



BGE TECHNOLOGY GmbH

ERNESTA

Technische Konzepte für die Rückholung der
Einlagerungsvariante horizontale Streckenlagerung
in Tongesteinsformationen

BGE TEC 2018-10

ERNESTA

Technische Konzepte für die Rückholung der Einlagerungsvariante horizontale Streckenlagerung in Tongesteinsformationen

BGE TEC 2018-10

| | |
|-----------|---|
| Autor(en) | Philipp Herold Niklas Bertrams Sabine Prignitz Eric Simo Kuate |
|-----------|---|

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

| | |
|--------------|------|
| Auftraggeber | PTKA |
|--------------|------|

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

Dieser Bericht wurde erstellt im Rahmen des FuE-Projektes

"Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen"

(ERNESTA)

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



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



PTKA
Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Rückholungsstrategie | 2 |
| 3 | Einlagerungskonzept | 7 |
| 4 | Rückholungskonzept | 11 |
| 4.1 | Neuauffahrung bereits verüllter Strecken | 12 |
| 4.1.1 | Umgang mit dem Ausbau | 13 |
| 4.1.2 | Umgang mit den Verschlussbauwerken | 15 |
| 4.2 | Zugang zu den Behältern | 16 |
| 4.3 | Freilegen und Entnahme der Behälter | 21 |
| 4.4 | Entnahme des Behälters | 24 |
| 4.5 | Aspekte des Strahlenschutzes | 26 |
| 4.6 | Lagebestimmung der Behälter | 28 |
| 4.7 | Wettertechnik und Klimavorausberechnung | 31 |
| 4.7.1 | Bewetterungskonzept | 31 |
| 4.7.2 | Randbedingungen | 33 |
| 4.7.3 | Modelle | 42 |
| 4.7.4 | Schlussfolgerungen aus der Klimavorausberechnung | 48 |
| 4.8 | Umgang mit dem geräumten Endlager | 49 |
| 5 | Zeit- und Kostenschätzung | 50 |
| 5.1 | Zeitschätzung | 52 |
| 5.2 | Kostenschätzung | 54 |
| 6 | Zusammenfassung | 56 |
| | Quellenverzeichnis | 58 |
| | Abbildungsverzeichnis | 60 |
| | Tabellenverzeichnis | 62 |

1 Einleitung

Die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in tiefen geologischen Formationen stellt in Deutschland und vielen 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 und damit langfristig eine wartungs- und nachsorgefreie Endlagerung.

Während der Erkundung, Planung, Genehmigung, Errichtung, Betrieb und auch dem Verschluss eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen soll der Planungsgrundsatz der Reversibilität von Entscheidungen die Möglichkeit geben, auf veränderte Bedingungen oder Entwicklungen zu reagieren und getroffene Entscheidungen zu korrigieren. Während der Betriebszeit des Endlagers wird die Reversibilität von Entscheidungen durch eine Rückholbarkeit der Abfälle gewährleistet. Die Anforderung der Rückholbarkeit ist heute in Deutschland Genehmigungsvoraussetzung für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente. Mit der Rückholungsoption besteht die Möglichkeit die eingelagerten Behälter aus der passiven Sicherheit des Gebirges wieder zu entfernen und zurück in die menschliche Obhut zu überführen.

Im Rahmen des FuE-Vorhabens "Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen" (ERNESTA) werden bestehende Rückholungskonzepte für die Einlagerungskonzepte der horizontalen Streckenlagerung und vertikalen Bohrlochlagerung in den Wirtsgesteinen Salz und Tongestein weiterentwickelt. Mit dem vorliegenden Teilbericht werden die Arbeiten zur Vertiefung des Planungsstandes zu den Rückholungskonzepten für die Einlagerungsvariante der horizontalen Streckenlagerung im Tongestein zusammengefasst.

2 Rückholungsstrategie

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

Das Für und Wider der Rückholbarkeit umfasst ein weites Spektrum an 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 das zukünftig Fehler festgestellt werden oder aber ein alternativer Umgang bzw. eine alternative Nutzung der eigenlagerten Abfälle und ausgedienten Brennelemente angestrebt wird. Die Rückholbarkeit würde dem Jahrzehnte dauernden Prozess der Endlagerung zusätzliche Flexibilität verleihen und würde auch der nachfolgenden Generation eine gewisse Handlungsfreiheit einräumen. Die Beurteilung zur Notwendigkeit einer Rückholung obliegt dieser zukünftigen Generation. Aus der Handlungsoption erwächst allerdings auch die Möglichkeit eines Missbrauchs. Die Sicherstellung der Kernmaterialüberwachung und Vermeidung einer Proliferation wird mit der Rückholbarkeit erschwert. Die Rückholbarkeit kann auch die betriebliche Sicherheit sowie die Langzeitsicherheit des Endlagers beeinflussen. Damit wäre letztlich auch das primäre Schutzziel des Endlagers beeinträchtigt und somit auch die Erbringung eines Sicherheitsnachweis 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 entwickelt sich in den letzten Jahren mehr und mehr der gesellschaftliche Konsens, dass eine Rückholbarkeit der eingelagerten Behälter in die Endlagerkonzeption mit aufgenommen werden sollte. Diese Meinung wird in der Novellierung des "Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle" (StandAG, 2017) und den "Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle" (BMU, 2010) herausgegeben vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit am 30. September 2010 untermauert. Die Endlagerung mit Rückholungsoption stellt die Vorzugsvariante für den Umgang mit wärmeentwickelnden hochradioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen in Deutschland dar.

Die Sicherheitsanforderungen des BMU ersetzen die früheren Sicherheitskriterien aus dem Jahr 1983. Mit den neuen Sicherheitsanforderungen wird festgelegt, welches Sicherheitsniveau für ein solches Endlager nachweislich einzuhalten ist. Über die Festlegung von Auslegungsanforderungen wird in Deutschland erstmals auch die Rückholbarkeit der Behälter "in der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen..." (BMU, 2010) fest vorgeschrieben. Die Sicherheitsanforderungen des BMU sind für den Antragsteller bei allen wesentlichen Teilschritten zur Planung, Errichtung, Betrieb und Stilllegung eines Endlagers und für die Genehmigungsbehörden bei der Planfeststellung bindend. Die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen des BMU bildet somit eine Genehmigungsvoraussetzung. Dritte, die auf eine Genehmigungsfähigkeit hinarbeiten, müssen diese berücksichtigen. (BMU, 2010)

Die Sicherheitsanforderungen des BMU lassen sich rechtlich nicht eindeutig einordnen, entsprechen aber einer das Atomgesetz konkretisierende Verwaltungsvorschrift zur Feststellung der Genehmigungsfähigkeit. Aus dieser rechtlichen Einordnung folgt, dass alle Maßnahmen zur „... Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage...“ (§ 7 II Nr. 3 AtG) getroffen werden, dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen müssen. Dementsprechend müssen auch „geplanten technischen Maßnahmen“ (BMU, 2010) zur Gewährleistung einer Rückholbarkeit den Stand von Wissenschaft und Technik einhalten. Dies ist nachzuweisen.

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

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

Aus den Definitionen und ergänzenden Vorgaben wird deutlich, dass die Rückholbarkeit während der Betriebszeit nicht allein die Einlagerungsphase umfasst. Auch der Zeitraum des Versatzes der Einlagerungsbereiche und die Verfüllung aller Strecken müssen in die Überlegungen zur Rückholbarkeit eingezogen werden. In Abbildung 2-1 erfolgt die Zuordnung der Rückholbarkeit zu den typischen Entwicklungsstufen eines Endlagers. Mit dieser Zuordnung wird auch der Begriff der Bergung aufgegriffen. Bergung als Notfallmaßnahme und weitere Sonderform der Reversibilität umfasst die Entnahme der Behälter aus dem bereits verschlossenen Endlager und ist nach (BMU, 2010) auf 500 Jahre nach dem Verschluss begrenzt. Alle weiteren zukünftigen Entwicklungen sind von Überlegungen zur Reversibilität ausgenommen.

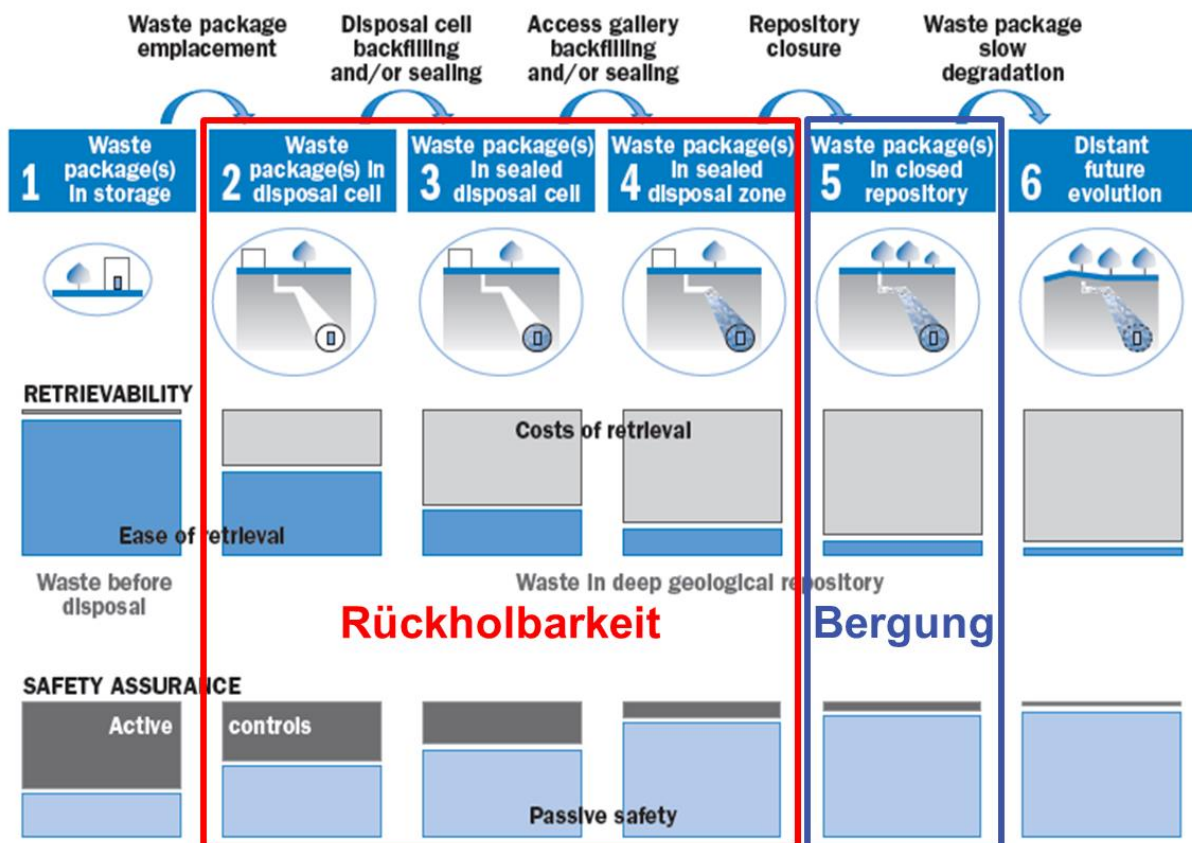


Abbildung 2-1: Typische Entwicklungsstufen eines Endlagers und Zuordnung der Rückholbarkeit und Bergung, nach (NEA, 2011)

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

bereitgenannten Auslegungsanforderungen entsprechen und damit im Widerspruch zu (BMU, 2010) stehen.

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

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

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

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

Die Anforderung Durchörterungen des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches zu minimieren (BMU, 2010) zielt auf Schutz des ewG und die langfristige Erhaltung der Barrierefunktion des Wirtsgesteins ab. Mit der Entnahme aller Behälter aus dem Endlager ist die Einhaltung

dieses Minimierungsgebotes zum Schutz des ewG nicht zwingend notwendig. Gleichwohl werden die Sicherheitsabstände entsprechend der geltenden bergbehördlichen Vorgaben eingehalten.

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

3 Einlagerungskonzept

Die Einlagerung von POLLUX®-3-Behältern in horizontale Strecken innerhalb einer Tongesteinsformation basiert auf dem Einlagerungskonzept der horizontalen Streckenlagerung im Salz und wurde für die Endlagerung in geringmächtigen Tongesteinsformationen weiterentwickelt. (DBE TEC, 2010) (Jobmann & Lommerzheim, 2016)

Das Behälterkonzept des POLLUX®-3 entspricht einem verkleinerten POLLUX®-10 Behälter. Der Aufbau ist grundsätzlich gleich. Unterschiede bestehen in den Abmessungen und Massen. Der POLLUX® 3-Behälter besteht aus einem Innen- und einem Außenbehälter. Der Innenbehälter hat eine Wandstärke von 160 mm und wird durch einen geschraubten Primärdeckel und einen geschweißten Sekundärdeckel dicht verschlossen. Der äußere Abschirmbehälter hat eine Wandstärke von ca. 270 mm und wird mit einem verschraubten Außendeckel verschlossen. Im Mantel sind in radial verteilten Bohrungen Stäbe aus Polyethylen zur Neutronenmoderation eingesetzt. Der Außendurchmesser des Behälters wird mit 1.200 mm und die Länge mit 5.460 mm angenommen (Abbildung 3-1). Die Masse beträgt etwa 38 t. (DBE TEC, 2010)

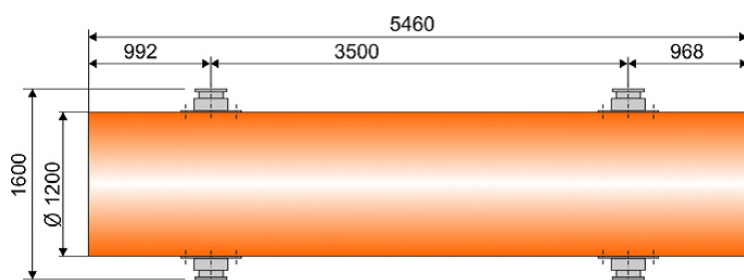


Abbildung 3-1: Abmessungen POLLUX®-3 (DBE TEC, 2010)

Der Innenraum des POLLUX® 3-BE ist in 5 Kammern unterteilt, in die je eine Brennstab-
büchse mit den gezogenen Brennstäben der Brennelemente eingesetzt wird. Der POLLUX®-
3-BE kann die Brennstäbe von bis zu 3 DWR-BE (entsprechend 9 SWR-BE oder 7,5
WWER-BE) aufnehmen. Der Innenraum des Behälters kann auch hochaktive Abfälle aus der
Wiederaufarbeitung (CSD-V) aufnehmen. Für schwach wärmeentwickelnde bzw. schwach-
und mittlradioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (CSD-C, CSD-B) sowie Strukturtei-
le aus der Brennelement-Konditionierung werden andere Behältertypen für die Endlagerung
vorgesehen. Diese sind im Einzelnen:

| | |
|-----------------|--|
| POLLUX®-3-BE | für Brennelemente aus Leistungsreaktoren |
| POLLUX®-3-CSD-V | für HAW-Abfälle aus Wiederaufarbeitung |
| POLLUX®-9 | für schwach wärmeentwickelnde, schwach- und mittlradioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (CSD-C, CSD-B) |
| MOSAİK® | für Strukturteile aus der Brennelement-Konditionierung |

Das Einlagerungskonzept der horizontalen Streckenlagerung wurde in (Jobmann & Lommerzheim, 2016) für die Konzeption eines Endlagers innerhalb der Referenzmodell SÜD genutzt. Das Wirtgestein in der Referenzregion SÜD ist der Opalinus-Ton, der Mächtigkeiten von 100 m bis 130 m aufweist (Reinhold et al. 2014). Die Einlagerungssohle befindet sich ca. 670 m unter GOK. Das Endlagerkonzept sieht als Zugang zum Grubengebäude zwei ca. 690 m

tiefe Schächte (incl. ca. 20 m Schachtsumpf) vor: ein Schacht für den Gebindettransport und als ausziehender Wetterschacht sowie ein Schacht für die konventionelle Förderung und als einziehender Wetterschacht. Das Grubengebäude besteht aus einem schachtnahen Infrastrukturbereich und zwei Einlagerungsbereichen (einer für ausgediente Brennelemente und einer für Wiederaufarbeitungsabfälle), die durch Richtstrecken mit den Schächten verbunden sind. Der Zugang von den Richtstrecken zu den Einlagerungsfeldern erfolgt über Querschläge, siehe Abbildung 3-2. Die Einlagerungsstrecken für Brennelemente und Wiederaufarbeitungsabfälle zweigen von den Querschlägen ab, sind als Blindstrecken aufgeführt und haben eine Streckenlänge von 400 m. (Jobmann & Lommerzheim, 2016)

