausgeführt sein oder mit einer Absaugung kombiniert sein.

Für den Rückbau des Bentonitbuffers muss ab einer Tiefe von 2,5 m unterhalb der Sohle, über eine Länge von ca. 2,5 m das Einlagerungsbohrloch freigelegt werden, um die obere Stirnfläche des Abfallgebindes zu erreichen. Diese muss für den Greifer der Rückholvorrichtung gereinigt werden. Auf den verbleibenden 5 m Länge der Kokille ist dann die Mantelfläche des Behälters freizulegen, so dass die Entnahme mit möglichst geringem Widerstand erfolgt.



Mit Hilfe eines Raupenbohrgerätes und eines Schneckenbohrers in der Größe des Einlagebohrlochs wird der Buffer z. B. durch Kellybohren stückweise bis zur Oberkante des Behälters abgetragen. Dazu wird der Bohrer immer wieder in das Bohrloch eingeführt, Material erbohrt und in den Bohrwindungen aufgenommen; der Bohrer dann aus dem Loch entnommen und in der Strecke entleert. Das Bohrgut wird dort z. B. von einem Lade- und Transportfahrzeug aufgenommen und abtransportiert. Das Kellybohren nutzt eine seilgeführte, teleskopierbare Stange, um die Rotation und den Vorschub auf den Bohrer zu übertragen. Da diese Bohrtechnik vor allem über Tage eingesetzt wird, sind konstruktive Anpassungen nötig, um derartige Anlagen in den Bohrlochüberfahrungsstrecken einzusetzen. Unter anderem werden eine besonders kurz bauende Kellystange mit einer Arbeitslänge von ca. 6 m, ein extrem niedrigbauendes Mäkler-Bohrgerät, sowie wahrscheinlich eine verkürzte Bohrschnecke benötigt. Die folgende Abbildung zeigt ein niedrigbauendes Seriengerät mit Kellystange und Schneckenbohrer, das sich prinzipiell für die Aufgabe eignet. Gegebenenfalls ist eine Verkürzung des Bohrers zu Gunsten einer längeren Kellystange hilfreich.

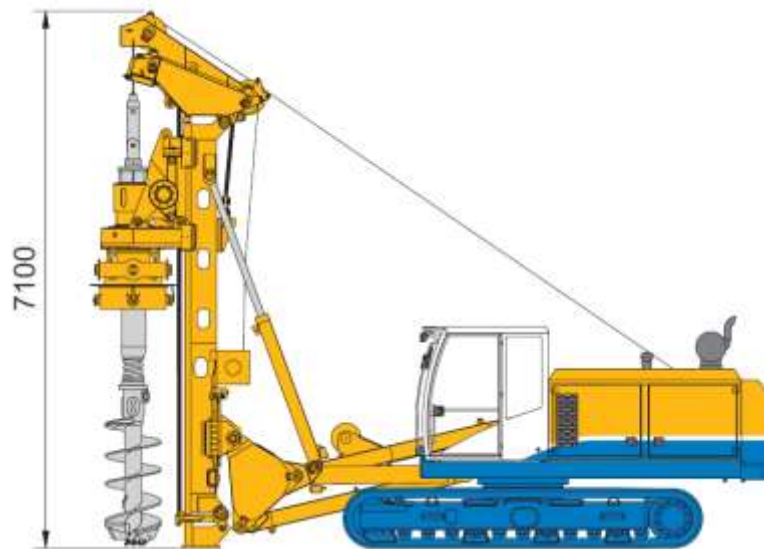


Abbildung 6-14: BAUER BG 12 H – Low Headroom Version – außer Produktion (Bauer, 2020)

Zunächst wird mit einer Schnecke mit zurückgesetztem Zentrum bis auf den Behälter gebohrt, um den Tragzapfen grob freizulegen. Am Behälter angekommen, wird der Schneckenbohrer entnommen, eine Abdeckung mit Führung für einen kleineren Bohrer auf dem Bohrloch aufgesetzt und eine Verrohrungsmaschine an das Bohrgerät angeschlagen bzw. vor das Bohrloch geklappt. Mit Hilfe eines Stapelfahrzeuges werden nun Segmente einer Hohlbohrschnecke dem Bohrgerät zugeführt. Dabei handelt es sich um dickwandige Rohre mit einem außen aufgetragenen Gewinde zur Förderung des Bohrkleins. Die Verbindung der Hohlbohrschnecken-segmente erfolgt über Passfedern und Längsnuten in der Wandung des Rohres sowie durch Sicherungsstifte gegen Herausfallen. Der Innendurchmesser der Rohre genügt dabei zur Aufnahme der Abfallgebinde. Mit Hilfe der Verrohrungsmaschine werden die Segmente gehalten, um sie zu verbinden und anschließend vom Bohrgerät nach unten abgelassen zu werden, bis der Bohrstrang fast auf dem Behälter aufsteht. Durch die Hohlbohrschnecke wird nun ein zweiter Bohrkopf in Form einer Glocke abgelassen (Abbildung 6-15). Aufgrund seiner Form und durch Drehen der Kellystange zentriert sich die Glocke über dem Halteknopf und zentriert da-

bei die Hohlbohrschnecke. Nun wird die Schnecke entlang des Behälters eingebohrt. Um weitere Segmente der Hohlschnecke nachzusetzen, wird die Kellystange mit der Glocke entnommen, abgekoppelt und am Bohrplatz abgelegt.

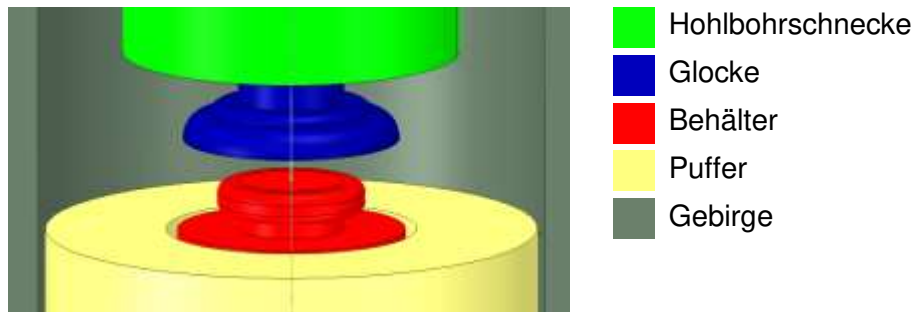


Abbildung 6-15: Doppelter Bohrstrang zur Zentrierung des Halteknopfes und zum Freilegen des Behälters

Der Bohrvorgang erfolgt über die Schrämwerkzeuge an der Stirnseite der Schnecke. Durch eine gute Passform im unteren Bereich drängt die Hohlbohrschnecke außerdem den am Behälter haftenden Buffer zu den Seiten, von wo er mittels der Schnecke nach oben transportiert wird. Der Buffer sammelt sich im oberen Bereich des Einlagerungsbohrloches, der im ersten Schritt freigelegt wurde. Der Bohrprozess ist beendet, wenn die Schnecke den Behälter nach unten um mindestens 0,2 m überragt und auf der Sohle weniger als 0,2 m übersteht.

Ist die Reinigung des Halteknopfes am Behälter nötig, wird ein Reinigungskorb an der Kellystange abgelassen. Er besitzt mehrere Bürsten, deren Borsten aus Stahl oder Kupferseilen bestehen können. Gelangen diese Borsten an den Halteknopf werden sie elastisch weggebogen. Bei einer Drehung um ihre eigene Achse gelangen sie dann aber auch unter den Rand des Halteknopfes. Für die Drehung der Borsten dient ein Elektromotor, der über eine mit ins Bohrloch gelassene Kabelverbindung oder einen Akku betrieben werden kann.

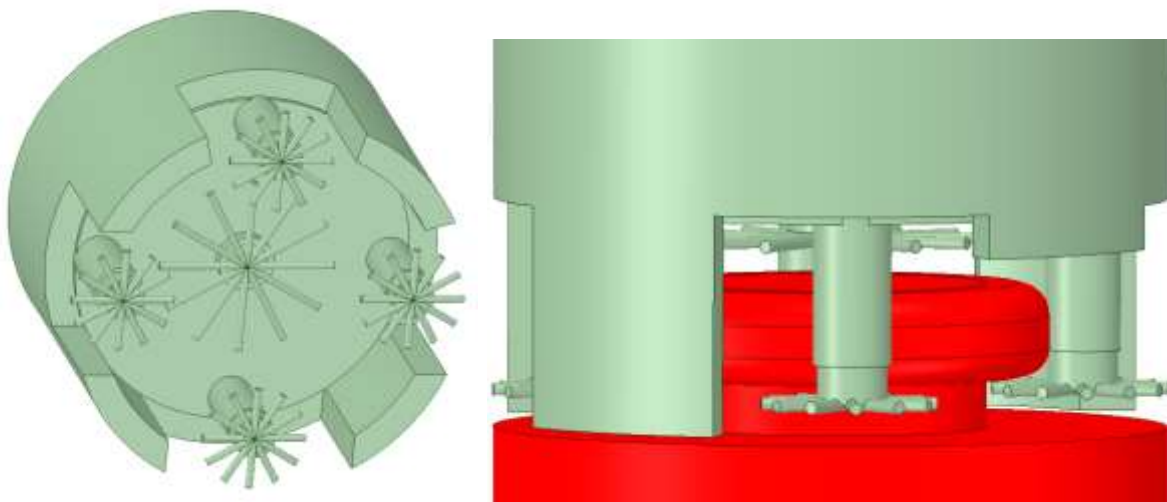


Abbildung 6-16: Reinigungsbuchse

Je nach Konsistenz des Buffers können unterschiedliche Bohrer im ersten Schritt notwendig werden. Hierfür gibt es offene und verschlossene Bohrer, die das Bohrklein besser zurückhalten. Generell wird dieses aus dem Spezialtiefbau bekannte Verfahren in weichen bis sehr festen Böden und Gesteinen angewandt. Auch für die Hohlbohrschnecke sind verschiedene Konsistenzen lösbar, wenn die richtige Schneide verwendet wird. Je nach Härte handelt es sich um eine Schneide oder mehrere Meißel.

Nach der Rückholung des Behälters kann die Hohlbohrschnecke wieder ausgebaut werden. Dazu wird sie in umgekehrter Richtung gedreht und gezogen.

#### 6.5.4 Mechanisches Lösen mit pneumatischer Förderung

Mobile Saugbagger als Aufbauten auf konventionelle LKWs sind in der Lage über mehrere Dezimeter und bis in ca. 15 m Tiefe loses Material abzusaugen. Die tatsächliche Saugleistung hängt dabei auch von der Art und Korngröße des Materials ab. Aus dem Tiefbau sind kleinbauende Manipulatoren mit integriertem Einlass für eine Saugleitung bekannt. Zusätzliche Werkzeuge etwa zum Lösen oder Brechen stärker verfestigter Bereiche oder dem Putzen der Bohrlochwandung werden aber benötigt. Aus dem (Straßen-)Tiefbau sind Saugbagger mit Drehrohren an den Saugrohrstutzen bekannt. Durch eine Rotation oder Oszillation des Einlassstutzens kann das aufzunehmende Material gelöst werden, siehe Abbildung 6-17.



Abbildung 6-17: Drehrohr am Saugstutzen eines Saugbaggers (STW, 2020)

#### 6.6 Freilegen des Bohrloches – Rückbau des Widerlagers

Jobmann et al. (2020) skizzieren für das Bohrloch des modifizierten KBS-3 Konzeptes die gleiche Widerlagerkonstruktion wie sie bereits im Konzept „multipler ewG“ beschrieben wurde. Dementsprechend kann für beide Konzepte das gleiche Rückbaukonzept genutzt werden. Eine ausführliche Beschreibung ist in Abschnitt 5.5 enthalten.

## 6.7 Wiederauffahrung für eine Rückholung

Eine Wiederauffahrung kann die Aufwältigung einer Bohrlochüberfahrungsstrecken umfassen. Je nach Rückholungszeitpunkt kann aber auch die Schaffung eines neuen Zugangs von den Tageszugängen zu dem rückzuholenden Einlagerungsfeld erforderlich sein. Unabhängig von ihrer Anordnung sind dann folgende Verschlusselemente wiederaufzufahren:

- Widerlager aus Beton
- Asphaltichtung
- Bentonitichtung (Ca-Bentonit)
- Aufsättigungskammer aus Schotter
- Versatzmaterial (Ausbruchsmaterial oder Ausbruchsmaterial-Bentonit-Gemisch)

Der Prozess der Wiederauffahrung bereits verüllter Strecken gleicht dem im Abschnitt 5.7 beschriebenen Vorgehen.

## 6.8 Wettertechnik und Klimavorausbetrachtung

Für das modifizierte KBS-3 Konzept wird die vertikale Bohrlochlagerung der Kokillen als Einlagerungsvariante berücksichtigt. Der grundlegende Aufbau der Bohrlochüberfahrungsstrecken und auch des Grubengebäudes gleicht dem Konzept „multipler ewG“. Wesentlicher Unterschied ist neben dem Bohrlochaufbau die Lagerung nur einer Kokille in einem Bohrloch. Für das gegebene Abfallmengengerüst sind somit mehr Bohrlöcher, mehr Bohrlochüberfahrungsstrecken und ein in Summe größeres Grubengebäude erforderlich. Dies stellt zusätzliche Anforderungen an die Bewetterung.

Für die Auslegung des Grubengebäudes in GRS (2020) erfolgte bei einer Auslegungstemperatur von 100 °C und berücksichtigt einen Bohrlochabstand von 15 m, einen Streckenabstand von 42 m und eine Beladung von 2,8 DWR-Brennelementen je Kokille. Mit den gewählten Parametern beträgt die maximale Temperatur am Wirtgestein ca. 60 °C. Die Temperaturentwicklung innerhalb der Strecke ist mit dem Konzept „multipler ewG“ vergleichbar, da die Geometrie der Überfahrungsstrecken annähernd gleich ist. 30 Jahre nach der Einlagerung sind an der Sohle Temperaturen von 47 °C und an der Firste von 43 °C zu erwarten.

Jobmann et al. (2020) verzichtet auf einen Bohrlochkeller. Im Ergebnis liegt der eingelagerte Behälter im modifizierten KBS-3 Konzept in einem Abstand von ca. 4,5 m unter der Sohle, vgl. Abbildung 6-18. Damit sind gegenüber dem Konzept „multipler ewG“ und auch dem Konzept aus GRS (2020) höhere Temperaturen an der Sohle und der Kontur der Strecke zu erwarten.

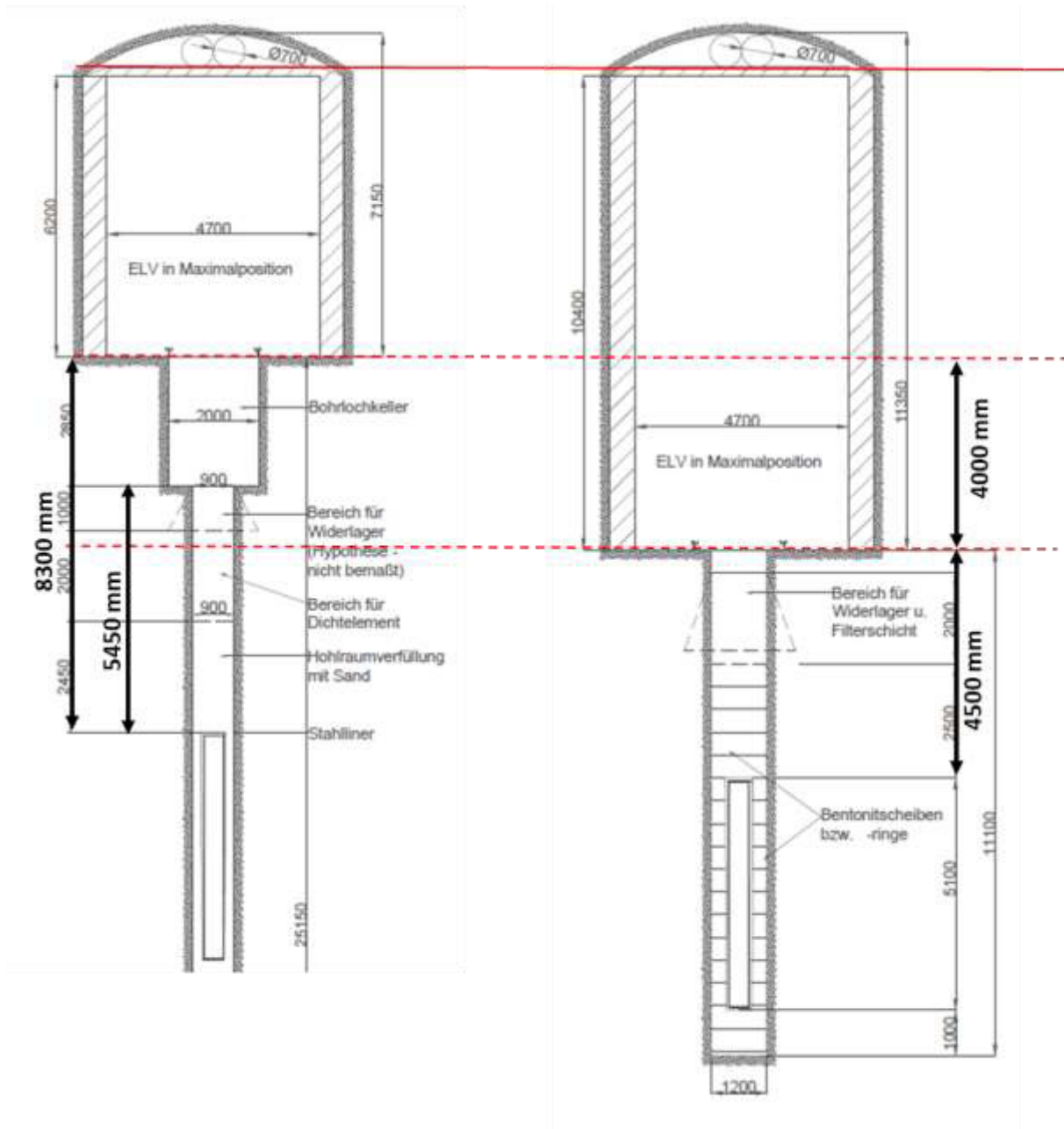


Abbildung 6-18: Querschnitte im Vergleich, links: RESUS K1 (multipler ewG nach GRS (2020)) und Bertrams et al. (2017), rechts: RESUS K4 (modifiziertes KBS-3 nach GRS (2020)) sowie Bertrams et al. (2021) und Jobmann et al. (2020)