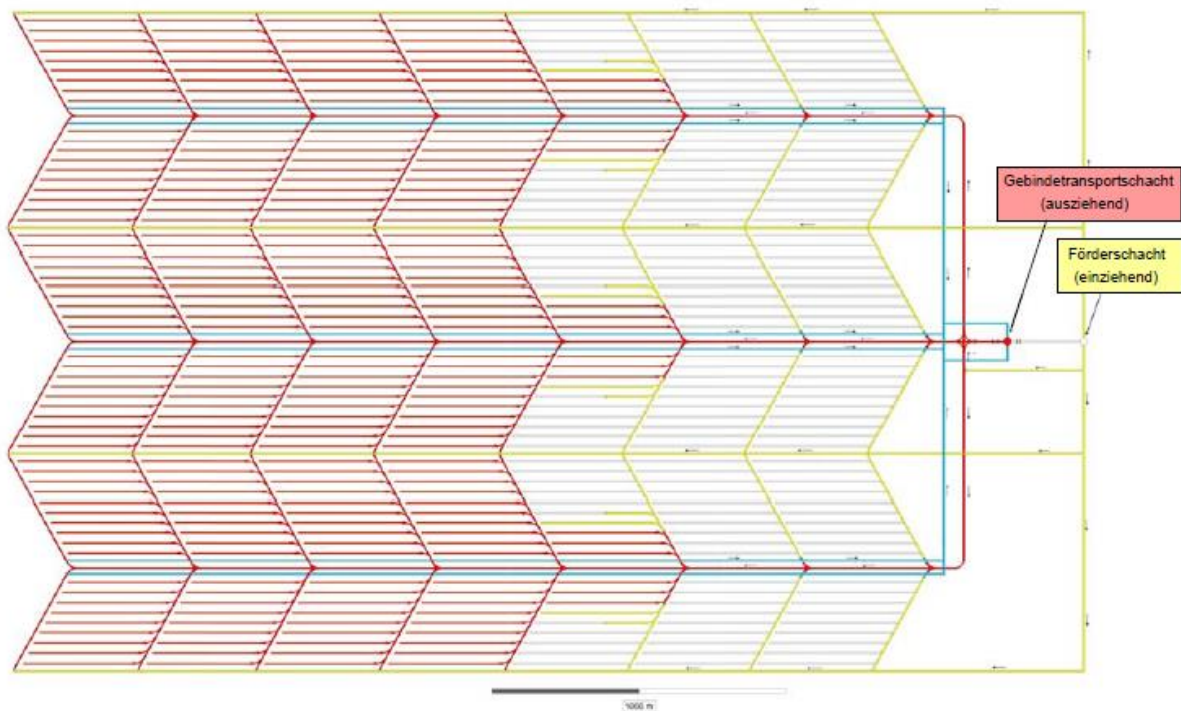


Abbildung 3-2: Ausschnitt des Grubengebäudes für die Streckenlagerung von POLLUX®-3 Behältern (DBE TEC, 2010)

Die Einlagerung der POLLUX®-Behälter für ausgediente Brennelemente erfolgt in 48 Einlagerungsfeldern mit je 9 Einlagerungsstrecken (+ 1 Feld mit 7 Strecken) im Westflügel des Endlagers und 13 Einlagerungsfeldern mit je 9 Einlagerungsstrecken (+1 Feld mit 4 Strecken und 1 Feld mit 3 Strecken) im Ostflügel des Endlagers (für Wiederaufarbeitungsabfälle). Im Westflügel wird zusätzlich eine Einlagerungskammer mit MOSAIK®-Behältern befüllt, die Brennelement-Strukturteile aus der Brennelement-Konditionierung enthalten. (Jobmann & Lommerzheim, 2016)

In den Einlagerungsstrecken werden die Behälter entsprechend einer hexagonalen Anordnung versetzt positioniert, so dass die Strecken abwechselnd 17 und 16 POLLUX-Behälter enthalten. Für die Einlagerungsstrecken wird auf Basis der Behältergeometrie und vergleichbaren Einlagerungskonzepten aus (DBETEC, 2010) ein freier Streckenquerschnitt von ca. 23 m² angenommen. Der Ausbruchsquerschnitt der Einlagerungsstrecken wird in Abhängig-

keit des erforderlichen Ausbaus auf bis zu 28 m² geschätzt. Das Querschnittsprofil wurde noch nicht näher definiert. Neben der Einlagerungstechnik wird auch der benötigte Streckenausbau einen wesentlichen Einfluss auf die Gestaltung des Streckenquerschnitts haben.

Mittels indikativer thermischer Berechnungen wurde für die wärmeentwickelnden Abfälle ein Behälterabstand von 23 m bei einem Streckenmittenabstand von 20 m ermittelt, siehe Abbildung 3-3. Es erfolgte bisher keine Optimierung des Endlagerdesigns hinsichtlich der Packungsdichte aller Behälter, der Streckenabstände, der Beladung der Behälter und damit ihrer Wärmeleistung sowie optimaler Zwischenlagerzeiten einzelner Behältertypen. (Jobmann & Lommerzheim, 2016)

Alle POLLUX®-Behälter werden auf einem Sockel aus vorgefertigten, kompaktierten Ton abgelegt. Die Einlagerung erfolgt gleisgebunden. Der verbleibende freie Streckenquerschnitt wird im Anschluss an die Einlagerung mit einem Granulat aus aufbereitetem Tongestein aus der Auffahrung versetzt. Einlagerung und Versatz erfolgen dabei stets im Wechsel.

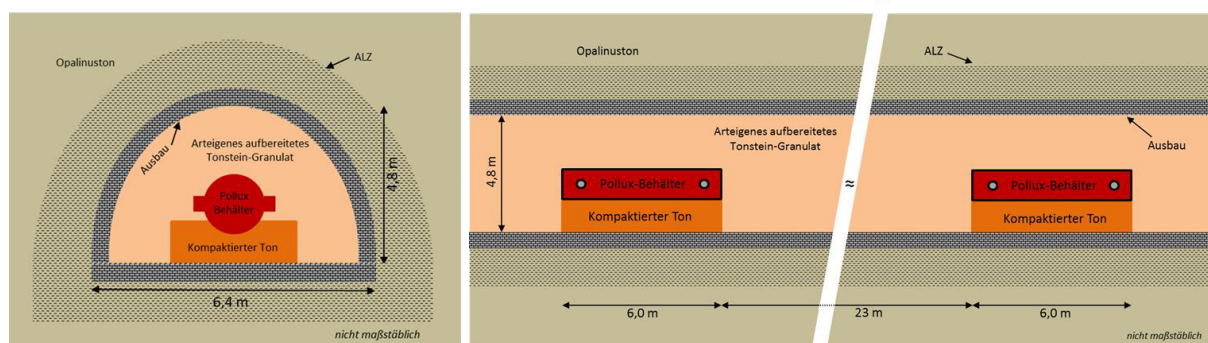


Abbildung 3-3: Schematische Darstellung des Streckenlagerungskonzeptes für Wiederaufarbeitungsabfälle und ausgediente Brennelemente. Rechts: Längsschnitt durch eine Einlagerungstrecke. Links: Querschnitt durch eine Einlagerungstrecke, nicht maßstäblich (DBE TEC 2016)

Zur Gewährleistung der Betriebssicherheit müssen alle Grubenräume durch einen Ausbau gesichert werden. Die jeweilige Ausführung des Ausbaus richtet sich u.a. nach der Nutzungsdauer der Grubenteile. Zur Vermeidung zusätzlicher Gasentwicklungen soll auf den Einsatz von eisenhaltigen Materialien wie zum Beispiel Stahl als Ausbaumaterial möglichst verzichtet werden. In langlebigen Grubenbauten (z.B.: Gebindetransportstrecken) wird der Einsatz eines mehrschaligen Betonausbaus favorisiert. Für die Einlagerungstrecken ist aufgrund der relativ kurzen Offenstandszeiten (kleiner ein Jahr) und geringen Querschnitte zu prüfen, ob ein mehrschaliger Betonausbau erforderlich ist oder ob hier ein Anker/Spritzbeton-Verbundausbau mit entsprechender Armierung ausreicht. Vorläufige Ausbaudimensionierungen im vergleichbaren Schweizer Einlagerungskonzept (NARGA, 2002) zeigen, dass dies aus gebirgsmechanischer Sicht möglich ist.

Die vollständig versetzten Einlagerungstrecken werden nicht gesondert verschlossen. Erst in den Zugangstrecken/Querschlägen werden zwischen den Hauptstrecken und den Einlagerungstrecken sogenannte Migrationssperren errichtet. Die Querschläge werden, wie auch die Einlagerungs- und Hauptstrecken, mit einem arteigenen, aufbereitetem Tongesteinsgra-

nulat versetzt. Zum Infrastrukturbereich hin werden zusätzliche Streckenverschlüsse errichtet.

4 Rückholungskonzept

Die Rückholbarkeit der Abfälle und ausgedienten Brennelemente muss während der Betriebszeit gewährleistet sein. Die Betriebszeit des Endlagers umfasst den Zeitraum vom Betriebsbeginn (Einlagerung des ersten Behälters) bis zum Betriebsende (dem Verschluss der Strecken). Vorlaufende Arbeiten, wie die Errichtung des Endlagerbergwerkes oder anschließende Prozesse wie der Verschluss der Schächte gehören nicht zur Betriebszeit. Als abdeckendes Szenario wird angenommen, dass zu Beginn der Rückholung alle Einlagerungs- und Zugangsstrecken versetzt und die Streckenverschlüsse bereits errichtet sind. Das verbleibende Grubengebäude umfasst lediglich die Tageszugänge und einige wenige Grubenbaue des Infrastrukturbereiches.

Die Möglichkeit einer Rückholung der Behälter darf die Langzeitsicherheit des Endlagers nicht beeinträchtigen, die Anzahl offener Einlagerungsbereiche ist gering zu halten und die Durchörterung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit Schächten, Auffahrungen oder Bohrungen ist zu minimieren. Zur Einhaltung dieser wesentlichen Auslegungsanforderungen wurde in (DBE TEC, 2014) ein grundlegendes Rückholungskonzept, basierend auf einem als „Re-Mining-Strategie“ bezeichnetes Vorgehen erarbeitet. Dies umfasst die planmäßige Einlagerung der Endlagerbehälter sowie deren Versatz und den Verschluss der Strecken, entsprechend dem Endlagerkonzept. Im Falle einer Entscheidung zur Rückholung müssen die Endlagerbehälter dann durch bergbauliche Tätigkeiten wieder freigelegt und unter Einhaltung betrieblicher und strahlenschutztechnischer Belange aus dem Endlager entfernt werden. Konkret umfasst dies die vollständige Neuauffahrung des Grubengebäudes. Mit dem Beschluss zur Rückholung werden alle benötigten Strecken wieder neu aufgefahren. Die Rückholung der Abfälle erfolgt in umgekehrter Reihenfolge zur Einlagerung.

Die Rückholung beginnt nach der Einlagerung aller Behälter und dem Versatz bzw. der Verfüllung der Strecken. In Anlehnung an die drei Hauptprozesse des Einlagerungsbetriebes – Einlagerung, Versatz, Verfüllung – wird der Rückholungsprozess in die drei wesentlichen Teilschritte Neuauffahrung, Freilegen der Behälter und Behälter Entnahme unterteilt, siehe Abbildung 4-1. Die geplante Umsetzung der Teilschritte wird in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

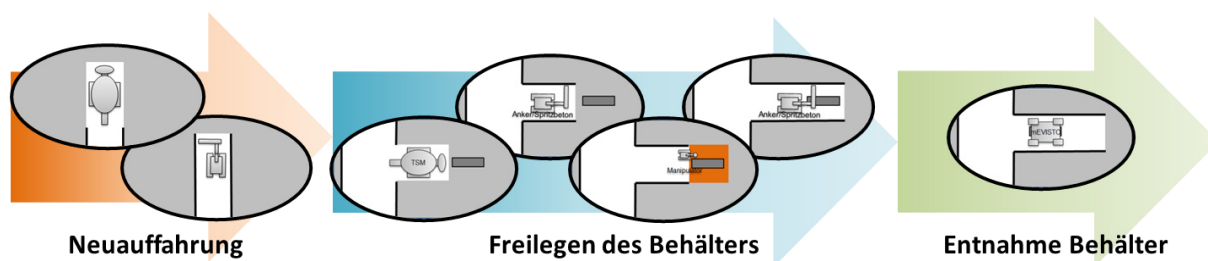


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des Rückholungsablaufes

4.1 Neuauffahrung bereits verfüllter Strecken

Die betrachtete spätestmögliche Rückholung umfasst die Neuauffahrung aller verfüllten Strecken. Die Neuauffahrung soll entlang des alten Streckenverlaufs erfolgen. Die erneute Auffahrung unterscheidet sich deutlich von den Tätigkeiten während des Einlagerungsbetriebes. Die Neuauffahrung hat zum Ziel, den Versatz aus dem Streckenquerschnitt zu entfernen und parallel dazu die Stabilität des Hohlraums wieder herzustellen. Neben den Gebirgseigenschaften sind auch die geomechanischen Eigenschaften des Versatzes und des Ausbaus zu beachten.

Die Neuauffahrung im Rückholungsbetrieb entspricht einer Aufwältigung der alten, bereits verfüllten Strecken. Die Entnahme des Versatzkörpers bildet den wesentlichen Teil der Neuauffahrung. Nach (Zhang, 2014) lässt sich ein Versatzmaterial aus geschnittenem Haufwerk mit einer Kohäsion $c = 3,7 \text{ MPa}$ und einem inneren Reibungswinkel $\varphi = 12^\circ$ bzw. einer einaxialen Druckfestigkeit von ca. 9 MPa mechanisch charakterisieren. Tongesteine im Allgemeinen und auch das potenzielle Wirtsgestein am des Referenzstandort SÜD ist mäßig fest und gebrächtig. Die mittlere einaxiale Druckfestigkeit senkrecht zur Schichtung liegt nach (Jahn, 2015) bei ca. $30,3 \text{ MPa} \pm 6,6 \text{ MPa}$. Die Auffahrung der Strecken erfolgt gebirgsschonend mit TSM. Wie bereits erläutert ist ein regelmäßiger Ausbau der Strecken unerlässlich. In Grubenbauen mit langen Lebensdauern ist im aktuellen Endlagerkonzept der Einbau eines mehrschaligen Betonausbaus vorgesehen. Bei einem solchen Betonausbau sind einaxiale Druckfestigkeiten von ca. 50 MPa und größer zu erwarten. Die eingesetzte Vortriebs-technik muss für diese Einsatzbedingungen mit starkschwankenden Festigkeiten geeignet sein.

Für die Neuauffahrung von Grubenräumen kann die Vortriebstechnik (TSM) analog zu Einlagerungsbetrieb genutzt werden. Zur Fräsbarkeit des Gebirges sollten zu diesem Zeitpunkt ausreichende Erfahrungen zur Auswahl der geeigneten Vortriebstechnik vorliegen. Für die Aufwältigung verfüllter Strecken scheinen TSM dagegen deutlich ungeeigneter. Der zeitgleiche Verhieb von Versatz, Ausbau und ggf. Gebirge entspricht einer Wechsellagerung an der Ortsbrust. An einer TSM steht eine definierte Energiemenge für den Vortrieb zur Verfügung. Eine Erhöhung ist nicht ohne weiteres möglich. Je nach Verhältnis der verschiedenen Materialien sind so stark schwankende Vortriebsleistungen zu erwarten. Zusätzlich sind TSM für die Entnahme des weichen und ggf. stark gesättigten Versatz ungeeignet. In Versatzbereichen mit hohen Wassergehalten ist ein Verkleben des Schneidkopfes mit entsprechendem Rückgang der Schneidleistung zu erwarten. Zusätzlich kann auch der Abtransport des Haufwerks über den Ladetisch und Ausleger der TSM durch ein Verkleben des Versatzes erschwert werden.

Für die Aufwältigung der verfüllten Strecken wird der Einsatz von Tunnelbaggern als Vorzugsvariante definiert, siehe Abbildung 4-2. Tunnelbagger sind in der Lage den weichen Versatz zu entnehmen, können den gesamten Streckenquerschnitt abdecken und sind reagieren weniger sensibel auf den Feuchtegehalt des Versatzes. Das Werkzeug der Tunnelbagger kann über Schnellwechselvorrichtungen zügig und unkompliziert getauscht werden. Schaufel zur Versatzentnahme können gegen Hydraulikhämmer oder auch Schneidköpfe getauscht werden. Dies erlaubt eine schnelle Anpassung an wechselnde Bedingungen wäh-

rend des Vortriebes. So können beispielsweise auch verbrochene Partien des Ausbaus gewonnen oder Teile des Ausbaus vorbereitend zur Ertüchtigung entnommen werden.



Abbildung 4-2: Mögliche Vortriebs-technik für die Neuauffahrung und Aufwältigung bereits verfüllter Strecken

Das gelöste Haufwerk wird von den Tunnelbaggern direkt auf einen Fahrlader oder aber Kippfahrzeug/Schiebekastenwagen geladen. Diese fördern das Haufwerk bis zur Kippstelle und Bandanlage oder aber direkt zum Bunker.