Die Simulation der Wärmeausbreitung für das Konzept „multipler ewG“ (vgl. Abschnitt 5.10.2) zeigt, dass in die Einlagerungstrecke hinein keine Überlagerung der Temperaturfelder stattfindet. Die Temperaturentwicklung wird von der streckennächsten Kokille bestimmt. Die Wärmeausbreitung im Nahfeld um das Einlagerungsbohrloch wird deshalb, unter Berücksichtigung des kleineren Abstandes zur Strecke aus diesem Modell abgeleitet und auch für das „modifizierte KBS-3 Konzept“ angewendet. Abbildung 6-19 gibt den erwarteten Temperaturverlauf wieder. Erwartungsgemäß treten an der Sohle die höchsten Temperaturen auf. Fünf Jahre nach der Einlagerung werden dort ca. 50 °C erreicht. Im Mittel beträgt die Temperatur zu diesem Zeitpunkt ca. 44 °C. Ein Temperaturmaximum innerhalb der Strecke wird nach ca. 70 Jahren erreicht. Zu diesem Zeitpunkt sind an den Kokillen bereits sinkende Temperaturen zu



erwarten. Im Mittel werden dann Temperaturen von 79 °C in der Strecke erwartet. Im Vergleich zu multiplen ewG werden durchschnittlich um 4 K höhere Mitteltemperaturen erreicht. Die Temperatur an der Sohle, direkt über dem Einlagerungsbohrloch steigt bis auf ca. 85 °C an.

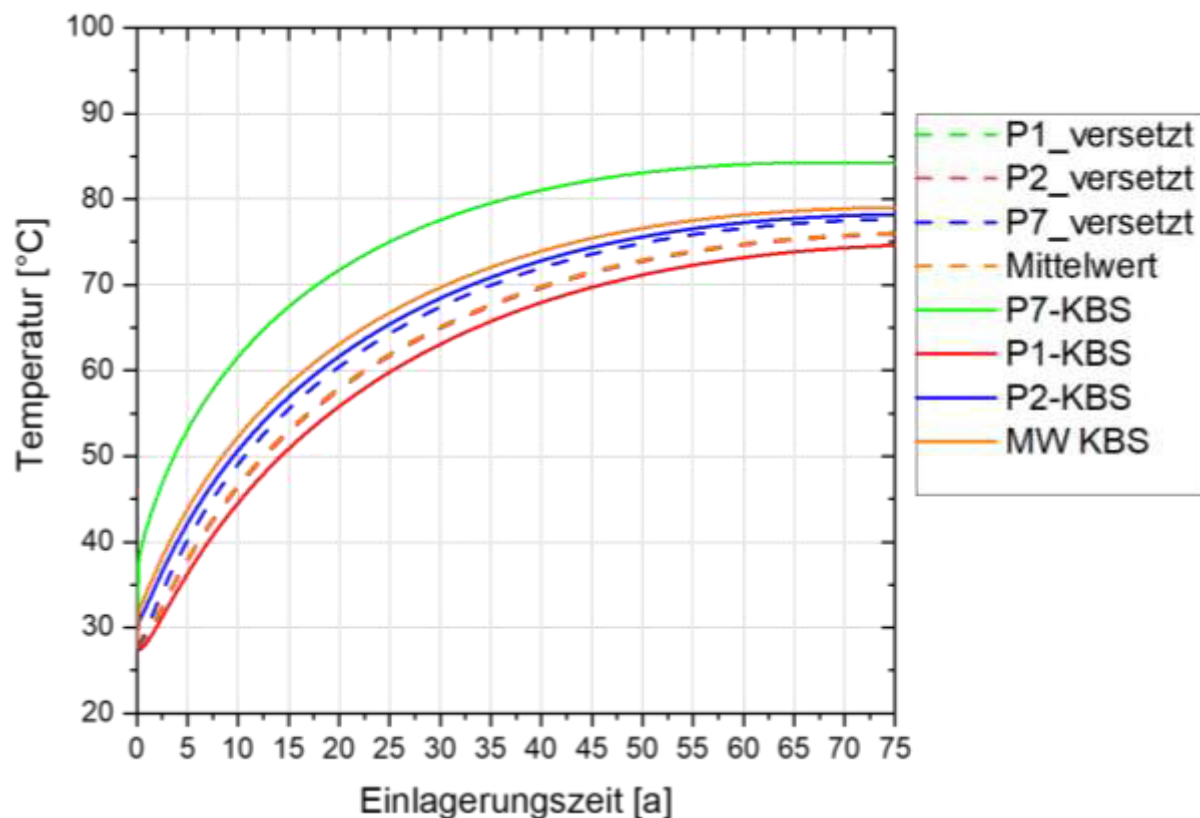


Abbildung 6-19: Temperaturentwicklung innerhalb der versetzten Bohrlochüberfahrungsstrecke im Vergleich zum Einlagerungskonzept „multipler ewG“

Bertrams et al. (2017) berücksichtigt für die Dimensionierung der Strecken zwei parallele Luttenstränge mit je 700 mm Durchmesser. Im generischen Endlagerkonzept nach GRS (2020) sind für die Einlagerungstrecken Längen bis 300 m realisiert. Für die Klimavorausberechnung wird eine Streckenlänge von maximal 400 m berücksichtigt. Die größten Verbraucher sind die Entnahme des Versatzes sowie der Einbau von Versatz mit einem Wetterbedarf von ca. 20 m<sup>3</sup>/s und einem erwarteten Wärmeeintrag von ca. 300 kW bei dieselgetriebenen Fahrzeugen oder 100 kW bei rein elektrischen Fahrzeugen.

Die Erkenntnisse aus Abschnitt 5.10 sind auf das Endlagerkonzept „modifiziertes KBS-3 Konzept“ übertragbar. Aus den höheren Gebirgstemperaturen und den längeren Sonderbewetterungsstrecken sind aber größere Wärmeeinträge in die Wetter zu erwarten. Die Modellrechnungen zur Ableitung von Grenzzuständen werden unter den veränderten Randbedingungen wiederholt. Für die Eingangszustände der Wetter wird ein Bereich von 20 °C bis 25 °C Trockentemperatur und 50 % bis 100 % rel. Luftfeuchte definiert. Für das gesamte Grubengebäude wird ein konstanter Feuchteeintrag angenommen.

Abbildung 6-20 verdeutlicht die zuvor beschriebenen Effekte. Hohe Gebirgstemperaturen und eine lange Verweildauer der Wetter in der Blindstrecke führen zu einer starken Erwärmung.



Bereits bei Gebirgstemperaturen zwischen 25 °C und 28 °C ist eine Überschreitung von 25 °C Effektivtemperatur zu erwarten. Diese Streckenmitteltemperaturen treten bereits kurz nach der Einlagerung auf. Eine Anpassung der Arbeitszeit oder zusätzliche Kühlmaßnahmen sind erforderlich. Eine Überschreitung des Grenzwertes 30 °C effektiv, tritt zwischen 32 °C und 36 °C Gebirgstemperatur auf. Solche Streckenmitteltemperaturen werden innerhalb der ersten 2 Jahre nach der Einlagerung erwartet. Zusätzliche Kühlmaßnahmen sind damit unerlässlich.