Bei allen eingesetzten Maschinen ist darauf zu achten, dass ihre Konstruktionen neben dem bergbehördlichen Regelwerk auch dem kerntechnischen Regelwerk entsprechen. Während des Rückholungsbetriebes finden die Vortriebstätigkeiten zwangsläufig auch im KB statt. Besondere Aufmerksamkeit ist dabei der Sicherheit des Betriebspersonals zu widmen. Zur Vermeidung von Strahlenbelastungen und Kontaminationen des Personals sind ggf. Anpassungen einzelner Komponenten bzw. eine Weiterentwicklung der Geräte notwendig. So sind beispielsweise Fahrerkabinen und Steuerstände der Maschinen mit klimatisierten und abgeschirmten Kabinen auszustatten. Eine stetige radiologische Überwachung der Vortriebsarbeiten ist unerlässlich. Dazu zählen regelmäßige Beprobung des Haufwerks, Abluftüberwachung, Messungen der Ortsdosisleistung sowie persönliche Dosimeter.

4.1.1 Umgang mit dem Ausbau

Für die Dimensionierung des Ausbaus, ist zu evaluieren welche zusätzlichen Anforderungen aus der Rückholbarkeit an diesen gestellt werden. Der Ausbau eines Grubenbaus wird **für die Betriebszeit der Einlagerung ausgelegt**. Bei einer spätesten möglichen Entscheidung zur Rückholung, also gegen Ende der Betriebszeit, ist nicht davon auszugehen, dass der Ausbau noch ausreichend tragfähig ist. Gleich wohl ist eine Resttragfähigkeit zu erwarten. Die Neuauffahrung entspricht im Wesentlichen der Entnahme des Versatzes. Parallel dazu ist der Zustand des Ausbaus zu prüfen und dieser instand zu setzen bzw. zu ertüchtigen. In diesem Zusammenhang umfasst der Begriff **Instandsetzung** gemäß DIN 31051, 4.1.4 Maßnahmen zur Wiederherstellung des ursprünglichen bzw. eigentlichen Zustands (Sollzustand). Dies bedeutet, der Ausbau erfüllt nach der Instandsetzung alle betrieblichen Anforderungen. Die Instandsetzungsarbeiten umfassen begrenzt die Entnahme geschädigter Bereiche des Ausbaus. Eine gesonderte Vortriebstechnik ist dafür nicht nötig. Die vorgesehenen TSM oder auch Tunnelbagger sind geeignet. Dies kann zu deutlich variierenden Vortriebleistungen führen.

Die Dimensionierung des Ausbaus ist von den Nutzungsanforderungen, dem jeweiligen Strahlenschutzbereich und der Offenstandszeit abhängig. Für langlebige Grubenbaue, wie Hauptstrecken, deckt eine Ausbaudimensionierung über die Dauer des Einlagerungsbetriebes alle Rückholungsentscheidungen bis etwa zur Hälfte der Betriebszeit ab. In diesem Fall wäre die Betriebszeit Einlagerung plus die Betriebszeit Rückholung kleiner als die ursprünglich geplante Betriebszeit Einlagerung und damit kleiner als der Auslegungszeitraum des Ausbaus dieser Grubenräume. Für kurzlebige Grubenbaue, wie die Querschläge (wenige Jahre) oder die Einlagerungsstrecken (einige Monate) gilt dies nicht. Im Folgenden sollen für den Ausbau er unterschiedlichen Grubenräume Mindestanforderungen zur Erleichterung der Rückholbarkeit entwickelt werden. Im Rahmen der Neuauffahrung sind davon betroffen:

- Grubenräume im Überwachungsbereich des Infrastrukturbereichs
- Grubenräume im Kontrollbereich des Infrastrukturbereichs
- Richtstrecken mit der Funktion als Frischwetterstrecken im Überwachungsbereich
- Richtstrecken mit der Funktion als Abwetterstrecken im Kontrollbereich
- Richtstrecken mit der Funktion als Gebindetransportstrecken im Kontrollbereich
- Querschläge im Kontrollbereich

Parallel zur Wiederauffahrung der Strecken ist die Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit des Ausbaus zu bewerten und dieser entsprechend zu ertüchtigen. Die Entnahme geschädigter Bereiche kann für kleine Flächen mit dem Tunnelbagger erfolgen. Größere Areale können mit der TSM gewonnen werden. Für den Einbau des Ausbaus können die gleichen Geräte wie auch im normalen Streckenvortrieb genutzt werden. Denkbar sind beispielsweise mobile Ankerbohrgeräte und Betonspritzgeräte für den Einbau der Erstsicherung und äußeren Schale. Die Innenschale wird nachlaufend zum Vortrieb errichtet.



Abbildung 4-3: Mögliche Technik zur Kontursicherung

4.1.2 Umgang mit den Verschlussbauwerken

Als Verschlussbauwerke sind in (DBE TEC, 2015b) für die Einlagerungsvariante Streckenlagerung Streckenverschlüsse und Migrationssperren vorgesehen. Beide Barrierenarten bestehen aus Betonwiderlagern, Bentonit-Dichtelementen und Asphalt-Dichtelementen. Sie unterscheiden sich in Anordnung und Anzahl der einzelnen Elemente. Im Bereich der Verschlussbauwerke soll der Streckenausbau entfernt werden, um die Anbindung des Bauwerks an das Gebirge zu ermöglichen.

Im Zuge der Neuauffahrung der Hauptstrecken sollen die insgesamt acht Streckenverschlüsse am Übergang vom Infrastrukturbereich zu den Einlagerungsbereichen umfahren werden. Für die Umfahrung steht an den Verschlussstandorten ausreichend Platz zur Verfügung, siehe Abbildung 4-4.

Im Fall der Migrationsbarrieren ist die Umfahrung aufgrund der limitierten Platzverhältnisse nicht möglich. Mit einer Anpassung der Vortriebstechnologie wäre eine Durchörterung der Verschlussbauwerke prinzipiell möglich. Eine Teilschnittmaschine könnte z.B. das Schneiden eines Betonwiderlagers und eines Bentonit-Dichtelements übernehmen. Bitumen, ist eine Flüssigkeit, die bei niedrigen Umgebungstemperaturen eine sehr hohe Viskosität besitzt. Damit erscheint das Material quasi als Feststoff mit viskoelastischen Materialverhalten. Mit steigenden Temperaturen tritt der Flüssigkeitscharakter mehr und mehr in den Vordergrund. Bitumen hat außerdem eine hohe Haftfähigkeit. Die Summe der Eigenschaften lassen einen deutlich erschwerten Rückbau der Dichtelemente erwarten. Die genaue Materialzusammensetzung der Asphaltabdichtung ist gegenwärtig nicht näher definiert, was eine Vorhersage der mechanischen Eigenschaften deutlich erschwert. Bisherige Forschungen und erste Großversuche beschreiben den Einbau von vorgefertigten Gussasphaltblöcken und die Monolithisierung vor Ort sowie konzeptionelle Überlegungen zum Einbau von Ringdichtungen in Blockbauweise an der Streckenkontur (Kudla et al., 2010). Gussasphalt ist durch einen relativ geringen Bitumenanteil kleiner 20% gekennzeichnet. Die Härteklasse des Gussasphalts wird von der verwendeten Bitumensorte bestimmt.

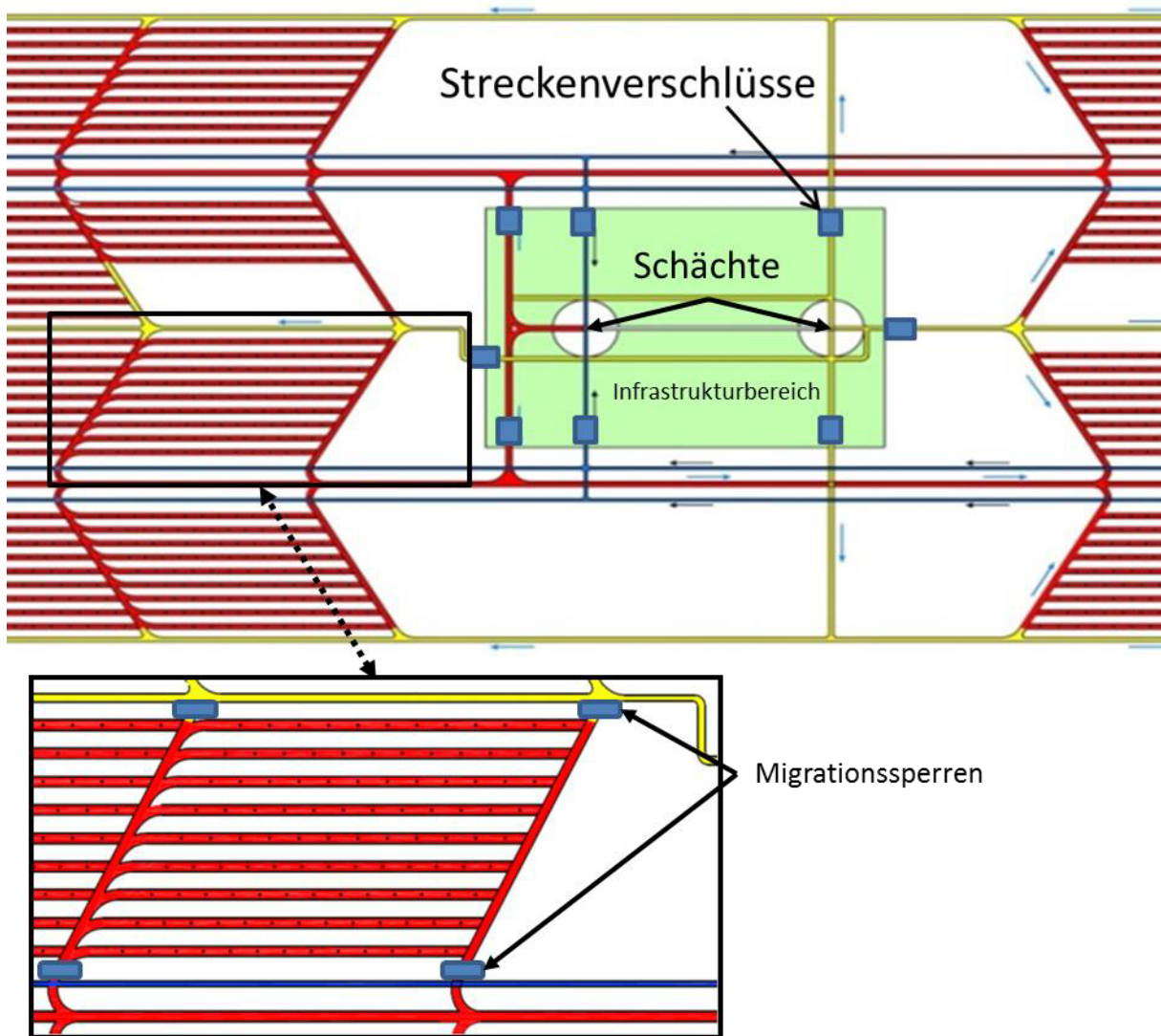


Abbildung 4-4: Standorte Migrationssperren und Streckenverschlüsse

4.2 Zugang zu den Behältern

Das Rückholungskonzept für die Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern im Tongestein soll, wie bereits im Abschnitt 4 erläutert, nach der Re-Mining Strategie umgesetzt werden. Dies umfasst die vollständige Freilegung der Behälter, was ggf. mit einer deutlichen Vergrößerung des Streckenquerschnitts einhergeht. Bei der Gestaltung der Rückholungstrecken muss neben betrieblichen auch geomechanische Aspekte beachtet werden, um die Hohlraumstabilität zu gewährleisten. Eine unzureichende Dimensionierung kann zum Verlust der Hohlraumstabilität bis hin zu einer Beeinträchtigung der Gebirgsintegrität führen.

Für das Einlagerungskonzept wurden die notwendigen Mindestabstände zwischen den Behältern in Längs und Querrichtung im Rahmen einer thermischen Endlagerauslegung ermittelt. Zur Bewertung der geo-mechanischen Stabilität kann für mäßig feste Gesteine, wie beispielsweise Tongestein, die allgemeine Faustregel, Pfeiferbreite zwischen zwei Strecken muss der fünf-fachen Streckenbreite entsprechen, angewendet werden. In erster Näherung

kann eine Überprüfung dieser Faustregel durch die Betrachtung des vertikalen Kräftegleichgewichts erfolgen. Grundsätzlich müssen die Widerstände aus dem Gebirge größer der herrschenden Einwirkungen sein. Für stark idealisierte Verhältnisse in einem unendlich langen Pfeiler gilt dann folgende Grenzbeziehung:

$$\sigma_{\text{Pfeiler}} \leq \sigma_D \quad 4-1$$

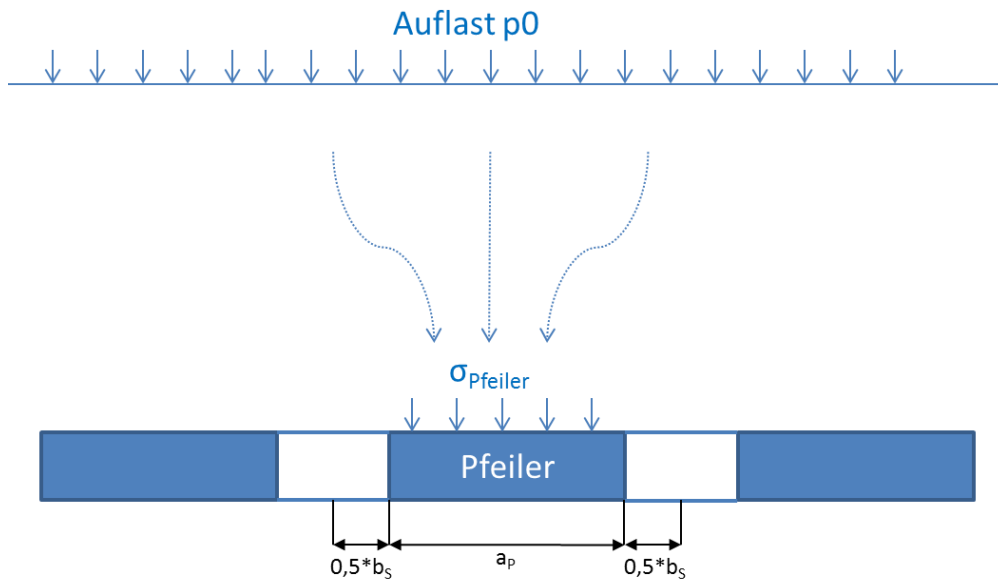


Abbildung 4-5: Idealisierung der geometrischen Verhältnisse und Belastungen im Einlagerungsfeld

Als Gebirgswiderstand kann vereinfachend die einaxiale Druckfestigkeit angenommen werden. Nach (Bossart, 2008) liegt die mittlere einaxiale Druckfestigkeit des Wirtsgesteins Opalinuston bei 25,6 MPa (+/- 2,5 MPa), senkrecht zur Bettung. Parallel zur Bettung ist eine deutlich geringere Druckfestigkeit bei nur 10,5 MPa (+/- 6,5 MPa) zu erwarten. Die Heterogenität des Gesteins erschwert eine Übertragung des Festigkeitsbereiches auf die gesamte Wirtsgesteinsformation. So wurden beispielsweise am Schweizer Erkundungsstandort Benken höhere Festigkeiten (senkrecht 30,3 MPa +/- 6,6 MPa, parallel 28,0 MPa +/- 5,6 MPa) ermittelt (NAGRA, 2003). Allgemein bleibt festzuhalten, dass die Gebirgsfestigkeit zusätzlich zur transversalen Isotropie auch stark vom Wassergehalt abhängig ist. Die Reduzierung des komplexen Materialverhaltens des Tonsteines auf die einaxiale Druckfestigkeit kann daher nur ein erster, vereinfachender Ansatz zur Überprüfung der Faustregel sein.

Die Einwirkungen auf den Pfeiler werden durch die geometrischen Verhältnisse und den Gebirgsdruck bestimmt. Bei einer Endlagerteufe von 670 m und einer mittleren Gebirgsdichte von 2.400 kg/m³ ergibt sich gemäß Gl. 3-2 eine Auflast p_0 gleich 15,8 MPa.

$$p_0 = \rho_G * g * h \quad 4-2$$

Die Belastung im Pfeiler kann nach Gl. 3-3 bestimmt werden.

$$\sigma_{Pfeiler} = \left(1 + \frac{b_S}{a_P}\right) * \rho_0 \quad 4-3$$

Ein Verhältnis Streckenbreite zu Pfeilerbreite gleich 5 zu 1 führt zu einer Belastung des Pfeilers von ca. 19,0 MPa (oder 120% des Gebirgsdruckes). Die einaxiale Druckfestigkeit liegt über dieser Pfeilerbelastung, was die Gültigkeit der Faustformel bestätigt. Die Ungleichung (Gl. 4-1) ist auch für kleinere Verhältnisse von Pfeilerbreite zu Streckenbreite erfüllt, vgl. Abbildung 4-6.

Im Vorhaben ERATO nach (DBE TEC, 2010) wird für den POLLUX®-3 ein Streckenmittenabstand von 34 m bei einem Behältermittenabstand von 20,5 m definiert. Dieser Wert entspricht der Systembreite, also der Pfeilerbreite plus der Streckenbreite. Die eigentliche Pfeilermächtigkeit wird über die Subtraktion der Streckenbreite ermittelt. Die in (DBE TEC, 2010) gewählte Vorzugsvariante der Einlagerung erfordert einen lichten Streckenquerschnitt von 14 m², bei einer Sohlbreite von ca. 5 m. Die Pfeilerbreite beträgt somit 29 m, was einem Verhältnis von 5,8 zu 1 entspricht. In dieser Konfiguration wäre die Stabilität sowohl nach der Faustformel als auch nach Formel 4-3 gegeben, vgl. dazu auch Abbildung 4-6.

(DBE TEC, 2010) schlägt als Streckenquerschnitt der Einlagerungsstrecken eine halbelliptische Form, angepasst an den Einbau von Gleitbogenausbau vor. Diese Querschnittsgestaltung wird vom aktualisierten Endlagerkonzept (DBE TEC, 2015b) übernommen und mit einem nicht näher definierten Betonausbau versehen. Die Einlagerungsstrecke weist mit einer Sohlbreite von ca. 5,8 m (Breite des Ausbruchsquerschnitts ca. 6,4 m) und einer Höhe von ca. 4,5 m (Höhe des Ausbruchsquerschnitts ca. 4,8 m) einen Querschnitt von ca. 23 m² auf. Eine detaillierte Planung des Streckenquerschnitts liegt nicht vor.

Der Streckenmittenabstand wird entsprechend der thermischen Auslegungsberechnungen auf 20 m festgelegt, die Pfeilerbreite beträgt damit 14,2 m. Der Behälterabstand beträgt 23 m. Die Endlagerauslegung im Vorhaben ANSICHT nach (DBE TEC, 2015b) berücksichtigt damit ein Verhältnis von ca. 2,5 zu 1. Dies entspricht einer Pfeilerbelastung von ca. 22,4 MPa. Die Faustregel wird damit gebrochen, unter Berücksichtigung der unteren Grenze der einaxialen Druckfestigkeit ist die Grenzbeziehung aber gerade noch erfüllt, vgl. Abbildung 4-6. Unter Berücksichtigung des Ausbruchsquerschnitts sinkt das Verhältnis weiter.

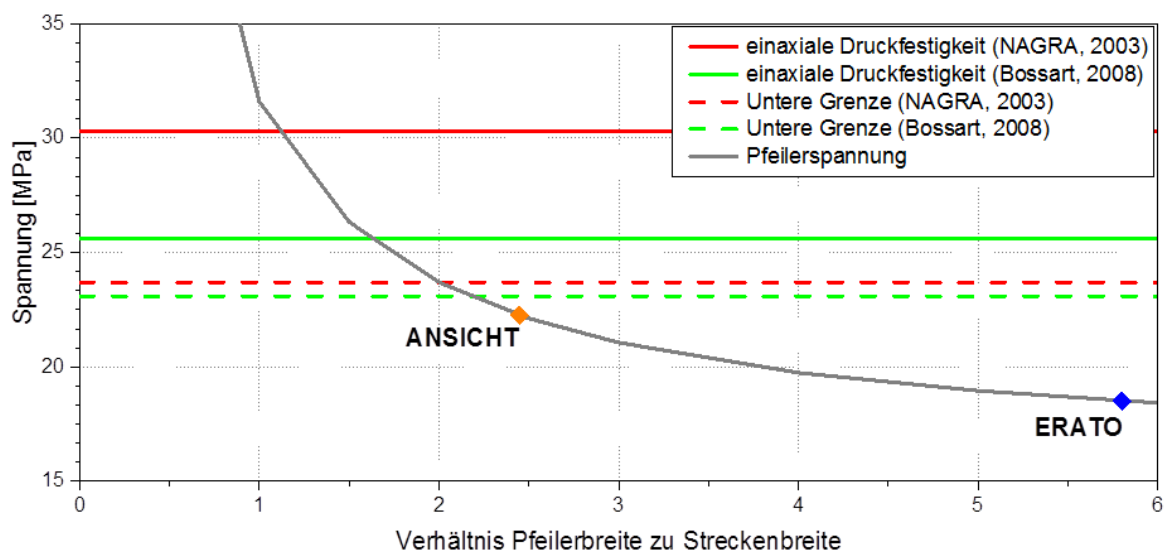


Abbildung 4-6: Erwartete Pfeilerspannung bei unterschiedlichen Endlagerauslegungen

Aus der vorläufigen Beurteilung der Standfestigkeit ist zu erkennen, dass eine deutliche Vergrößerung des Streckenquerschnittes zu einer Beeinträchtigung der Hohlraumstabilität führen würde. Eine Adaption des dreiteiligen Auffahrungsschemas wie es beispielsweise für die Rückholung von POLLUX®-10-Behältern im Salz vorgesehen ist (BGE TEC 2018 - Teilbericht Strecke Salz), scheint nicht möglich. Für die aktuelle Endlagerauslegung nach (DBE TEC, 2015b) würde bei einer 10 m breiten Rückholungsstrecke nur noch ein Restpfeiler von 10 m Breite verbleiben. Mit einem Verhältnis von 1:1 wird erwartet, dass dieser Restpfeiler die Lasten nicht mehr aufnehmen kann.

Um die Forderung nach einem möglichst breiten Restpfeiler bzw. einem kleinen Querschnitt der Rückholungsstrecke zu erfüllen, soll die Rückholungsstrecke ungefähr dem Querschnitt der Einlagerungsstrecke entsprechen. Der endgültige Rückholungsquerschnitt wird von der Vorrichtung zur Handhabung der Behälter definiert. Die Neuauffahrung umfasst damit die Entnahme des Versatzes der Einlagerungsstrecken und dem Buffer.

Mit Blick auf die Neuauffahrung der Einlagerungsstrecke können dem Buffer voraussichtlich ähnliche Eigenschaften zugewiesen werden wie dem Versatz der Richtstrecken und Querschläge, da er ebenfalls aus einem granularem Gemisch von arteigenem Material und quellfähigen Tonmineralen besteht. Maßgeblich für die Neuauffahrung des Buffers ist sein Wassergehalt zum Zeitpunkt der Rückholung. Nach Jobmann & Lommerzheim 2016 ist eine vollständige Aufsättigung frühestens nach einigen hundert Jahren zu erwarten. Da eine Rückholung der eingelagerten Abfälle spätestens 40 Jahre nach Beginn der Einlagerung begonnen wäre, ist die Aufsättigung selbst gegen Ende einer Rückholung noch nicht abgeschlossen. Es wird deswegen davon ausgegangen, dass der Buffer bei Rückholung in schachtnahen Einlagerungsbereichen noch im weitestgehend trockenen Zustand vorliegt. In schachtfernen Einlagerungsbereichen liegt er in einem stark durchfeuchteten Zustand vor, in dem allerdings die vollständige Aufsättigung und der vorgesehene Quelldruck noch nicht erreicht wurden.

Deshalb wird davon ausgegangen, dass sich der Buffer zum Zeitpunkt der Rückholung hauptsächlich durch die Einzelkörner des Granulats charakterisieren lässt. Zur Neuauffahrung der Einlagerungsstrecken kommen deswegen ebenfalls Tunnelbagger oder klein bauende Hydraulikbagger zum Einsatz, die je nach angetroffenen Eigenschaften des Buffers mit verschiedenen Werkzeugen bestückt werden.

Es wird angenommen, dass die Gleisanlage aus dem Einlagerungsbetrieb schrittweise mit der Einlagerung und dem Versatz geraubt wurde.

Der alte Ausbau soll soweit möglich in der Strecke verbleiben. Geschädigte und nicht ausreichend tragfähige Bereiche der Kontursicherung können parallel zu Versatzentnahme ertüchtigt bzw. instandgesetzt werden. Auch dazu kann die im Endlager bzw. den Rückholungsbetrieb vorhandene Technik mit einer Anpassung zur Gewährleistung der radiologischen Sicherheit eingesetzt werden.



Abbildung 4-7: Schematische Darstellung zur Auffahrung der Rückholungsstrecken

Die Neuauffahrung nach dem beschriebenen Prinzip findet vom Querschlag aus bis an den ersten Behälter heran und zwischen den Behältern statt. Da Neuauffahrung und Rückholung im steten Wechsel stattfinden sollte keine kontinuierliche Fördereinrichtung in der Rückholungsstrecke errichtet werden. Das Haufwerk (der gelöste Versatz) kann mit Fahrladern aufgenommen, bis zu einer Übergabestation transportiert und in den Hauptstrecken über eine Bandanlage gefördert werden. Das Haufwerk wird mit einem Fahrlader von der Ortsbrust über den Querschlag bis zur Kippstelle der Bandanlage gefördert und anschließend zwischengespeichert oder aber direkt in bereits geräumte Strecken versetzt. Haufwerk, das aus dem Kontrollbereich gefördert werden soll und bspw. über täglich auf Halden deponiert wird, muss gemäß § 44 StrlSchV (StrlSchV, 2017) auf Kontamination hin überprüft werden. Hierbei handelt es sich um weniger als 100 m³ pro Schicht aber in Summe um mehrere 10.000 m³ an Haufwerk, das freigemessen werden muss. Entsprechende Mengen lassen sich mittels Freimessanlagen, die erfolgreich bei der Freimessung von z.B. Bauschutt in den Kernkraftwerken eingesetzt werden, bearbeiten. Es ist zu berücksichtigen, dass die Freimessung des Haufwerkes wahrscheinlich langsamer erfolgt als die Auffahrung. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll in der Nähe der Freimessanlage einen Bunker einzurichten, der als Puffer für das aufgefahrene Haufwerk dient.

Die Freilegung der Behälter und die Entnahme erfolgt in gesonderten Arbeitsschritten.

Eine Automatisierung oder Teleoperation der Auffahrungs- und Sicherungsprozesse während des Rückholungsbetriebes ist nach aktuellem Stand der Technik grundsätzlich möglich. Zweck der Automatisierung im Streckenvortrieb muss die Minimierung der Aufenthaltszeit von Personal im Umfeld der Ortsburst sein. Damit reduzieren sich potenzielle radiologische und klimatische Belastungen (heiße Umgebungsbedingungen).

4.3 Freilegen und Entnahme der Behälter

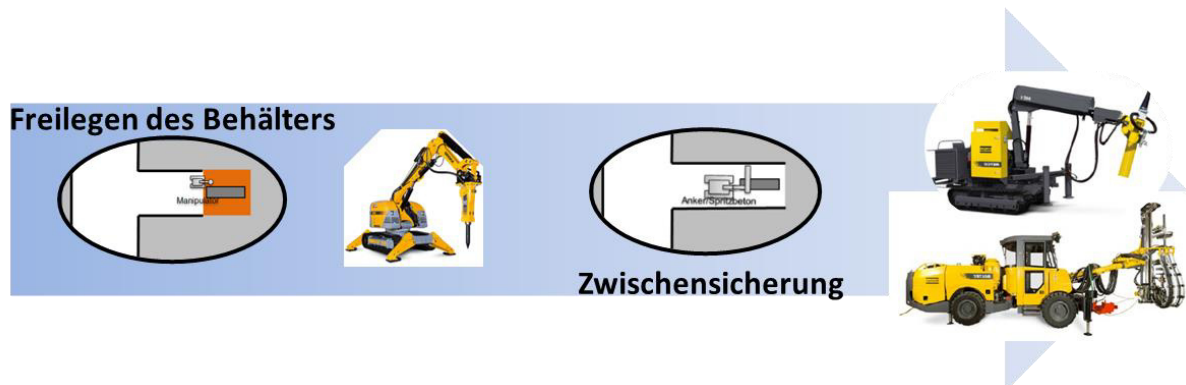


Abbildung 4-8: Schematische Darstellung der Hauptprozesse zum Freilegen der Behälter

Das Freilegen der Behälter soll mit Hydraulikbaggern realisiert werden. Ein wesentlicher Vorteil der verwendeten Hydraulikbagger ist die räumliche Flexibilität beim Lösen des Buffers. Im Gegensatz zu einer TSM ist es möglich, mit dem beweglichen Ausleger und der daran montierten Schaufel das Buffermaterial rings um das Abfallgebinde herum zu entfernen. Aufgrund der sehr einschränkenden Platzverhältnisse seitlich der Abfallgebinde ist es allerdings nicht möglich, mit einem Hydraulikbagger neben dieses zu fahren, um dort Haufwerk aufzunehmen, und dann den Bagger mit beladener Schaufel zu drehen, um das Haufwerk auf das Fördermittel (Lader oder Mulde) aufzugeben.

Die Freilegung der Abfallgebinde wird in vier Schritten geplant:

Im **ersten Schritt** entfernt ein Hydraulikbagger, der mit einem möglichst langen Ausleger ausgestattet ist, von einer Position vor dem Abfallgebinde so viel von dem Buffer wie möglich. Dazu kann der Bagger zur Neuauffahrung der Einlagerungsstrecken genutzt werden. Auch der Einsatz kleinerer Geräte ist möglich. Marktgängige Hydraulikbagger mit Auslegern, die von dieser Position aus den gesamten Buffer aufnehmen könnten, fallen zu groß aus. Diese könnten sich im Tunnelquerschnitt nicht drehen, um das Haufwerk auf ein Förderfahrzeug hinter sich aufzugeben. Abbildung 4-9 zeigt eine Prinzipskizze und damit die geometrischen Möglichkeiten im Streckenquerschnitt der Einlagerungsstrecke am Beispiel der Maße des Kleinbaggers. Mit einem Schaufelvolumen von $0,3 \text{ m}^3$ ist zu erwarten, dass ein solcher Baggertyp den gesamten Buffer innerhalb seiner Reichweite in einer Schicht entfernen kann. Es ist zu allerdings erkennen, dass die Grabkurve des Baggers nicht ausreicht, um den gesamten Behälter freizulegen.

Schritt 1: Lösen und Fördern des Buffers durch Minibagger Seitenansicht der Einlagerungsstrecke

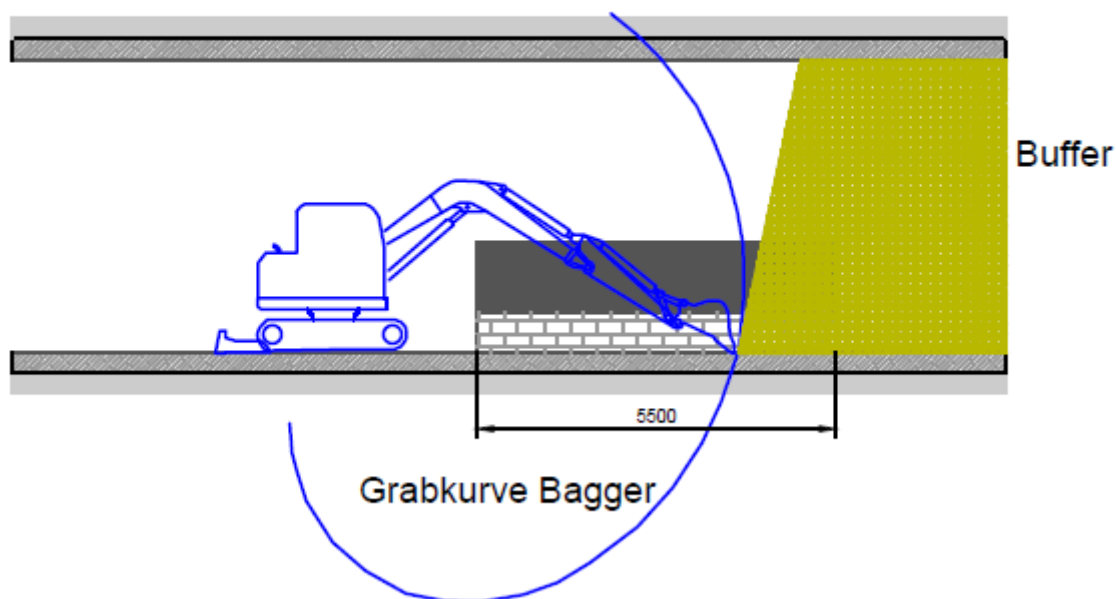


Abbildung 4-9: Prinzipskizze von Schritt 1 der Freilegung des Abfallgebindes

Aus diesem Grund wird der **zweite Schritt** ausgeführt. Im freigelegten Teil der Strecken und seitlich neben dem Abfallgebäude wird ein temporäres Arbeitsplanum aus Schotter errichtet, höhengleich mit der Oberkante des Sockels, auf dem das Abfallgebäude liegt (s. Abbildung 4-10).