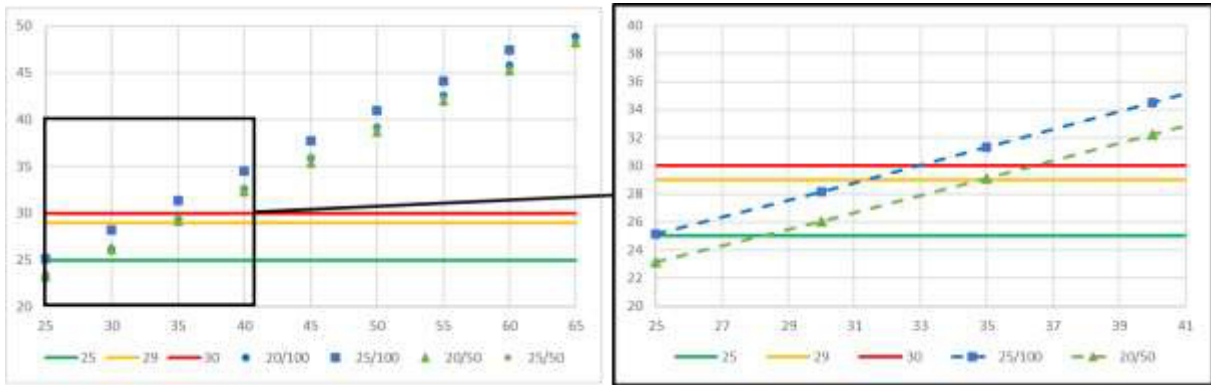


Abbildung 6-20: vorläufig, erwartete Effektivtemperaturen in einer Böhrlöcherüberfahrungsstrecke als Funktion der umgebenden Gebirgstemperatur

Abbildung 6-20 zeigt indirekt auch den signifikanten Einfluss der Feuchte bzw. des Feuchteintrags aus dem Gebirge. Die vier betrachteten Zustände (Trockentemperatur 20 °C oder 25 °C und rel. Feuchte 50 % oder 100 %) führen nur zur geringen unterschieden in der Effektivtemperatur. Im Vergleich zu den Modellrechnungen für das Konzept „multipler ewG“ (Abschnitt 5.10.2) ist dies ein deutlicher Unterschied. Dies begründet sich durch den angenommenen konstanten Feuchteeintrag aus dem Gebirge, der die unterschiedlichen Eintrittsbedingungen relativiert. Eine zusätzliche Variation des Feuchteeintrags aus dem Gebirge zeigt, dass bei trockeneren Umgebungsbedingungen auch höhere Gebirgstemperaturen tolerierbar sind. Während für einen gesättigten Zustand der Grenzwert ab 34 °C Gebirgstemperatur überschritten wird, ist für sehr trockene Bedingungen eine Gebirgstemperatur von 42 °C oder ein Zeitraum von ca. 4 Jahren nach der Einlagerung noch akzeptabel, vgl. Abbildung 6-21.

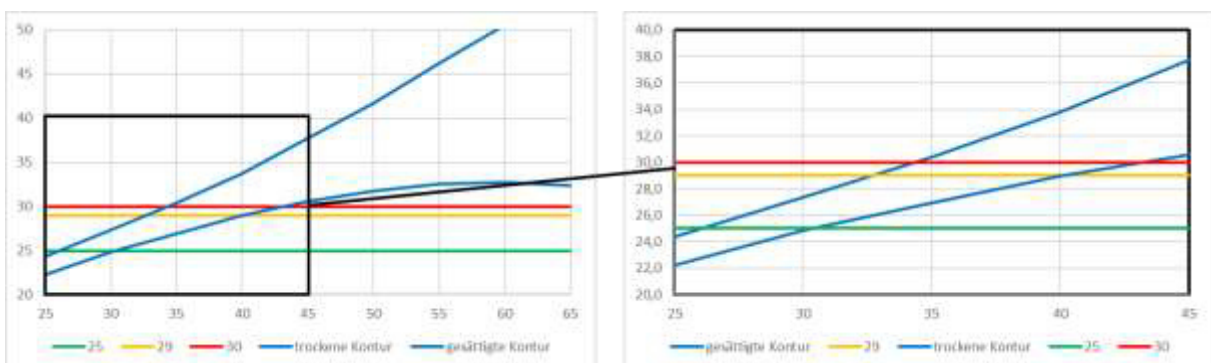


Abbildung 6-21: vorläufig, Einfluss des zusätzlichen Feuchteintrags auf die Effektivtemperatur

## 7 Zusammenfassung

Der vorliegende Abschlussbericht fasst die Projektergebnisse des FuE-Vorhabens "Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus einem HAW-Endlager in Kristallingestein" (KOREKT) zusammen. Die durchgeführten Arbeiten umfassen eine Beschreibung der einzelnen Prozessschritte, die zur Durchführung der Rückholung erforderlich sind. Das schließt eine Benennung der benötigten Technik inkl. dem Aufzeigen von Beispielen marktgängiger Technik ein, die die Basis für eine gesonderte Maschinenentwicklung speziell für die Rückholung bildet. Weiterhin wurden mit thermo-mechanischen Modellen das Systemverhalten des verfüllten Einlagerungsbohrloches untersucht und durch eine Klimavorausberechnung eine erste Vorhersage der zu erwartenden Bedingungen im Grubengebäude erstellt.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Rückholbarkeit aller Abfallgebinde aus den unterschiedlichen Einlagerungskonzepten gegeben ist. Die Erfahrungen aus der Implementierung der Rückholbarkeit in Endlagerkonzepten in anderen Wirtsgesteinen wurde bei der Konzeption im Kristallingestein berücksichtigt. Das auch im Kristallingestein angewendete Re-Mining Konzept nutzt die vorhandenen Strecken bzw. wältigt diese wieder auf. Dazu werden die Versatz- bzw. Buffermassen entnommen und mit mobiler Technik zum Schacht transportiert. Die an Streckenkreuzen potentiell vorhandenen festen Widerlager müssen dazu zunächst zerkleinert werden. Der Abtransport der Abfallgebinde erfolgt ab dem Übergang von Querschlag und Richtstrecke gleisgebunden. Je nach Anzahl der rückzuzuholenden Behälter sollte der gleislose Transport in Betracht gezogen werden.

Obwohl für die Rückholung ein Zeitraum von mehreren Jahrzehnten anzunehmen ist, zeigt eine Gegenüberstellung, dass sie für die reinen bergmännischen Tätigkeiten weniger Zeit als die Auffahrung und Einlagerung benötigt. Die größte Unsicherheit erwächst aus dem schwer planbaren Aufwand zur Streckensicherung und aus dem Grund der Rückholung. Während der Aufwand vor allem zeitliche Schwankungen ergeben kann, wirkt sich die Ursache der Rückholung möglicherweise auf die gesamte Technologie aus. Dementsprechend können andere bzw. zusätzliche Schritte notwendig werden, die hier nicht erfasst sind.

Für das Konzept eines „überlagernden ewGs“ entspricht der Rückholungsprozess dem gleichen Vorgehen, wie es auch in den Einlagerungskonzepten der horizontalen Streckenlagerung im Salz und im Tongestein angedacht ist. Für die Entnahme des Bentonitbuffers wurden zusätzliche Technologien beschreiben.

Für das Konzept „multipler ewGs“ entspricht der Rückholungsprozess dem gleichen Vorgehen, wie es auch in den Einlagerungskonzepten der vertikalen Bohrlochlagerung im Salz und im Tongestein angedacht ist. Die wesentliche technische Herausforderung bleibt die Entnahme des Sandversatzes im Bohrloch. Die bereits konzipierte Saugkokille kann auch im Kristallingestein zum Einsatz kommen. Die Einlagerungsvorrichtung kann auch für die Entnahme der Kokillen genutzt werden. Mit den durchgeführten TM-Simulationen wurden die erforderlichen Zugkräfte bestimmt, um die Kokille aus dem restlichen Versatzmaterial zu ziehen. Weiterhin wurden die Untersuchungen genutzt, um die Auswirkungen einer konischen Außenform der

Kokille zu bewerten. Die ermittelte Reduzierung der benötigten Zugkraft liegt bei ca. 1% gegenüber der benötigten Zugkraft für eine zylindrische Kokille. Dies begründet sich aus der vergleichsweise geringen Ausprägung der Kegelform an der Kokille. Über die Länge der Kokille beträgt der Neigungswinkel ca.  $0,5^\circ$ . Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird empfohlen, die konische Außenform der Kokille nicht weiter zu betrachten, da der erhoffte Nutzen nur sehr begrenzt vorhanden ist und die erwarteten Nachteile, wie das aufwendigere technische Design des Transferbehälters, nicht aufwiegt.