Schritt 2: Aufschütten eines Schotterplanums durch Minibagger Seitenansicht der Einlagerungsstrecke

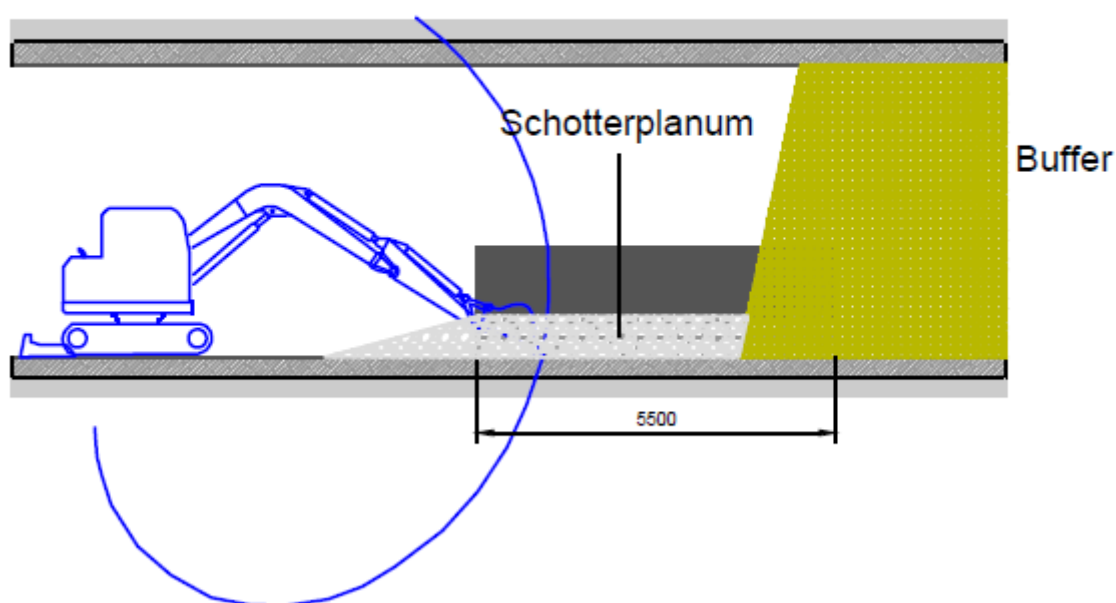


Abbildung 4-10: Prinzipskizze von Schritt 2 der Freilegung des Abfallgebindes

Im **dritten Schritt** fährt der Bagger aus der Strecke heraus auf das Planum und kann von dieser Position aus den übrigen Buffer auf der Rückseite des Abfallgebundes entfernen. Durch das erhöhte Arbeitsplanum kann der Bagger mit beladener Schaufel über das Abfallgebände drehen und so das wartende Fördermittel erreichen. Abbildung 4-11 zeigt die grundsätzliche geometrische Machbarkeit. Nachdem der Buffer vollständig entfernt wurde, fährt der Bagger aus der Strecke heraus.

Schritt 3: Minibagger auf Schotterplanum Querschnitt der Einlagerungsstrecke

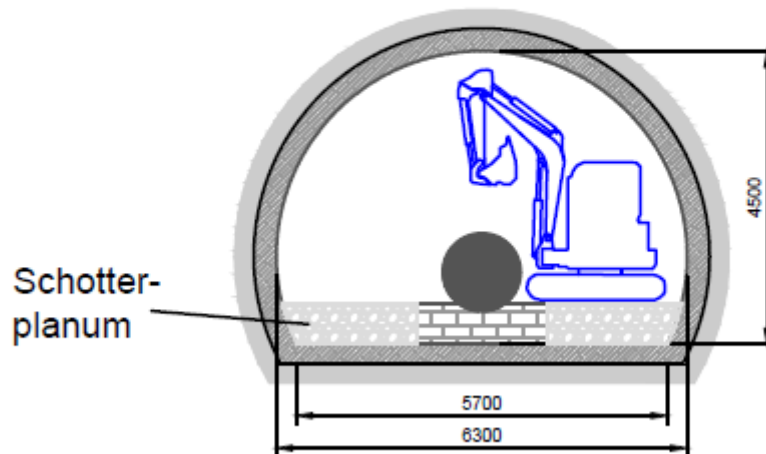


Abbildung 4-11: Prinzipskizze von Schritt 3 der Freilegung des Abfallgebundes

Im **vierten Schritt** entfernt der Hydraulikbagger aus Schritt 1 das erstellte Schotterplanum. Somit liegt das Abfallgebände frei auf seinem Sockel.

Die Beschreibung des Freilegens der Behälter erfolgte unter Berücksichtigung marktgängiger Hydraulikbaggertypen. Empfehlenswert wäre eine Weiterentwicklung der Bagger zur Freilegung der Abfallgebundes. So sollte deren Betrieb einerseits ferngesteuert ablaufen, um die Strahlenexposition eines Baggerführers zu vermeiden. Andererseits sind bauliche Verbesserungen sinnvoll, um die Bagger explizit auf die Aufgaben der Behälterfreilegung im kleinen Streckenquerschnitt auszulegen, z.B. das Entfernen der Kabine, eine Anpassung der Position der Auslegerverlagerung auf dem Oberbau des Baggers oder eine Anpassung der Kinematik des Auslegers an die Platzverhältnisse.

Eine Alternative könnte das Laden und Fördern des Haufwerkes mit Saugsystemen sein. Saugbagger wie sie aus dem Straßentiefbau bekannt sind, können auch feuchtes und grobkörniges Material absaugen und zwischenspeichern bzw. einschließen.

Zur Gewährleistung der betrieblichen Sicherheit kann parallel zur Freilegung eine Zwischensicherung bzw. Instandsetzung des Ausbaus erfolgen. Anders als im freien Streckenquer-

schnitt können durch den Behälter Ankerlängen limitiert sein. Beim Aufbringen von Spritzbeton ist möglicherweise das Abfallgebinde gegen den Rückprall des Betons zu schützen.

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

4.4 Entnahme des Behälters

Die Entnahme der POLLUX®-Behälter erfolgt mit einer für die Rückholung modifizierten Einlagerungsvorrichtung. Das Konstruktionsprinzip folgt dem Prototyp für die Streckenlagerung im Salz (ELVIS, siehe dazu DBE, 1995) und den Anpassungen aus (Herold et al., 2018-Strecke Salz). Eine erste Machbarkeitsstudie zur technischen Umsetzbarkeit einer modifizierten Einlagerungsvorrichtung wurde innerhalb dieses Vorhabens für die Einlagerungsvariante der horizontalen Streckenlagerung von POLLUX®-10 Behältern in Salz erarbeitet (DBE-TEC, 2018 – Teilbericht Salz). Die Anforderungen an eine Einlagerungs- und Rückholungs-vorrichtung im Tongestein sind weitestgehend gleich und unterscheiden sich nur durch die Behältereigenschaften des POLLUX®-3.

Der Prototyp der Einlagerungsvorrichtung in Strecken (ELVIS) für den POLLUX®-10 ist in seinen Außenabmessungen 6,0 m lang, 3,2 m breit und in höchster Hubposition 3,3 m hoch. Die für die Rückholoption modifizierte Einlagerungsvorrichtung in Strecken (mELVIS) ist in den Abmessungen vergleichbar (ca. 5,5 m lang, 4,7 m breit und ca. 3,4 m hoch.). Die breitere Bauweise des mELVIS resultiert aus den Kettenfahrwerken. Es ist zu erwarten, dass die Vorrichtung zur ausschließlichen Handhabung des POLLUX®-3 (ca. 38 t Behältermasse) in ihrer Baugröße kleiner und kompakter sein kann. Da ebenso POLLUX®-9 Behälter mit CSD-B/-C eingelagert und damit auch zurückgeholt werden müssen, wird die Auslegung der Rückholungs-vorrichtung von den Abmessungen und Massen dieser Behälter bestimmt.

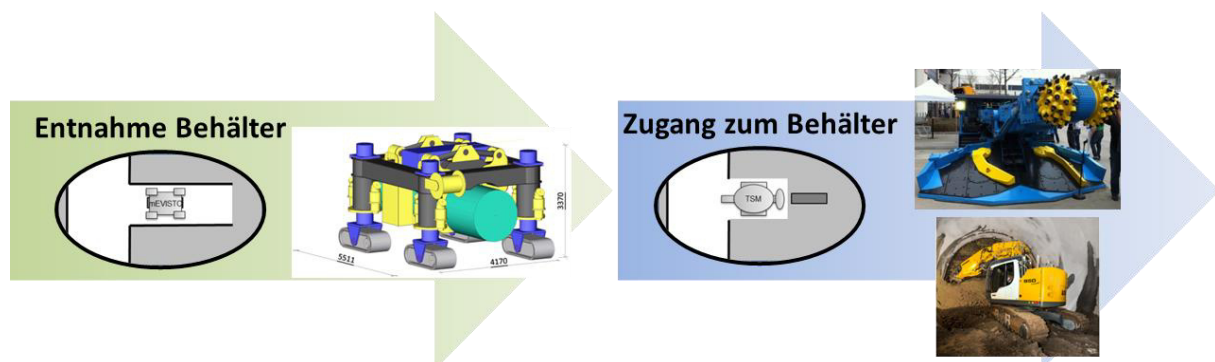


Abbildung 4-12: Schematische Darstellung zur Entnahme der Behälter

Die Streckenprofile der Einlagerungsstrecken wie sie in (DBE TEC, 2010) und (Jobmann & Lommerzheim, 2016) beschrieben sind, können die Rückholungsvorrichtung nicht fassen. Das beschriebene halbelliptische Profil ist zu schmal. Eine Verbreiterung der Strecke führt bei diesem Profil zu einer unverhältnismäßigen Erhöhung der Strecke. Die Rückholungsstrecke ist in ihrem Querschnitt an die betrieblichen Anforderungen anzupassen. Zur vorläufigen Bestimmung eines Streckenquerschnittes wird angenommen, dass die maximale Höhe und die Breite der modifizierten Einlagerungsvorrichtung um die Differenz des Durchmessers zwischen POLLUX®-10 und 3 kleiner sind. Es ist ein Sicherheitsabstand von 0,5 m zu den Stößen und 0,2 m zur Firste bzw. Einbauten über der Vorrichtung einzuhalten. Statt eines Bogenprofils, wird ein eher kreisrunder Querschnitt mit abgeflachter Sohle gewählt. In Abbildung 4-13 ist der überarbeitete Querschnitt der Rückholungsstrecken dargestellt. Der gewählte Querschnitt kann die Rückholungsvorrichtung aufnehmen, bietet im Firstbereich ausreichend Platz für die Installation der Sonderbewetterung und bietet mit einem Abstand von 1,8 m zwischen Sockel und Stoß einen hinreichend großen Arbeitsbereich für das Freilegen der Behälter. Der freie Querschnitt beträgt ca. 24 m² mit einem geschätzten Ausbruchsquerschnitt von 30 m². Damit ist die Rückholungsstrecke in ihren Abmessungen vergleichbar zur Einlagerungsstrecke. Das Verhältnis von Pfeilerbreite zu Streckenbreite ist gleich der Einlagerungsstrecke.

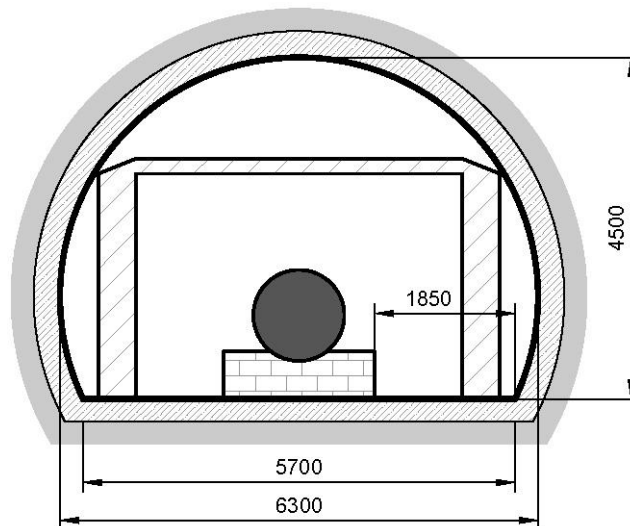


Abbildung 4-13: Querschnitt der Rückholungsstrecke

Zur Erleichterung der Rückholung sollte der angepasste Querschnitt der Rückholungsstrecke auch auf die Einlagerungsstrecke übertragen werden. Wenn beide Querschnitte unterschiedlich sind, sind während der Wiederauffahrung im Rückholungsbetrieb auch Teile des alten Streckenausbaus zu entfernen und eine neue Kontursicherung zu errichten. Dies stellt zusätzliche Anforderungen an die Auffahrungstechnik und verlangsamt den Auffahrungsfortschritt. Zusätzlich sind zur Erleichterung der Rückholung auch weitere Anforderungen an den Ausbau der Einlagerungsstrecke zustellen. So müsste bei der Wahl der Ausbaumaterialien, besonders der Gebirgsanker und einer möglichen Armierung, eine mögliche Rückholung und damit Aufwältigung der Strecken mit berücksichtigt werden.

4.5 Aspekte des Strahlenschutzes

Der betriebliche Strahlenschutz bildet eine Säule zur Gewährleistung der betrieblichen Sicherheit im Endlager. Dies gilt auch für den Rückholungsbetrieb.

Die neuerrichteten Grubenbaue werden gemäß § 36 StrlSchV (StrlSchV, 2017) in die Strahlenschutzbereiche Überwachungs- und Kontrollbereich unterteilt. Die Einteilung richtet sich zuerst nach der Einteilung während des Einlagerungsbetriebes. Grubenteile die dem ÜB zugeordnet waren und auch bei der Rückholung rein bergbauliche Funktionen erfüllen können im ÜB verbleiben. Die betrifft Teile des Infrastrukturbereiches und die Frischwetterstrecken.

Grubenteile die vor der Verfüllung dem KB zugeordnet waren und nicht aus diesem entlassen wurden, fallen auch bei der Neuauffahrung in den KB. Anders als im Einlagerungsbetrieb, müssen im Zuge der Rückholung somit auch im KB Auffahrungstätigkeiten durchgeführt werden. Dies betrifft die Gebindettransportstrecken, die Abwetterstrecken, die Querschläge und alle Einlagerungsstrecken. Sollten einzelne Teil vor dem Versatz freigemessen worden sein können diese auch im ÜB errichtet werden. Mit der Neuauffahrung der Einlagerungsstrecken werden aber alle wettertechnisch nachgeschalteten Grubenteile dem KB zugeordnet.

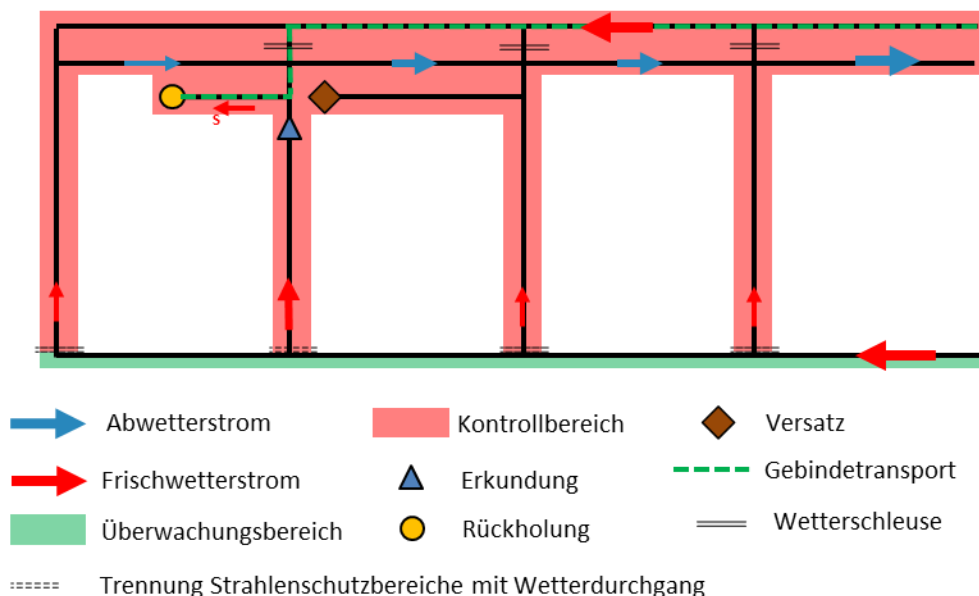


Abbildung 4-14: Strahlenschutzbereiche, wenn Freimessung vor Versatz kann QS auch im ÜB aufgefahen werden

Ein regulärer Übergang zwischen beiden Strahlenschutzbereichen ist untertage nur im Infrastrukturbereich vorgesehen. Gemäß den Anforderungen aus § 44 StrlSchV (StrlSchV, 2017) sind alle Personen und beweglichen Gegenstände, die den Kontrollbereich verlassen bzw. herausgebracht werden, auf Kontamination zu prüfen. Bei den Gegenständen ist darüber hinaus noch zu überprüfen ob sie aktiviert wurden. Wird an Personen eine Kontamination

festgestellt, so sind direkt Maßnahmen zu treffen, um eine Strahlenexposition und eine Weiterverbreitung radioaktiver Stoffe zu verhindern. Gegenstände dürfen nur dann den Kontrollbereich verlassen, wenn ihre Aktivierung bzw. Kontamination die Werte für die uneingeschränkte Freigabe bzw. die Oberflächenkontamination aus Anhang III Tabelle 1 der StrlSchV (StrlSchV, 2017) unterschreiten. Für den Übergang vom Überwachungs- in den Kontrollbereich bzw. umgekehrt werden im Infrastrukturbereich Schleusen mit Monitoren aufgebaut, die Personal und Sachgüter auf Kontamination bzw. Aktivierung hin überprüfen. Für eine etwaige Dekontamination von Personen bzw. Sachgütern sind im Kontrollbereich extra Bereiche für eine Dekontamination vorgesehen.

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

Die Rückholung der Behälter ist durch ein entsprechendes Mess- und Erkundungsprogramm zu begleiten. Während der Annäherung an die Behälter sind die Wetter stetig zu überwachen und das Haufwerk regelmäßig zu beproben. Das Bewetterungssystem in den Rückholungsstrecken ist so zu gestalten, dass eine Kontaminationsverschleppung vermieden wird.

Während des Einlagerungsbetriebes finden die bergbaulichen Tätigkeiten (Vortrieb) im Überwachungsbereich (ÜB) statt. Die vollständig errichteten Bohrlochüberfahrungsstrecken werden entsprechend des Einlagerungsfortschritts in den KB überführt. Mit fortschreitender Betriebsdauer fallen mehr Strecken in den KB, während die Bereiche des ÜB stetig kleiner werden. Im Zuge der Wiederauffahrung werden alle Grubenteile, die vor der Verfüllung oder dem Verschluss Teil des KB waren, ebenfalls wieder dem KB zugeordnet. Die Wiederauffahrung der meisten Strecken würde somit stets im KB stattfinden. 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 freigemessen werden. Dies kann beispielsweise notwendig sein, um das Haufwerk übertage aufzuhalten. Die radiologische Überwachung der Neuauffahrung und das potenzielle Freimessen des gesamten Haufwerks stellen einen großen technischen und zeitlichen Aufwand dar und beeinflussen damit die Errichtungsdauer des Rückholungsbergwerks.

Alternativ könnten Streckenteile des KB vor dem Verschluss freigemessen, ggf. dekontaminiert und anschließend aus dem KB entlassen werden. Der angesprochene hohe zeitliche und technische Aufwand wird damit in den Einlagerungsbetrieb verschoben. Die Überführung der Grubenteile in den ÜB muss dann in das Verfüll- und Verschlusskonzept aufgenommen werden. Negative Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit sind nicht zu erkennen; somit entsteht kein Widerspruch zu den geltenden Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010), die eine solche negative Auswirkung durch die Rückholbarkeit verbietet. Im Rückholungsbetrieb kann die Neuauffahrung dieser Streckenteile im ÜB tendenziell schneller umgesetzt werden. Das Freimessen vor dem Verschluss/Versatz kann somit eine ergänzende, rückholungserleichternde Maßnahme im bestehenden Einlagerungs- bzw. Rückholungskonzept sein. Auffahrungstätigkeiten im KB können während des Rückholungsbetriebes aber nicht ausgeschlossen werden.

Die Aufwältigung der Einlagerungstrecken Die Bohrlochüberfahrungsstrecken muss stets im KB stattfinden. Die Aufwältigung entspricht der schrittweisen Annäherung bzw. dem späterem Freilegen der Behälter. Die Errichtung von KBs im Grubengebäude erfordert, dass alle wettertechnisch nachgeschalteten Grubenteile auch dem KB zugeordnet werden. Das größte Risiko einer Kontaminationsverschleppung wird während des Freilegens der Behälter erwartet.

4.6 Lagebestimmung der Behälter

Mit der Annäherung an die Behälter sind Kenntnisse zu deren exakter Lage unerlässlich. Ein unbeabsichtigtes Anschneiden der Behälter ist in jedem Fall zu vermeiden. Nach § 65 BBergG muss für Anlagen unter der Verantwortung des Bergrechtes ein Risswerk geführt und regelmäßig aktualisiert werden. Zusätzlich kann festgelegt werden, *"...dass bestimmte rißliche und sonstige zeichnerische Darstellungen über Tätigkeiten [...] und über Einrichtungen [...] einzureichen und nachzutragen, daß bestimmte Listen, Bücher und Statistiken über [...] betriebliche Vorgänge zu führen..."* §67 (BBergG, 2015) sind. Die einzuhaltende Genauigkeit des Risswerks richtet sich nach § 6 MarkscheiderV nach dem Zweck. Im Allgemeinen kann für Punktlagen eine Messgenauigkeit von kleiner ± 10 cm angenommen werden. Zusätzlich zu den bergbehördlichen Vorschriften wird auch in den "Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle" eine Dokumentation aller *"... für Sicherheitsaussagen und für zukünftig zu treffende Beurteilungen und Entscheidungen relevanten Daten und Dokumente ..."* (BMU, 2010) gefordert. Dazu zählen auch *"die markscheiderischen Daten des Endlagers, einschließlich ihrer historischen Entwicklung"* (BMU, 2010) und *"alle relevanten Informationen über die einzelnen eingelagerten Abfälle..."* (BMU, 2010). Aus heutiger Sicht kann somit angenommen werden, dass die exakte Lage der Behälter bei der Einlagerung bzw. vor dem Versatz bekannt ist. Mögliche Lageveränderungen der Behälter im Zeitraum zwischen dem Versatz und der Rückholung können aber naturgemäß nicht erfasst werden. Vor Beginn der Auffahrung der Rückholungsstrecken muss somit eine vorausseilende Erkundung die Lagedaten verifizieren.

Mögliche zum Einsatz kommende Messmethoden zur Detektion der Endlagerbehälter ergeben sich aus der Diskontinuität zwischen dem Versatzmedium und dem Behältermedium. Aufgrund der Größe der Detektionsziele ist es grundsätzlich möglich verschiedene Messme-

thoden zur Detektion einzusetzen. Im Wesentlichen kommen geophysikalische Reflexionsverfahren infrage, welche eine sprunghafte Änderung der akustischen Impedanz (bspw. Seismik oder Ultraschall) oder der elektromagnetischen Impedanz (Radarmessungen) erfassen. Der zwischen Versatzmedium und Behältermedium herrschende Impedanzsprung führt zu entsprechenden Reflexionssignalen in den Messdaten.

Bei akustischen Messverfahren wird durch einen Hammerschlag oder einen Ultraschallsender am Stoß ein akustisches Signal erzeugt, welches sich im Tongestein bzw. Versatz als Welle ausbreitet und an den Endlagerbehältern reflektiert wird. Durch die Installation mehrerer Empfänger am Stoß wird das reflektierte Signal aufgezeichnet und aufgrund der Signallaufzeiten zwischen Sender und Empfänger die Lage des Reflektors ermittelt. Durch die notwendige Fixierung von Sender und Empfängern am Stoß sind diese Messungen mit einem gewissen Zeitaufwand verbunden.

Bei elektromagnetischen Verfahren wird durch eine Senderantenne ein elektromagnetisches Signal erzeugt, welches sich im Salzgestein bzw. Salzgrus als Welle ausbreitet und an den Endlagerbehältern reflektiert wird. An einer Empfangsantenne wird das reflektierte Signal aufgezeichnet und aufgrund der Signallaufzeiten zwischen Sender und Empfänger die Lage des Reflektors ermittelt. Bei Nutzung einer sogenannten monostatischen Apparatur sind Sender- und Empfängerantenne in einem Gehäuse untergebracht. Das robust gebaute Kunststoffgehäuse wird über den zu untersuchenden Gebirgsbereich gezogen bzw. händisch am Stoß angepresst und geschoben. Radarmessungen benötigen gegenüber den o.g. akustischen Messverfahren einen geringeren Zeitaufwand.

Aufgrund der zügigen Durchführbarkeit der Messungen und der heute vorhandenen, ausgereiften Messtechnik empfiehlt sich die Ortung der Endlagerbehälter mittels Radarmessungen. Die Radarmessungen können nach Auffahrung von Teilbereichen oder kompletter Auffahrung der Rückholstrecken erfolgen. So können beispielsweise vor Neuauffahrung der Einlagerungstrecken Erkundungsbohrungen in Streckenachse geteuft werden. Die Radarmessungen können dann auch in Form von Bohrlochradarmessungen erfolgen. Entsprechendes Messequipment entspricht dem Stand der Technik und ist am Markt für verschiedenen Bohrdurchmesser verfügbar. Auch die Durchführung von Bohrungen im mäßig festen Tongestein entspricht dem Stand der Technik. Beispiele sind in aller Untertagelaboren zu finden. Das bohren im losen oder geringverfestigten Versatz stellt erhöhte Anforderungen an die Bohrausrüstung ist aber ebenfalls technisch möglich.

Vor Beginn der eigentlichen Messungen ist eine Kalibrierung der elektromagnetischen Wellengeschwindigkeit im Ausbreitungsmedium (Tongestein bzw. Versatz) notwendig. Dies kann über eine definierte Sender-Empfänger Anordnung oder über eine räumlich definierten Reflektor erfolgen. Nach Kalibrierung der Wellengeschwindigkeit werden die Radarmessungen auf einer horizontalen Messlinie (Radarprofil) am Stoß durchgeführt. Ein eingespieltes Messteam kann Profillängen größer 100 m je Schicht vermessen. Durch diese Messungen wird die horizontale Position der einzelnen Endlagerbehälter bestimmt. Zur genauen Bestimmung der vertikalen Position der Endlagerbehälter werden drei übereinander angeordnete horizontale Radarprofile vorgeschlagen, z.B. in 1, 2 und 3 m Stoßhöhe. Alternativ kann an Position der einzelnen Endlagerbehälter eine senkrechte Messlinie über die gesamte Stoßhöhe erfol-

gen. Die Kombination der drei horizontalen Messprofile bzw. Kombination eines horizontalen mit den vertikalen Messprofilen erlaubt die Ortung der einzelnen Endlagerbehälter in ihrer 3-dimensionalen Lage. Die Genauigkeit der Lagebestimmung ist im Wesentlichen abhängig von der Wellenlänge des Quellsignals und liegt bei der Nutzung einer hochfrequenten Antenne im Bereich kleiner 1 dm. Dies entspricht ca. der Genauigkeit der markscheiderischen Aufzeichnungen.

4.7 Wettertechnik und Klimavorausberechnung

4.7.1 Bewetterungskonzept

Das Grubengebäude ist durch zwei Schächte mit der Tagesoberfläche verbunden. Der Haufwerkstransportschacht ist einziehender Frischwetterschacht und der Gebindetransportschacht ist ausziehender Abwetterschacht. Die Wetterbewegung wird durch einen Grubenlüfter am ausziehenden Schacht erzeugt. Sämtliche Einlagerungsfelder des Endlagers sind an jeweils 3 Hauptstrecken angeschossen (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Während des Einlagerungsbetriebes dienen die Hauptstrecken für den Haufwerktransport (ÜB) und für den Gebindetransport (KB) als Frischwetterzubringer für die aktiven Betriebspunkte. Die Abwetter aller Betriebspunkte gelangen über die Querschläge in die gemeinsamen Abwetterstrecken (KB) und werden dort dem Gebindetransportschacht zugeführt. Schachtseitige Querschläge sind zur Vermeidung von Wetterkurzschlüssen mit entsprechenden Wetterbauwerken verschlossen (Dämme, Wettertore oder Wetterschleusen). Um die Offenstandszeiten der Einlagerungstrecken gering zu halten, werden die Einlagerungstrecken nach Bedarf, d. h. in Spätestlage zu ihrer Nutzung aufgefahren. Die Strecken werden erst vor der Einlagerung des ersten Behälters dem KB zugeordnet. Der Übergang zwischen ÜB/KB liegt im Querschlag und wandert in Abhängigkeit des Auffahrungs- bzw. Einlagerungsfortschrittes von der Abwetterstrecke in Richtung der Frischwetterstrecke des ÜB. Die Einlagerungstrecken sind als Blindstrecken ausgeführt und werden sonderbewettert (DBE TEC, 2010)

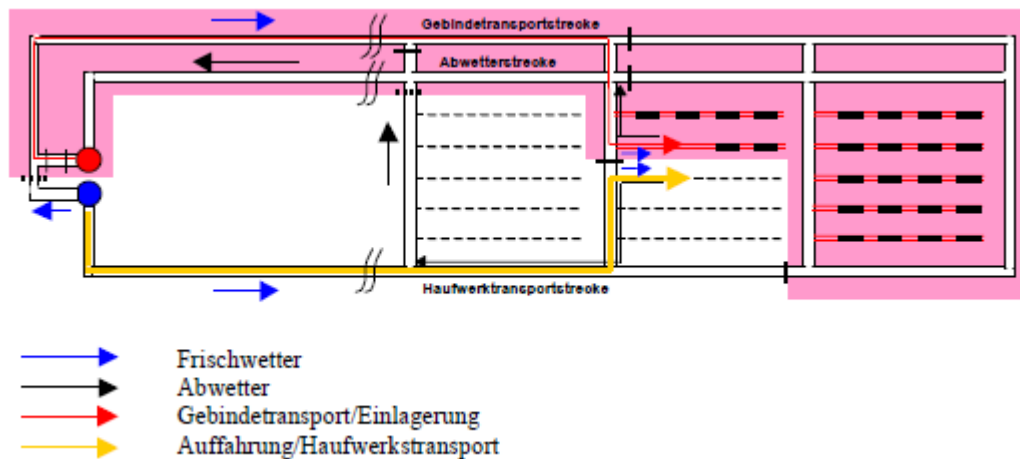


Abbildung 4-15: Schematische Darstellung des Bewetterungskonzeptes für die Streckenlagerung während der Einlagerung (DBE TEC, 2010)

Auch während der Rückholung wird das Bewetterungskonzept des Einlagerungsbetriebes umgesetzt. Jeder der beiden Einlagerungsbereiche umfasst vier Reihen von Einlagerungsfeldern, von denen jedes Feld nach dem beschriebenen Bewetterungskonzept versorgt wird. Die Anordnung mehrerer Reihen Einlagerungsfelder nebeneinander führt zu Querungen der verschiedenen Hauptstrecken. Zur Aufrechterhaltung des Bewetterungsregimes, Vermeidung von wettertechnischen Kurzschlüssen und der Trennung von KB/ÜB dürfen zwischen

den Gebindetransportstrecken (Abbildung 4-16 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, rot), den Abwetterstrecken (Abbildung 4-16 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, blau) und den Frischwetterstrecken im ÜB (Abbildung 4-16, gelb) keine Streckenkreuze errichtet werden. Die Strecken sind durch Über- bzw. Unterfahrungen strikt voneinander getrennt. Gebindetransportstrecken werden stets sählig aufgeföhren, um eine Beeinträchtigung des gleisgebundenen Transports zu vermeiden.

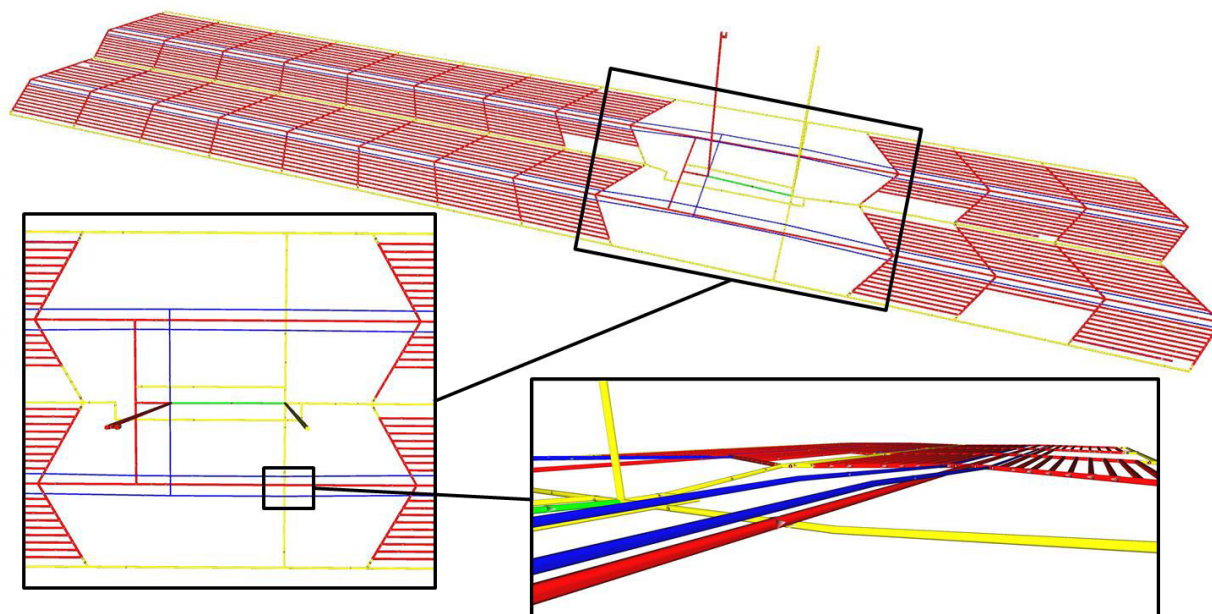


Abbildung 4-16: Grubengebäude gesamt mit Draufsicht Zentralbereich und Detailansicht Überführung der Hauptstrecken

Das Bewetterungskonzept im Rückholungsbetrieb entspricht dem zuvor beschriebenen System aus dem Einlagerungsbetrieb. Auch im Rückholungsbetrieb erfolgt eine bedarfsgerechte Aufföhren der Rückholungsstrecken. Unterschiede in den Bewetterungssystemen bei Einlagerung und Rückholung ergeben sich aus einer veränderten Zuordnung zu den Strahlenschutzbereichen und Anpassungen der Sonderbewetterung. Die Aufföhren aller Rückholungsstrecken erfolgt stets im KB. Diese werden als Blindstrecken ausgeföhrt und müssen, wie auch bei der Einlagerung, sonderbewettert werden. Für den Rückholungsbetrieb wird eine saugende Sonderbewetterung angestrebt.