Im modifizierten KBS-3 Konzept ist bereits aus Schweden, Finnland und Japan ein Rückholungskonzept auf Basis des Freispülens des Bentonitbuffers bekannt. Die Anwendung im deutschen Endlager- bzw. Rückholungskonzept wird durch die Favorisierung eines Ca-Bentonits erschwert. Dieser lässt sich im Vergleich zu dem international favorisierten Na-Bentonit mit dem genannten Verfahren schwerer freispülen. Weiterhin scheint durch den sehr zeitaufwendigen Spülvorgang § 13 (2) der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung nicht erfüllt: *„Die Rückholung ist so zu planen, dass der dafür voraussichtlich erforderliche technische und zeitliche Aufwand den der Einlagerung nicht unverhältnismäßig übersteigt.“* Als Alternative wurden mechanische Verfahren identifiziert.

## Quellenverzeichnis

- Abiljo (2015) Buckets >> Abiljo, Abiljo Excavator Services Ltd, Onlinenzitat: <http://www.abiljo.ltd.uk/products/buckets/>, gelesen 22.10.2020
- Barton, N.R.; Lien, R.; Lunde, J. (1974) Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Springer. 6 (4): 189–236. doi:10.1007/BF01239496.
- Bauer (2020) BG 12 H - Großdrehbohrgerät Rotara Drilling Rig, BAUER Maschinen GmbH, Schrobhausen
- Bertrams, N.; Herold, P.; Herold, M.; Krone, J.; Lommerzheim, A.; Prignitz, S.; Simo, E. (2017) Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland - Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine
- Bertrams, N.; Herold, P.; Leonhard, J.; Marggraf, U.; Seidel, D.; Wunderlich, A. (2021) Weiterentwicklung der Konzepte der Transport- und Einlagerungstechnik von Endlagerbehältern, BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine
- Birgersson, M.; Börgesson, L.; Hedström, M., Karnland, O.; Nilsson, U. (2009) Bentonite erosion, Final report, TR-09-34, SKB, Stockholm, Dezember 2009
- BMU (2010) Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle Stand 30. September 2010, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
- Bollingerfehr, W.; Herold, P.; Dörr, S.; Filbert, W. (2014) Auswirkungen der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte, Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine
- Breidung, K. (2002) Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken. Forschungsvorhaben Schachtverschluss Salzdetfurth. Abschlussbericht FKZ: 02C0516, K+S AG, Kassel.
- DIN 18122-1:1997-07 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) - Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze
- Dueck, A.; Börgesson, L.; Johannesson, L.-E. (2010) Stress-strain relation of bentonite at undrained shear - Laboratory tests to investigate the influence of material composition and test technique, SKB TR-10-32, SKB, Stockholm
- Dueck, A.; Johannesson, L.-E.; Kristensson, O.; Olsson, S. (2011) Report on hydro-mechanical and chemical-mineralogical analyses of the bentonite buffer in Canister Retrieval Test. SKB TR-11-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- DYWIDAG (2019) DYWIDAG Geotechnische Systeme, DYWIDAG-Systems International GmbH (DSI), Königsbrunn
- EndSiAnfV (2020) Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094)
- Eng, A. (2008) Äspö Hard Rock Laboratory. Canister Retrieval Test. Retrieval phase. Project report. SKB IPR-08-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Engelmann, H. J. & Filbert, W. (1995) Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE): Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente (DEAB) - Handhabungsversuche zur Streckenlagerung T60, Peine, 1995
- Epiroc (2018) Boltec S - Fully mechanized bolting rig developed for installation of rock bolts from 1.5 to 2.4 m in smaller drive dimensions, Epiroc Rock Drills AB, Örebro

- Epiroc (2020a) Underground Trucks | Minetruck 2020 | Epiroc, Epiroc Rock Drills AB, Onlinezeitat: <https://www.epiroc.com/en-gr/products/loaders-and-trucks/diesel-trucks/minetruck-mt2200>, gelesen 16.10.2020
- Epiroc (2020b) Boltec E - Fully mechanized rock bolting rig for bolt lengths from 2.4-6 meters, effective in roof heights up to 13 meters, Epiroc Rock Drills AB, Örebro
- ESK (2011) Rückholung / Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle aus einem Endlager – ein Diskussionspapier, Entsorgungskommission, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter
- Filbert, W.; Bollingerfehr, W.; Heda, M.; Lerch, C.; Niehues, N.; Pöhler, M.; Schulz, J.; Schwarz, T.; Toussaint, M.; Wehrmann, J. (2010) Optimization of the Direct Disposal Concept by Emplacing SF Canisters in Boreholes (ESDRED/DENKMAL) - Final Report, Peine, 2010
- Fries, T. (2013) Thema Rückholung - Schweizer Konzepte, Thema Rückholung –Schweizer Konzepte (“Topic: Retrieval –Swiss Concepts”), Technisches Forum Sicherheit (“Technical Forum Safety”), 07.03.2013.
- Garitte, B.; Kober, F.; Müller, H.R.; Köhler, S.; Weber, H.; Blechschmidt, I. (2015) Stability of compacted bentonite blocks and block pedestals under changing climatic conditions in tunnels and long-term loads [POSTER], Nagra, Wettingen
- GRS (2012a) Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS): Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Arbeitspaket 6 - Abschlussbericht, GRS-Bericht GRS-281, Köln
- GRS (2012b) Integrität geotechnischer Barrieren - Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-287; Köln.
- GRS (2017) Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen - Abschlussbericht, GRS-Bericht GRS-471, Köln
- GRS (2020) RESUS - Empfehlungen zur sicherheitsgerichteten Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG (Synthesebericht), GRS 567, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit, Köln
- Grupa, J.B.; Hoorelbeeke, J.P.; Ziegenhagen, J.; Santiago, J-L.; Zuidema, P.; Crossland, I.; Vrijen, J.; Vira, J.; Volckaert, G.; Papp, T. (2000) RESULTS OF THE CONCERTED ACTION ON THE RETRIEVABILITY OF LONG LIVED RADIOACTIVE WASTE IN DEEP UNDERGROUND REPOSITORIES, WM'01 Conference, February 25-March 1, 2001, Tucson, AZ
- Herold, P.; Prignitz, S.; Simo, E.; Filbert, W.; Bertrams, N. (2018) Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen (ERNESTA) - Abschlussbericht, BGE TECHNOLOGY GmbH, PEine
- Hofmann (2003): Einfluss konzentrierter Salzlösungen auf die Physiko-Chemischen Eigenschaften quellfähiger Tonminerale: Konsequenzen für den Einsatz von Bentonit als versatzmaterial in einem Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle in Salzformationen, Dissertation
- IAEA (2009) International Atomic Energy Agency (IAEA): Geological Disposal of Radioactive Waste: Technological Implications for Retrievability NW-T-1.19, Wien, 2009
- IAEA (2013) CHARACTERIZATION OF SWELLING CLAYS AS COMPONENTS OF THE ENGINEERED BARRIER SYSTEM FOR GEOLOGICAL REPOSITORIES; RESULTS OF AN IAEA COORDINATED RESEARCH PROJECT 2002–2007, IAEA-TECDOC-1718, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY VIENNA, 2013

- Imai, M.; Ishii, T.; Takamoto, N.; Emori, M.; Tada, H.; Shiraishi, T.; Gohke, M.; Toguri, S.; Yamaura, M.; Maemura, T. (2018) Analytical study on the influence on safety during maintaining retrievability, IGD-TP Exchange Forum 8, Berlin
- ISO 19296 (2018) ISO 19296:2018-11, Bergbau - Mobile Untertagemaschinen - Maschinensicherheit, Beuth Verlag, Berlin
- ITC (2016) Tunnelvortriebs- und Lademaschine ITC 120N - F8, ITC GmbH & Co.KG, SCHÖLLER SPECIAL MACHINES GMBH&CO.KG, Hausen am Bach
- Jobmann, M. & Burlaka, V. (2019) Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallingestein in Deutschland, Technischer Bericht, BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine
- Jobmann, M. & Lommerzheim, A. (2015) Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell NORD. Technischer Bericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine
- Jobmann, M. (2002) Hydraulische Modellierungen, F+E-Vorhaben Schachtverschluss Salzdorf. Technischer Bericht, DBETEC, Peine.
- Jobmann, M.; Becker, D.-A.; Hammer, J.; Jahn, S.; Lommerzheim, A.; Müller-Hoeppe, N.; Noseck, U.; Krone, J.; Weber, J.-R.; Weitkamp, A.; Wolf, J. (2016) Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland - Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine
- Jobmann, M.; Beushausen, M.; Burlaka, V.; Flügge, J.; Frenzel, B.; Lommerzheim, A.; Maßmann, J.; Mrugalla, S.; Müller, C.; Noseck, U.; Rübel, A.; Simo, E.; Sönneke, J.; Thiedau, J.; Weitkamp, A.; Wolf, J. (2020) Strategie und konzeptionelles Vorgehen zur Sicherheitsbewertung, CHRISTA II, Technischer Bericht, BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine
- Johannesson, L.-E. (2007) Dismantling and sampling of the buffer and determination of density and water ratio, IRP-07-16, SKB, Stockholm
- Juvankoski, M. (2013) Buffer Design 2012, Posiva-Report 2012-14, Posiva, Eurajoki
- Kalbantner, P. & Sjöblom, R. (2000) Techniques for freeingdeposited canistersFinal report; TR-00-15
- Karnland, o.; Olsson, S.; Dueck, A.; Birgersson, M.; Nilsson, U.; Hernan-Håkansson, T.; Pedersen, K.; Nilsson, S.; Eriksen T. E.; Rosberg, B. (2009) Long term test of buffer material at the Äspö Hard Rock Laboratory, LOT project - Final report on the A2 test parcel, SKB TR-09-29; SKB, Stokholm
- Kjellander R., Marcelja S., Quirk J., 1988. Attractive double Layer Interactions between Calcium and Clay particles, JCIS, 126, 194-211.
- KlimaBergV (1983) Klima-Bergverordnung vom 9. Juni 1983 (BGBl. I S. 685), die durch Artikel 5 Absatz 2 der Verordnung vom 18.Oktober 2017 (BGBl. I S. 3584) geändert worden ist
- Knoll, P; Finder, M.; Kudla, W. (2010) Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) (02C1204), Teil 2: Erprobung von Funktionselementen in situ, Abschlussbericht, Grube Teutschenthal Sicherungs GmbH
- Kolymbas, D. (2018) Geotechnik: Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau, Springer Berlin Heidelberg.
- Komine, H.; Yasuhara, K.; Murakami, S. (2009) Swelling characteristics of bentonites in artificial seawater. In: Canadian Geotechnical Journal. February 2009. DOI: 10.1139/T08-120.