4.7.2 Randbedingungen

4.7.2.1 Oberflächentemperatur

Beginnend am einziehenden Schacht, definieren die klimatischen Bedingungen an der Oberfläche die Eingangsgrößen der Wetter. Abbildung 4-17 fasst die mittlere Tagestemperatur und die relative Feuchte im Jahresverlauf für Deutschland zusammen. Die Jahresdurchschnittstemperatur liegt bei 8,8°C mit einer Luftfeuchtigkeit von ca. 82 % bzw. einem mittleren Feuchtegehalt von 0,0058 kg Wasser je kg trockene Luft bei Normaldruck. Die mittleren Temperaturen schwanken über den Jahresverlauf um 17,6 K. Die tatsächlichen Tagestemperaturen schwanken zwischen den Extremwerten -15 bis +30°C, siehe Abbildung 4-18.

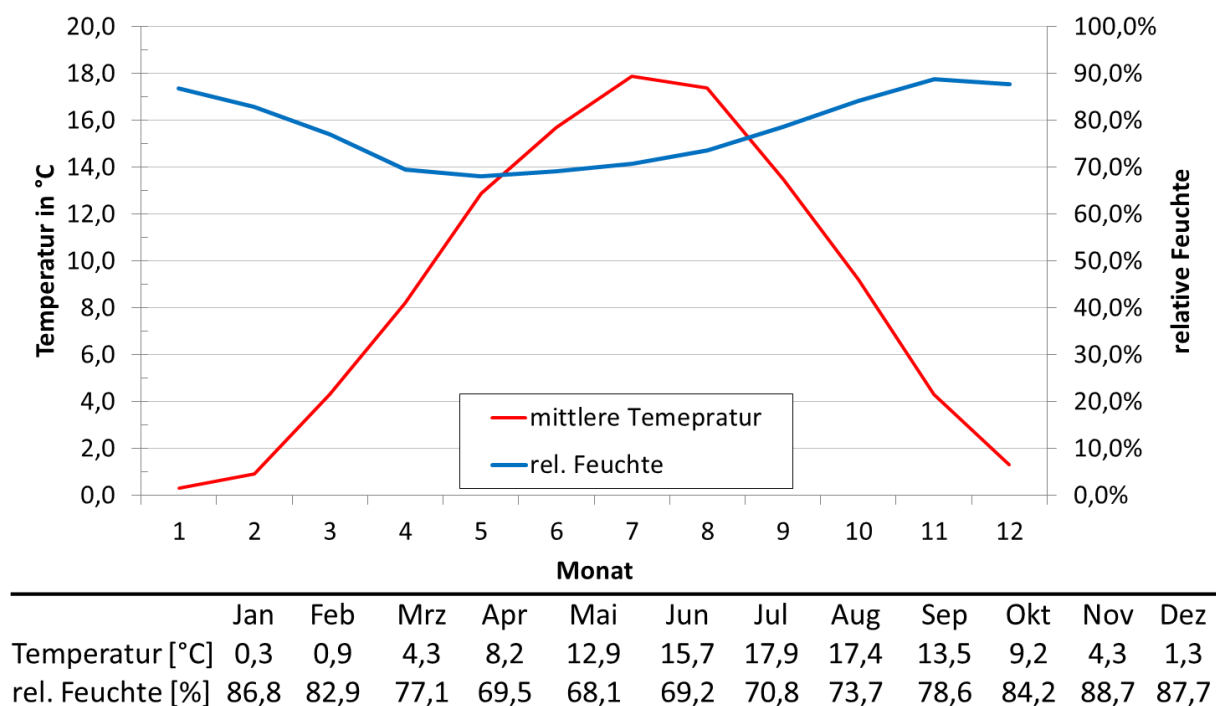


Abbildung 4-17: Temperatur und relative Feuchte im Jahresmittel für Deutschland (DWD, 2015)

Als Eingangsgröße für die Modelle wird eine mittlere Temperatur von 10°C bei einer relativen Feuchte von 82% festgelegt. Hohe Temperaturen über 24°C treten in 0,65% des Jahres, 57 Stunden oder 2,4 Tagen auf. Die mittlere Feuchte beträgt dabei 62%.

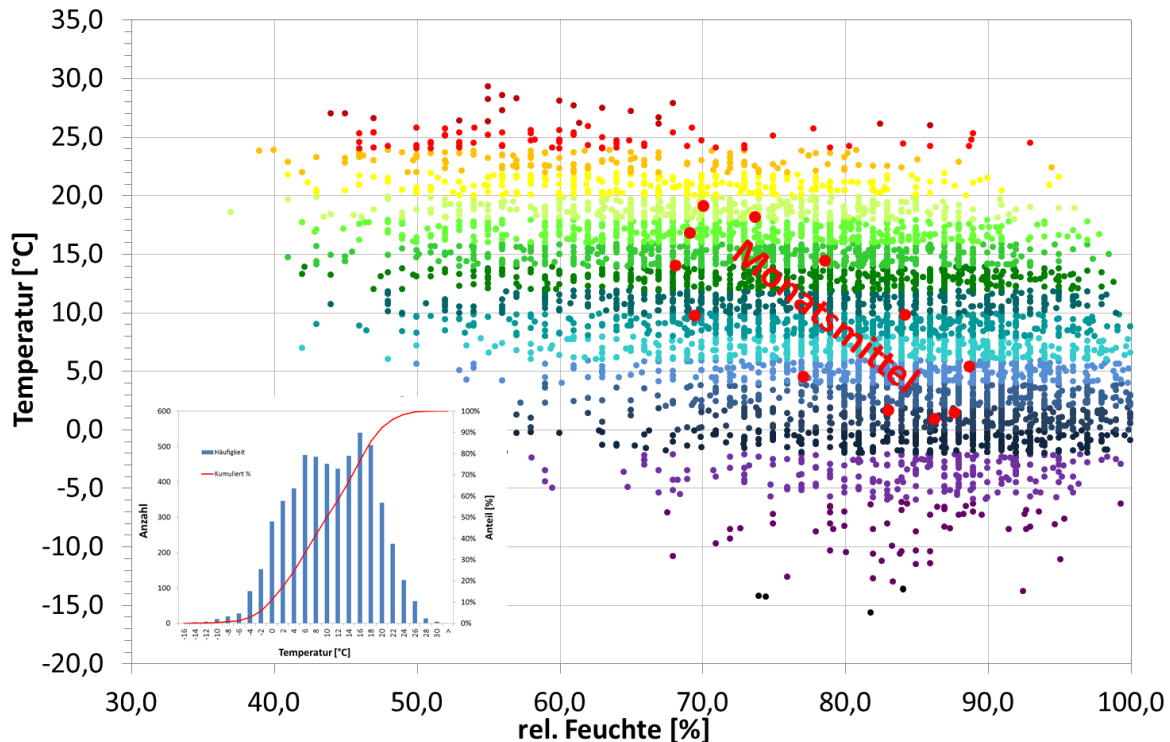


Abbildung 4-18: Mittlere Tagestemperaturen und rel. Feuchte im Betrachtungszeitraum 2000 bis 2014, (DWD, 2015)

Im einziehenden Schacht steigt mit zunehmender Teufe der Luftdruck und führt zu einer Erwärmung der Wetter (Autokompression). Die zugeführte Verdichtungswärme ist abhängig vom Zustand der Luft. Die einziehende Wettermenge hat keinen Einfluss auf die Autokompression. Als Faustregel für trockene Wetter kann eine Temperaturerhöhung um 1 K je 100 m Teufe angenommen werden. Genauer lässt sich die Temperaturerhöhung gemäß Gleichung [4-1] bestimmen:

$$\Delta T = H * \left(\frac{1 + X}{c_L + c_D * X} \right) * g \quad [4-1]$$

| | | |
|------------|------------------------------------|---------------------|
| ΔT | Temperaturdifferenz | K |
| H | Teufe | m |
| X | Feuchtegehalt | kg/kg trockene Luft |
| g | Fallbeschleunigung (9,81) | m/s ² |
| c_L | Wärmekapazität Luft (1.004) | J/kg*K |
| c_D | Wärmekapazität Wasserdampf (1.860) | J/kg*K |

Die Gleichung vernachlässigt die durch eine Verdunstung des Wassers entzogene Wärme. Unter den Bedingungen im Schacht (770 m Teufe) erwärmen sich die Wetter um ca. 7,5 K. Die Eintrittstemperatur der Wetter am Füllort beträgt im Jahresmittel 17,5°C mit einer relativen Feuchte von ca. 50%.

4.7.2.2 Erwartete Temperaturentwicklung im Gebirge

Für die Abschätzung der Temperaturentwicklung im Grubengebäude des Endlagerkonzeptes der Streckenlagerung im Tongestein kann auf Modellrechnungen aus (Jobmann & Lommerzheim, 2015) zurückgegriffen werden. Das Endlagerkonzept berücksichtigt eine Auslegungstemperatur von 150°C. Ältere Konzepte, wie beispielsweise (DBE TEC, 2007) GENESIS, berücksichtigen eine Auslegungstemperatur von 100°C.

Nach der Einlagerung steigt die Temperatur am Behälter sehr schnell an. Die maximale Auslegungstemperatur am Behälter wird innerhalb der Betriebszeit erreicht und sinkt danach langsam ab. Innerhalb des Querschnitts der Einlagerungsstrecken ist das Temperaturprofil durch steile Gradienten geprägt. Am Stoß werden im Rückholungszeitraum Temperaturen bis 105°C erwartet. Das Temperaturmaximum tritt hier aber erst am Ende des möglichen Rückholungszeitraums auf, siehe Abbildung 4-19. Für die Konzeption des Bewetterungssystems wird ein Beobachtungspunkt am Ende der Betriebszeit, 40 Jahre nach Einlagerungsbeginn, gewählt.

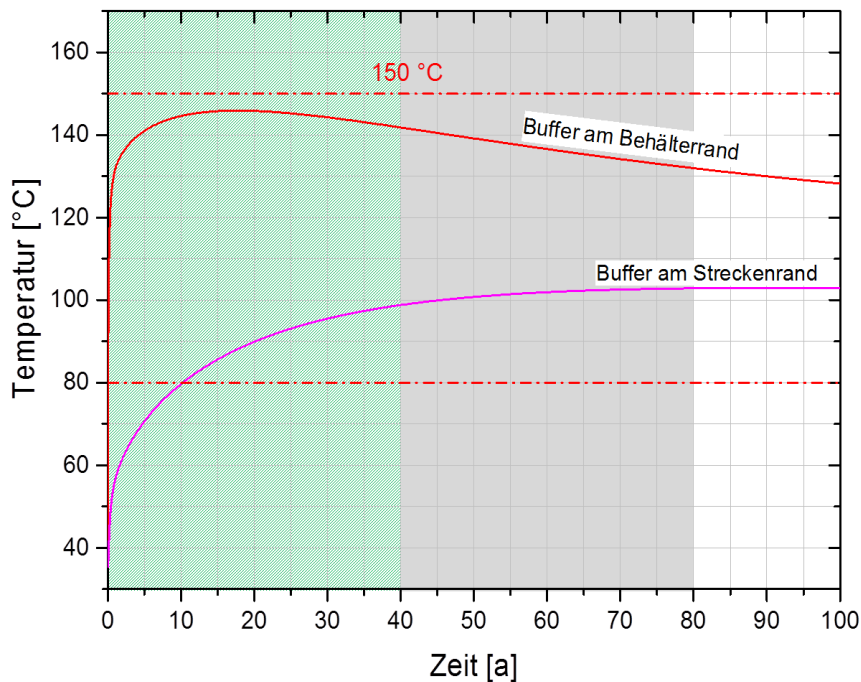


Abbildung 4-19: Temperaturverlauf im Buffer um den Behälter, grün = Betriebszeit, grau = möglicher Rückholungszeitraum

Die Gebirgsbereiche zwischen den Einlagerungsstrecken werden im Zeitraum bis 80 Jahre nach der Einlagerung auf ca. 95°C erwärmt. Zu den Behältern hin steigt die Temperatur stetig an, siehe Abbildung 4-20.

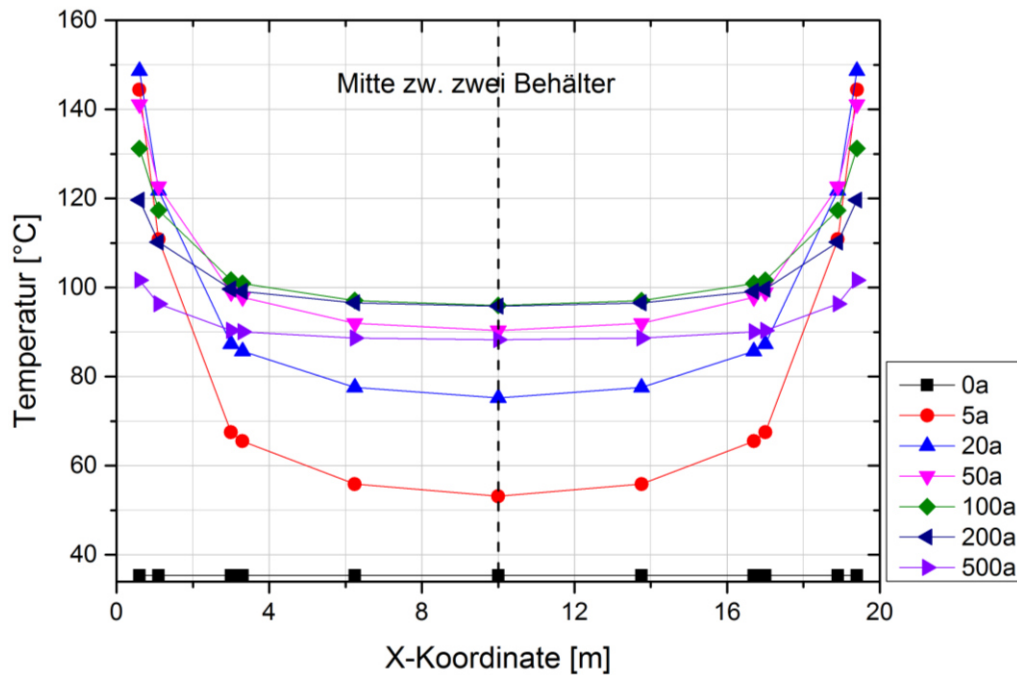


Abbildung 4-20: Temperaturverlauf zwischen zwei Einlagerungsstrecken

Abbildung 4-21 und Abbildung 4-22 zeigen die Temperaturentwicklung radial und axial zum Behälter. In den Versatzbereichen zwischen zwei Behältern steigt die Temperatur innerhalb von 80 Jahren ebenfalls bis auf ca. 100°C.