- Komm (2016) Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe: Abschlussbericht, Drucksache 268, Hrsg. Geschäftsstelle Nationales Begleitgremium, Berlin
- Kristensson, O.; Börgesson, L. (2015) Canister Retrieval Test, Final report, TR-14-19, SKB
- Lechler (2020) Hochdruck-Flachstrahldüsen. Baureihe 6FH. Datenblatt, Onlinezitat: [https://www.lechler.com/fileadmin/media/kataloge/pdfs/industrie/katalog/DE/04\\_flachstrahl/lechler\\_flachstrahlduesen\\_baureihe\\_6FH.pdf](https://www.lechler.com/fileadmin/media/kataloge/pdfs/industrie/katalog/DE/04_flachstrahl/lechler_flachstrahlduesen_baureihe_6FH.pdf), gelesen 03.03.2020
- Lehtonen, M. (2010) Opening up or closing down radioactive waste management policy? Debates on reversibility and retrievability in Finland, France, and the United Kingdom. Risk, Hazards & Crisis in Public Policy. Volume 1. Issue 4. Article 6. DOI: 10.2202/1944-4079.1044.
- Lei (2017) Determining the Threshold Pressure of Clay-Cutting by a Mobile Jet for Coastal Construction, Journal of Coastal Research
- Liu, J. & Neretnieks, I. (2006) Physical and chemical stability of the bentonite buffer, R-06-103, SKB, December 2006
- Missana, T.; Alonso, U.; Schatz, T. (2018) Progress Report on the effects of the water chemistry, clay chemistry and water/clay interactions on erosion processes, BELBaR DELIVERABLE D2.1
- MTS (2020) MTS DINO12, MTS Mobile Tiefbau Saugsysteme GmbH, Onlinezitat: <https://www.saugbagger.com/wp-content/uploads/2015/01/mts-broschuere-2019-de-web.pdf>, gelesen 19.10.2020
- Müller, H.; Garitte, B.; Vogt, T.; Köhler, S.; Sakaki, T.; Weber, H.; Spillmann, T.; Hertrich, M.; Becker, J.; Giroud, N.; Cloet, V.; Diomidis, N.; Vietor, T. (2017) Implementation of the full-scale emplacement (FE) experiment at the Mont Terri rock laboratory, Swiss Journal of Geosciences
- NEA (2001) Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste - Reflections at the International Level, Nuclear Energy Agency, Paris
- NEA (2011) Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel - Final Report, Nuclear Energy Agency, Paris, 2011
- NEA (2012) Reversibility and Retrievability in Planning for Geological Disposal of Radioactive Waste, Proceedings of the "R&R" International Conference and Dialogue 14-17 December 2010, Reims, France, NEA No. 6993, 2012
- Nirvin, B. (2007) Retrieval of deposited canister for spent nuclear fuel. Freeing- slurring of saturated bentonite buffer around a canister at Äspö HRL. Technology, equipment and results in connection with freeing for the Canister Retrieval Test. Svensk Kärnbränslehantering AB: Stockholm
- NUMO (2013) Nuclear Waste Management Organization of Japan: Safety of the Geological Disposal Project 2010, Safe Geological Disposal Based on Reliable Technologies, English Summary, 2013
- Okrusch, M. & Matthes, S. (2013) Mineralogie: Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde, Springer Berlin Heidelberg.
- P. Knoll; W. Kudla; M. FINDER (2010) Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnalit) für UTD/UTV, Teil 2: Erprobung von Funktionselementen, Zusammenfassender Abschlussbereich, TU Bergakademie Freiberg, Teutschenthal, 2010

- Paus (2020a) Uni 50 Serie, Hermann Paus Maschinenfabrik GmbH, Onlinezitat: [https://www.paus.de/fileadmin/\\_processed\\_/8/2/csm\\_Paus-Image-Univ-50-3-LT-K-6031704-Kran\\_WEB\\_6\\_97f46f25e2.jpg](https://www.paus.de/fileadmin/_processed_/8/2/csm_Paus-Image-Univ-50-3-LT-K-6031704-Kran_WEB_6_97f46f25e2.jpg), gelesen 14.10.2020
- Paus (2020b) Paus Dump Truck - Manoeuvrable and Robust Material Transport in Underground Mining, Hermann Paus Maschinenfabrik GmbH
- Paus (2020c) Hermann Paus Maschinenfabrik GmbH: PFL 8, Hermann Paus Maschinenfabrik GmbH, Onlinezitat: <https://www.paus.de/berg-und-tunnelbau/fahrlader/pfl-8-serie.html>, gelesen 16.10.2020
- Paus (2020d) Hermann Paus Maschinenfabrik GmbH: Scaler 1253 S10, Hermann Paus Maschinenfabrik GmbH, Onlinezitat: <https://www.paus.de/berg-und-tunnelbau/beraubefahrzeuge/scaler-1253-s10.html>, gelesen 02.12.2020
- Pöhler, M.; Amelung, P.; Bollingerfehr, W.; Engelhardt, H.-J.; Filbert, W.; Tholen, M. (2010) Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein (ERATO) - Abschlussbericht, Peine
- POSIVA (2012) Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto. Design Basis 2012. Posiva Report 2012-03. Posiva Oy. December 2012.
- Prinz, H., Strauß, R. (2018). Ingenieurgeologie. Deutschland: Springer Berlin Heidelberg.
- RWMC (2019) Onlinezitat: <http://fullscaledemo.rwmc.or.jp/movie/>, gelesen am 04.12.2019
- Saario, T. & Raiko, H. (1999). Retrievability of Spent Nuclear Fuel Canisters. Posiva working report 99-21. Posiva Oy. March 1999. (in Finnish)
- Schlichting, H. & Gersten, K. (2006) Grenzschicht-Theorie. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Schmalz (2020) Handhabung Ergonomische Vakuumheber, J. Schmalz GmbH, Onlinezitat: [WWW.SCHMALZ.COM/VAKUUMHEBER](http://WWW.SCHMALZ.COM/VAKUUMHEBER), gelesen 14.10.2020
- Schmidt, W.; Sitz, P.; Kessler, J. (1992) Physikalische und chemische Eigenschaften von Bentonit als Verfüll- und Versiegelungsmaterial bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle, NTB 93-37, Nagra, Wettingen
- SKB (2009) Underground design Forsmark Layout D2, R-08-116, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm
- SSMFS (2008) The Swedish Radiation Safety Authority's regulations and general advice concerning safety in connection with the disposal of nuclear material and nuclear waste, SSMFS 2008:21, Swedish Radiation Safety Authority Regulatory Code
- StandAG (2017) Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 7. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2760) geändert worden ist
- StrlSchV (2018) Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036), die zuletzt durch Artikel 6 des Gesetzes vom 20. Mai 2021 (BGBl. I S. 1194) geändert worden ist
- STW (2020) Saugbagger, Onlinezitat: <https://www.saugbagger.org/technik2/>, gelesen am 12.10.2020
- Thyssen (2020) Barracuda: Der Kompakt-Schaufelradbagger | thyssenkrupp, thyssenkrupp Industrial Solutions AG, Onlinezitat: <https://www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com/de/produkte-und-services/mining-systems/schaufelradbagger/barracuda>, gelesen 17.10.2020
- Toguri, S; Jang, J.; Iwasa, K.; Asano, H.; Ishii, T.; Okihara, M.; Nakashima, H. (2010) Design options for HLW repository operation technology, (v) Preliminary study and small scale experiments on the method of removal of buffer material with salt solution, ICM2010-40254

- TRGS (2019) Technische Regeln für Gefahrstoffe - Abgase von Dieselmotoren, TRGS 554, GMBI 2019 S. 88-104[Nr. 6] v. 18.03.2019
- Vinx, R. (2015) Gesteinsbestimmung im Gelände. 4. Auflage. Berlin/ Heidelberg: Springer Spektrum
- Volvo (2020) ECR25D | Bagger | Überblick | Volvo Construction Equipment, Volvo, Onlinezitat: <https://www.volvoce.com/deutschland/de-de/products/excavators/ecr25d/>, gelesen 19.10.2020
- Weiß, R.; Hilmer, A.; Friedrich, J. (1998) Baubetriebslehre - Kosten- und Leistungsrechnung - Bauverfahren, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden
- Witt, K. J. (2018). Grundbau-Taschenbuch, Teil 3: Gründungen und geotechnische Bauwerke. Wilhelm Ernst & Sohn.
- Ziegenhagen, J. & Schmidt, G. (2008) Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland - Anhang Endlagerbetrieb: Komponenten und Abläufe eines Einlagerungsbetriebes, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS-247), Braunschweig/Darmstadt
- Ziegler, M. (2012). Geotechnische Nachweise nach EC 7 und DIN 1054: Einführung mit Beispielen. Deutschland: Ernst & Sohn.

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 2-1:	Typische Entwicklungsstufen eines Endlagers und Zuordnung der Rückholbarkeit und Bergung, nach (NEA, 2011)	7
Abbildung 4-1:	Schematische Darstellung des Verfüll- und Verschlusskonzeptes überlagernder ewG, Jobmann et al. (2016)	14
Abbildung 4-2:	Profil der Einlagerungsstrecke für POLLUX®- und CASTOR®-Behälter (19,7 m <sup>2</sup> ), nach Bertrams et al. (2017)	17
Abbildung 4-3:	Profil der Einlagerungsstrecke für MOSAIK®-Behälter und Einlagerungsschema stehend nach Herold et al. (2018)	18
Abbildung 4-4:	Schematische Darstellung der Verfüllung einer Einlagerungsstrecke, nach Jobmann & Burlaka (2019)	20
Abbildung 4-5:	Abschlusswiderlager der Einlagerungsstrecke, nach Jobmann & Burlaka (2019)	20
Abbildung 4-6:	Schema der selektiven Rückholung aufbauend auf einem Schema der Einlagerung nach Ziegenhagen & Schmidt (2008)	24
Abbildung 4-7:	Vakuumschlauchheber im Detail (links) und am Säulenschwenkkran (rechts), nach Schmalz (2020)	29
Abbildung 4-8:	Universaltransportfahrzeug mit Kran und Ladefläche, Paus (2020a)	29
Abbildung 4-9:	Ausbau von Bentonitverfüllmaterial nach ca. 10 Jahren aus dem Opalinuston, Fries (2013)	31
Abbildung 4-10:	Muldenkipper Epiroc MT2200 mit Schubwand bis 10 m <sup>3</sup> , Epiroc (2020a)	31
Abbildung 4-11:	Muldenkipper Paus PMKS 12000 mit Schubwand für 14m <sup>3</sup> , Paus (2020b)	31
Abbildung 4-12:	Shuttlecar, ISO 19296 (2018)	32
Abbildung 4-13:	Tunnel-Lademaschine ITC 120N-F8 beim Freiladen der Strecke zwischen Behältern, ITC (2016)	32
Abbildung 4-14:	Schaufel mit spezieller Geometrie, Abiljo (2020)	33
Abbildung 4-15:	Schaufelboden aus Stahlketten, Thyssen (2020)	33
Abbildung 4-16:	Prinzipskizzen der Abstützung des Bentonitsockels von POLLUX®-Behältern mit einzelnen U-Blechen (links), einem Rahmen (mitte) oder zwei Winkelblechen (rechts)	34
Abbildung 4-17:	Sehr schmales Lade- und Transportfahrzeug PFL8, Paus (2020c)	35
Abbildung 4-18:	Tunnel-Lademaschine ITC 120N-F8 beim Freiladen eines POLLUX®-Behälters für die Rückholung aus der Einlagerungsstrecke, ITC (2016)	36
Abbildung 4-19:	Freilegen des POLLUX®-Behälters durch Lademaschine mit geändertem Ladetisch und Kompaktbagger nach ITC (2016) und Volvo (2020) sowie Übergabe auf PAUS Muldenkipper Paus (2020b)	36

Abbildung 4-20: Saugbagger mit Saugleitung und Behälter für mehrere Kubikmeter Aushub, MTS (2020)	37
Abbildung 4-21: Schema der Auffahrungsabschnitte im Querschlag	39
Abbildung 4-22: Draufsicht der Streckenlagerung stehender MOSAIK®-Behälter	46
Abbildung 4-23: Beraubefahrzeug PAUS 1253 S10 mit Hydraulikhammer, Paus (2020d)	47
Abbildung 4-24: Arbeitszeiten zur Entnahme (1) und zum Freilegen (2) eines POLLUX®-Behälter	51
Abbildung 4-25: Arbeitszeiten der Teilprozessschritte in MOSAIK®-ELS	52
Abbildung 4-26: Arbeitszeiten der Teilschritte zur Aufwältigung eines Querschlages	53
Abbildung 4-27: Arbeitszeiten zur Wiederauffahrung 400 m langer Bereiche in Richtstrecken	54
Abbildung 5-1: Schematische Darstellung des Verfüll- und Verschlusskonzeptes für das Konzept der multiplen ewG. Verschlussbauwerke: rot, Versatz: beige, ewG: blau (Bertrams et al., 2017)	57
Abbildung 5-2: Brennstabkokille für die Einlagerung im Rahmen der Option "multipler ewG", nach Jobmann & Burlaka (2019)	58
Abbildung 5-3: Einlagerungsbohrloch, Bohrlochverschluss und Versatz innerhalb der Bohrlochüberfahrungsstrecken in Seitenansicht Jobmann & Burlaka (2019)	59
Abbildung 5-4: Verfüllte Bohrlochüberfahrungsstrecke mit Abschlusswiderlager, Jobmann & Burlaka (2019)	60
Abbildung 5-5: Referenz-ewG, Jobmann & Burlaka (2019)	61
Abbildung 5-6: schematische Darstellung des Referenz ewG während der Auffahrung, alle Strecken sind dem ÜB (grün) zugeordnet die Verhiebsrichtung der Strecken ist entgegengesetzt zum Hauptwetterstrom	62
Abbildung 5-7: schematische Darstellung des Referenz ewG während des Einlagerungsbetriebes, die Grubenräume sind in einen KB (rot) und ÜB (grün) getrennt	62
Abbildung 5-8: Entwurf und Prototyp der Einlagerungsmaschine für BSK 3 Kokillen, Filbert et al. (2010)	66
Abbildung 5-9: Rechts: Skizze der wirkenden Kräfte ( $F_{Se}$ ) auf der Kokille während des Rückholverfahrens; Links: Darstellung des numerisches Modells in FLAC3D	67
Abbildung 5-10: Prinzippskizze der Pfahltheorie beim a) Druck und b) Zug Lastabtrag ohne Berücksichtigung des eigenen Gewicht vom Pfahl (Prinz & Strauß, 2018)	68
Abbildung 5-11: Prinzipskizze der aktiven Erddrucktheorie (Witt et al, 2017)	68
Abbildung 5-12: Tiefabhängiger Erddruckverlauf nach der Silotheorie (Ziegler, 2012)	68

Abbildung 5-13: Horizontaler Erddruck (durchgezogene Linien) und Silodruck (gepunktete Linien) auf der Kokillenwand in Abhängigkeit des Scherwinkels	69
Abbildung 5-14: Benötigte Kraft für die Rückholung einer Kokille in Abhängigkeit vom Scherwinkel der Sandfüllung	70
Abbildung 5-15: Geometrie des numerischen Modells für die Simulation des Rückholungsvorgangs	71
Abbildung 5-16: Vergleich der Erddruckverlauf, senkrecht auf der Kokillenoberfläche, aus der analytischen Lösung und numerische Berechnung	72
Abbildung 5-17: Numerisches Modell mit Interface-Elementen aus FLAC3D an der Kontaktfläche zwischen Kokille und Sandfüllung	72
Abbildung 5-18: Visualisierung des Zeitpunktes der komplette Befreiung der Kokille	73
Abbildung 5-19: Ziehekraft vs. Verschiebung am Kokillenkopf unter Variation des Scherwinkel von Sand	73
Abbildung 5-20: Schnittbild Saugvorrichtung im Bohrloch, (Herold et al., 2018)	74
Abbildung 5-21: Lockere (links) vs. dichte (rechts) Lagerung Abhängigkeit der Schubspannung und der Porenzahl $e$ zum Scherweg (Kolymbas, 2018)	75
Abbildung 5-22: Schematische Darstellung der Bildungsbereiche der wesentlichen Gesteinsgruppen in Abhängigkeit von Druck und Temperatur (Vinx 2015)	77
Abbildung 5-23: Deformation eines Quarzkorns durch Drucklösung (Okrusch & Matthes 2013)	77
Abbildung 5-24: links: Einbau der Asphaltsteine, mitte: Gebirgsschlitz mit Voranstrich und Asphaltstein, rechts: fertige Asphaltmauerung vor dem Einbau des Druckkissens, nach Knoll et al. (2010)	81
Abbildung 5-25: Schematische Darstellung des Grubengebäudes, (Bertrams et al., 2017)	84
Abbildung 5-26: Ideallisierte Verhältnisse in den Bohrlochüberfahrungsstrecken am Beispiel der Auffahrung als größter Wetterverbraucher, (Bertrams et al., 2017)	85
Abbildung 5-27: Modellaufbau und Beobachtungspunkte	86
Abbildung 5-28: Temperaturentwicklung um die versetzte und offene Bohrlochüberfahrungsstrecke während der ersten 75 Jahre nach Einlagerung	87
Abbildung 5-29: Temperaturentwicklung um die versetzte Bohrlochüberfahrungsstrecke und an den drei eingelagerten Kokkilen eines Bohrloches während der ersten 75 Jahre nach Einlagerung	88
Abbildung 5-30: Yalgou-Nomogramm zur Ermittlung der Effektivtemperatur nach Anlage 1 KlimaBergV (1983), (rot Wettergeschwindigkeit in der Modellstrecke)	89
Abbildung 5-31: Temperaturgrenzen übertragen auf das h-x-Diagramm und tolerierbare Gebirgstemperaturen unter den angenommenen Umgebungsbedingungen	91



Abbildung 5-32: Schematische Darstellung der Rückholungsreihenfolge in der Referenz-ewG-zelle	92
Abbildung 5-33: Visualisierung der Trockentemperaturen (pink stellt noch nicht errichtete Strecken dar), links: alle Lüfter hinter dem letzten aktiven Betriebspunkt, rechts: Lüfter sind in Reihe angeordnet	93
Abbildung 5-34: Trockentemperaturen im Vergleich, links: alle Lüfter hinter dem letzten aktiven Betriebspunkt, rechts: Lüfter sind in Reihe angeordnet	93
Abbildung 5-35: vorläufig, Vergleich Kühlwirkung mit zentraler Kühlung in den Hauptstrecken (links) und einzelnen Kühlern in den Bohrlochüberfahrungsstrecken (rechts) bei gleicher Gesamtkühlleistung	94
Abbildung 6-1. Konfiguration zur Einlagerung gemäß dem modifizierten KBS3 Konzept, (Jobmann & Burlaka, 2019)	96
Abbildung 6-2: links: Illustration des Aufbaus des Kanister Rückholungstests der SKB, rechts: Geometrie und Komponenten des Versuchs, nach (Kristensson and Börgesson 2015)	99
Abbildung 6-3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus, nach (Kristensson & Börgesson, 2015)	100
Abbildung 6-4: links: Detailzeichnung der Ausrüstung im Bohrloch, rechts: Foto der Vorrichtung mit Düsen, Mixern und Pumpen, nach (Kristensson & Börgesson, 2015)	101
Abbildung 6-5: Versuchsaufbau, nach Nirvin (2007)	102
Abbildung 6-6: Einlagerungskonzept Japan (Toguri et al., 2010)	104
Abbildung 6-7: Schematische Darstellung des schrittweisen Verschlusskonzepts, (NUMO 2013)	105
Abbildung 6-8: Schematische Darstellung des Konzepts für Rückholbarkeit und Beobachtung sowie Monitoring, (NUMO, 2013)	106
Abbildung 6-9: Blick ins Testbohrloch (RWMC, 2019)	107
Abbildung 6-10: Spülprozess (RWMC, 2019)	107
Abbildung 6-11: Zeitbedarf bei der Entfernung des Bentonitpuffers im insito-Versuch, nach Imai et al. (2018)	108
Abbildung 6-12: Übersicht der theoretisch möglichen Verfahren zur Entnahme des Buffers	115
Abbildung 6-13: links: Maximale Deviatorspannung als Funktion der Trockendichte nach (Dueck et al., 2011), rechts: Maximale Deviatorspannung als Funktion der Porenzahl, (Karnland et al., 2009)	119
Abbildung 6-14: BAUER BG 12 H – Low Headroom Version – außer Produktion, (Bauer, 2020)	120
Abbildung 6-15: Doppelter Bohrstrang zur Zentrierung des Halteknopfes und zum Freilegen des Behälters	121

Abbildung 6-16: Reinigungsbuchse	121
Abbildung 6-17: Drehrohr am Saugstutzen eines Saugbaggers (STW, 2020)	122
Abbildung 6-18: Querschnitte im Vergleich, links: RESUS K1 (multipler ewG nach GRS (2020)) und Bertrams et al. (2017), rechts: RESUS K4 (modifiziertes KBS-3 nach GRS (2020)) sowie Bertrams et al. (2021) und Jobmann et al. (2020)	124
Abbildung 6-19: Temperaturentwicklung innerhalb der versetzten Bohrlochüberfahrungsstrecke im Vergleich zum Einlagerungskonzept „multipler ewG“	125
Abbildung 6-20: vorläufig, erwartete Effektivtemperaturen in einer Bohrlochüberfahrungsstrecke als Funktion der umgebenden Gebirgstemperatur	126
Abbildung 6-21: vorläufig, Einfluss des zusätzlichen Feuchteintrags auf die Effektivtemperatur	126

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Endlagerkonzepte im Kristallin und ihre passiven Sicherheitsbarrieren (in grau: Versatz, der nicht wesentlich am sicheren Einschluss in der Nachbetriebs-phase mitwirkt)	11
Tabelle 4-1:	Empfohlener Streckenausbau nach Q-System, nach Bertrams et al. (2017)	15
Tabelle 4-2:	Thermische und gebirgsmechanische Mindestabstände bei der Einlagerung	19
Tabelle 4-3:	Szenarien für die selektive Rückholung beim üewG und gemäß NEA (2011)	23
Tabelle 4-4:	Überblick der identifizierten Prozess- und Prozessteilschritte die zur Rückholung nötig sind	27
Tabelle 4-5:	Gliederung der Prozessteilschritte bei der Rückholung von MOSAIK®- Behältern	43
Tabelle 4-6:	Arbeitszeiten der Prozessschritte für die Rückholung von POLLUX®- Behältern	50
Tabelle 4-7:	Arbeitszeiten der Prozessschritte innerhalb der POLLUX®-ELS	51
Tabelle 4-8:	Arbeitszeiten der Prozessschritte innerhalb der MOSAIK®-ELS	52
Tabelle 4-9:	Arbeitszeiten der Prozessschritte innerhalb eines Querschlages	53
Tabelle 4-10:	Arbeitszeiten der Prozessschritte innerhalb der Richtstrecken	53
Tabelle 5-1:	Szenarien für die selektive Rückholung beim Konzept multipler ewG und gemäß NEA (2011)	65
Tabelle 5-2:	Materialeigenschaften für die numerische Simulation	71
Tabelle 5-3:	Tabellarische Beziehung zur Ableitung des Scherwinkels und des dränierten Young's Modul $E'$ von Quarzsand	76
Tabelle 6-1:	Rückholungszeitpunkte und erwartete Umgebungsbedingungen im schwedischen Endlagerkonzept	98
Tabelle 6-2:	Szenarien für die selektive Rückholung beim modifizierten KBS-3 Konzept, NEA (2011)	111

## **Abkürzungsverzeichnis**

ELS	Einlagerungsstrecke
ELV	Einlagerungsvorrichtung
ewB	einschlusswirksame Barriere
ewG	einschlusswirksamer Gebirgsbereich
LTF	Lade- und Transportfahrzeug
mELVIS	modifizierte Einlagerungsvorrichtung in Strecken
mewG	multipler einschlusswirksamer Gebirgsbereich
üewG	überlagernder einschlusswirksamer Gebirgsbereich







**BGE TECHNOLOGY GmbH**

**Eschenstraße 55**

**31224 Peine – Germany**

**T + 49 5171 43-1520**

**F + 49 5171 43-1506**

**[info@bge-technology.de](mailto:info@bge-technology.de)**

**[www.bge-technology.de](http://www.bge-technology.de)**