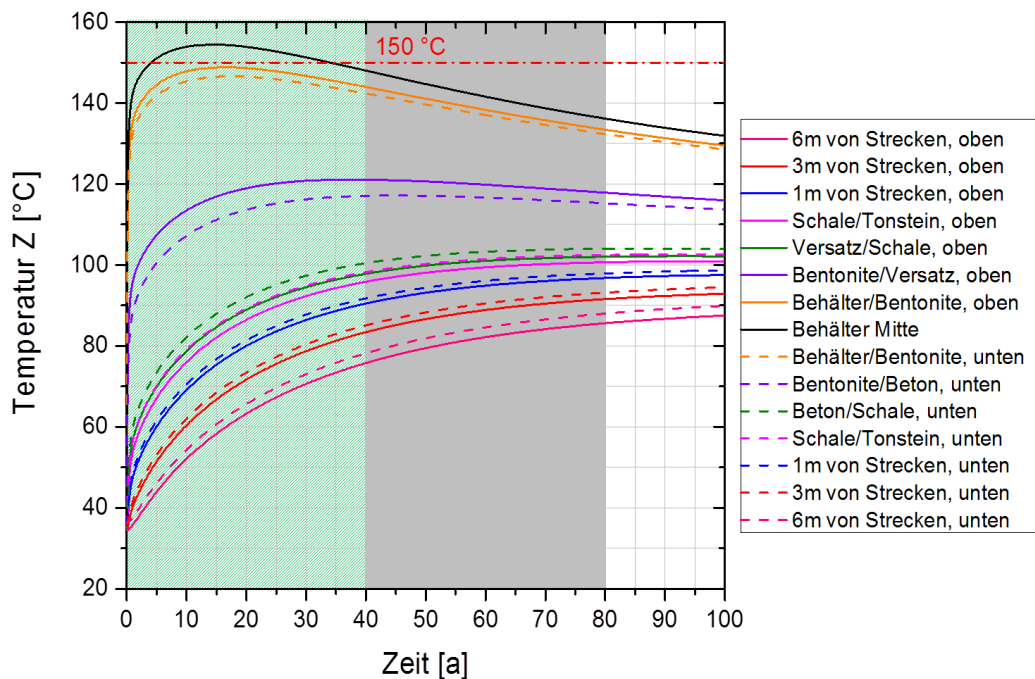


Abbildung 4-21: Temperaturentwicklung radial zur Behälterachse, grün = Betriebszeit, graun = möglicher Rückholungszeitraum

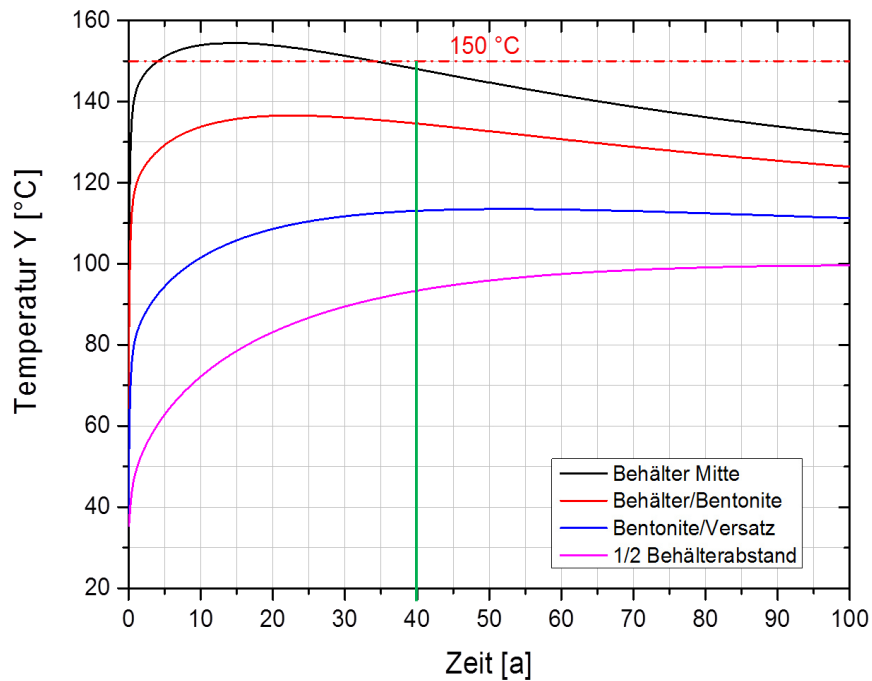


Abbildung 4-22: Temperaturentwicklung längs der Behälterachse, grün = Beginn der Rückholung (Beobachtungszeitpunkt)

Die durchgeführten Berechnungen erlauben eine Abschätzung der Temperaturverteilung im gesamten Endlager. Wie bereits in den vorangegangenen Abschnitten erläutert, wird angenommen, dass die Rückholung zum spätestmöglichen Zeitpunkt erfolgt. Mit Rückholungsbeginn liegen einige der Abfälle bereits mehrere Jahrzehnte im Grubengebäude. Diese ersten Einlagerungsbereiche, in den schachtfernen Einlagerungsfeldern, kennzeichnen die wärmsten Bereiche des Grubengebäudes, siehe Abbildung 4-23. Direkt am Behälter treten teils Temperaturen nahe der Auslegungstemperatur (150°C) auf. In den Hauptstrecken werden Temperaturen zwischen 95°C und der natürlichen Gebirgstemperatur erwartet. Zu den Schächten hin sinkt die Temperatur stetig.

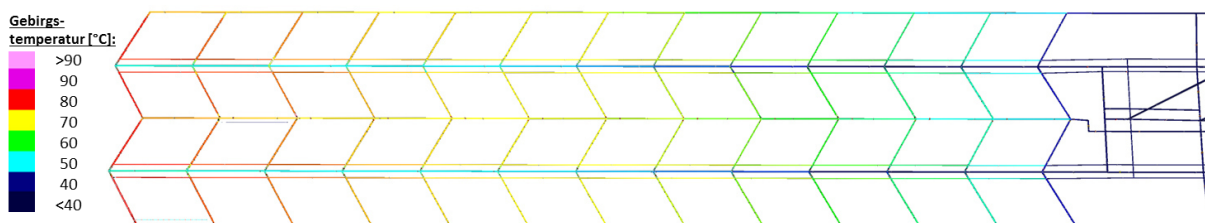


Abbildung 4-23: Erwartete Gebirgstempertur in den Hauptstrecken und Querschlägen 40 Jahre nach Einlagerungsbeginn

4.7.2.3 Feuchteeintrag

Der Zutritt von Porenwasser aus dem Gebirge kann als Feuchtequelle die Eigenschaften der Wetter und damit die klimatischen Bedingungen im Grubengebäude beeinflussen. Im Zuge der Auffahrungen wird das Wirtsgestein entsättigt. Der Wetterstrom nimmt Teile des Porenwassers auf. Der Wassergehalt des Wirtsgesteins des Referenzmodells NORD liegt nach (Jahn & Sönnke, 2013) bei $ca. 5,6 \pm 1,1$ Gew.-%. Informationen zur Zutrittsrate in das Grubengebäude liegen nicht vor. Eine vorläufige Abschätzung der Zutrittsmengen soll daher anhand bekannter Literaturquellen erfolgen. (Mayor & Velasco, 2008) fasst die Untersuchungen zum "Ventilation Experiment" im Untertagelabor Mont Terri (Schweiz) zusammen, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Im Experiment wurden die Wechselwirkungen zwischen Wetter und dem Opalinuston untersucht. Der natürliche Wassergehalt des Opalinustons am Standort Mont Terri beträgt $ca. 6,6$ Gew.-% und ist mit dem erwarteten Wassergehalt im Referenzmodell NORD vergleichbar.

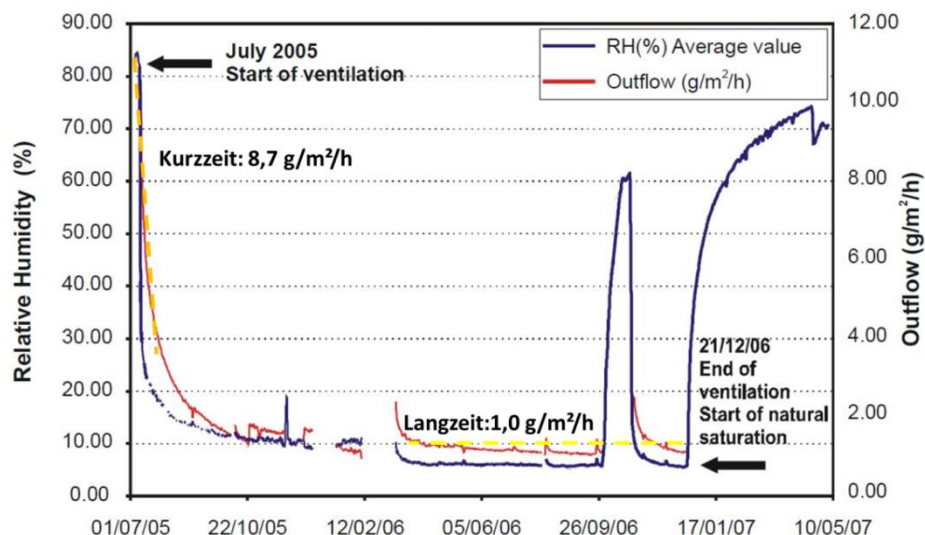


Abbildung 4-24: Zutrittsraten und relative Luftfeuchte während der 2. Phase des "Ventilation Experiments" im Untertagelabor Mont Terri (Mayor & Velasco, 2008)

Der Zufluss des Porenwassers ist zeitlich variabel. Direkt bei der Auffahrung treten vergleichsweise große Mengen Wasser aus dem vollständig gesättigten Gebirge aus und werden vom Wetterstrom aufgenommen. Mit zunehmenden Streckenalter sinkt der Volumenstrom und erreicht einen konstanten Wert.

Für die Wettermodelle wird zwischen einer Kurzzeit- und Langzeitrate des Zutritts unterschieden. Die kurzzeitige Zutrittsrate von $8,7 \text{ g/m}^2/\text{h}$ wird in allen Streckenvortrieben angenommen. Zeitlich findet die kurzzeitige Zutrittsrate nur im Zeitraum zwischen der Auffahrung und dem Einbringen des Ausbaus Anwendung. Räumlich wird die kurzzeitige Zutrittsrate auf den Bereich zwischen der Ortsbrust und dem Austritt der Sonderbewetterung berücksichtigt. Als Faustformel gilt ein Abstand der Austrittsöffnung von $5 \cdot \sqrt{A}$ zur Ortsbrust. Der Feuchteein-

trag wird in Form einer Punktquelle (0,7 bis 2,1 g/s, je nach Strecke, vgl. Tabelle 4-1) an der Ortsbrust berücksichtigt.

Innerhalb aller ausgebauten Strecken wird die Langzeitzutrittsrate von 1,0 g/m²/h berücksichtigt. Abbildung 4-25 verdeutlicht die Einteilung innerhalb einer Vortriebsstrecke.

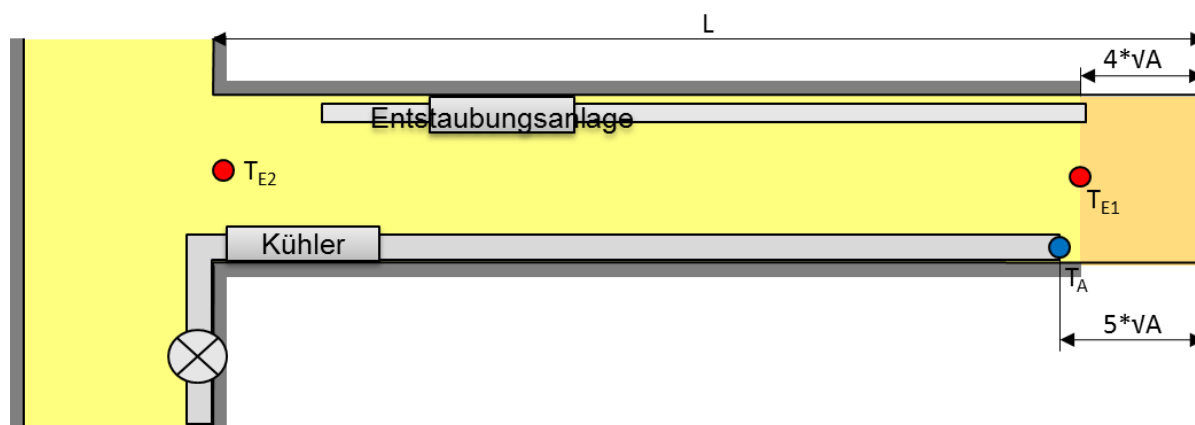


Abbildung 4-25: Zuordnung der Zutrittsraten im Vortrieb und übrigen Grubengebäude, Orange= Kurzzeirate, Gelb=Langzeirate

Für die Gebindettransportstrecken ist je Streckenmeter ein konstanter Zufluss von 25,8 g/h oder $7,2 \cdot 10^{-3}$ ml/s zu erwarten. Für die Frisch- und Abwetterstrecken sind auf Grund der kleineren Querschnitte geringere Zutrittsmengen zu erwarten. Tabelle 4-1 fasst die erwarteten Zutrittsmengen in den Hauptstrecken zusammen. Aus den Hauptstrecken des gesamten Grubengebäudes ist ein konstanter Feuchteeintrag von ca. 260 g/s zu erwarten. Mit den erwarteten Zutrittsraten kann das Grubengebäude als trocken klassifiziert werden (*wetness fraction* – *dry* = 0,1).

Tabelle 4-1: Übersicht Zutrittsmengen in den Hauptstrecken

| | | Gebindettransport- strecke | Frischwetter- strecke | Abwetter- strecke |
|--------------------------|---------------------|-------------------------------|--------------------------|----------------------|
| | | Kurzzeit | | |
| Zutrittsrate | g/m ² /h | 8,7 | 8,7 | 8,7 |
| Länge $5 \cdot \sqrt{A}$ | m | 31,6 | 27,4 | 19,4 |
| Fläche | m ² | 855,9 | 594,2 | 297,7 |
| Zutritt am Vortrieb | g/h | 7.446,0 | 5.169,1 | 2.590,2 |
| | g/s | 2,1 | 1,4 | 0,7 |
| | | Langzeit | | |
| Zutrittsrate | g/m ² /h | 1 | 1 | 1 |
| Zutritt pro m Strecke | g/h | 25,8 | 20,6 | 14,6 |
| | g/s | 7,2E-03 | 5,7E-03 | 4,1E-03 |
| Gesamtlänge | m | 11000 | 16500 | 22000 |
| Zutritt gesamt | g/s | 78,8 | 94,4 | 89,2 |

4.7.2.4 Wettertechnische Eigenschaften der Grubenbaue

Das Endlagerkonzept der horizontalen Streckenlagerung im Tongestein (DBE TEC, 2015) benennt die erforderlichen freien Querschnitte der Grubenbaue, siehe Tabelle 4-2. Die Ausgestaltung der Querschnitte wurde bisher nicht näher definiert. Für die Wetternetzmodelle werden deshalb vorläufige Streckenquerschnitte definiert, siehe Abbildung 4-26. Die Querschnitte entsprechen den bekannten Vorgaben und Anforderungen. Die Gebindetransportstrecke muss eine Gleisanlage und einen Fahrweg für gleislose Fahrzeuge berücksichtigen. Die Querschnitte besitzen den gleichen Streckenquerschnitt. In der Frischwetterstrecke ist Raum für eine Bandanlage, einen Lüfter sowie für Personen- und Maschinenfahrwege bereitzuhalten. Bandanlage und Lüfter führen lokal zu einer Querschnittsminderung um ca. 3,5 m². In der Abwetterstrecke sollen möglichst keine zusätzlichen Widerstände oder Querschnittsverengungen installiert werden.

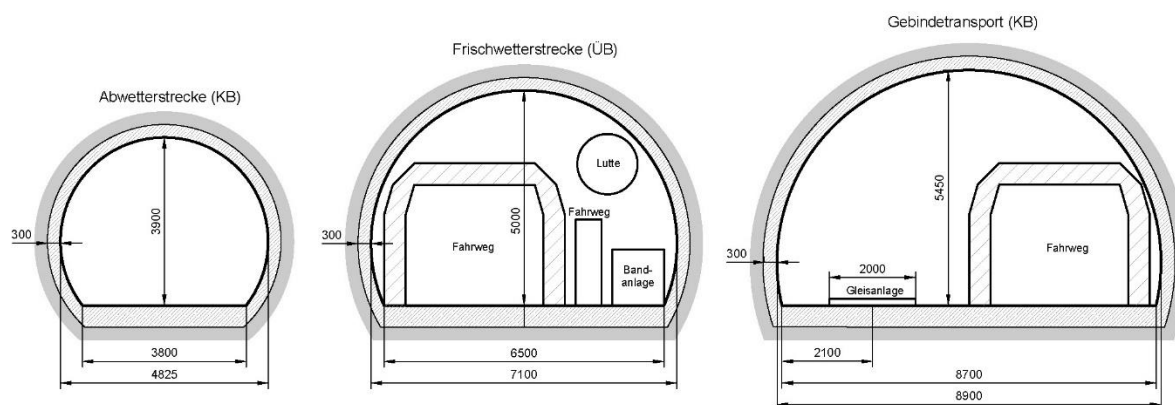


Abbildung 4-26: Querschnitte der Hauptstrecken

Das Profil der Rückholungsstrecke wurde abweichend von (ANSICHT) an die Erfordernisse des Rückholungsbetriebes angepasst.

Für die Abwetterstrecke wird ein möglichst kreisrunder Querschnitt gewählt. Im Modell wird allen Abwetterstrecken der äquivalente hydraulische Durchmesser zugewiesen. Die Gebindetransport- und Frischwetterstrecken werden als gewölbte Strecken mit entsprechender Breite und Höhe dargestellt. Alle Grubenbaue werden mit einem für einen glatten Betonausbau typischen Reibungsfaktor ($\lambda = 0,022$) versehen.

Tabelle 4-2: Geometrie der Streckenquerschnitte

| Grubenbau | Freier Querschnitt [m ²] | Umfang [m] | Hydr. Durchmesser [m] |
|-------------------------|--------------------------------------|------------|-----------------------|
| Gebindetransportstrecke | 40,0 | 24,8 | 6,5 |
| Querschlag | 40,0 | 24,8 | 6,5 |
| Rückholungsstrecke | 24,0 | 20,5 | 5,2 |
| Abwetterstrecke | 15,8 | 14,6 | 4,3 |
| Frischwetterstrecke | 29,8 | 20,6 | 5,8 |

4.7.2.5 Klimagrenzwerte

Der sichere Betrieb des Endlagers muss stets den Schutzzielen und sicherheitstechnischen Anforderungen des Bergbaus entsprechen (ESK, 2015). Dies gilt auch für den Rückholungsbetrieb. Innerhalb des Grubengebäudes sind stets die Temperaturgrenzwerte der "Bergverordnung zum Schutz der Gesundheit gegen Klimaeinwirkungen" (kurz Klima-Bergverordnung – KlimaBergV) einzuhalten. Für untertägige Bergbaubetriebe außerhalb des Salzbergbaus gilt die Effektivtemperatur als Kenngröße. Die Effektivtemperatur wird mittels der Trocken- und Feuchttemperatur sowie der Strömungsgeschwindigkeit bestimmt. Die Bestimmung erfolgt grafisch über das Nomogramm nach Yaglou, siehe Abbildung 4-27. Die KlimaBergV gibt folgende Grenzwerte vor:

- Reduzierung der Beschäftigungszeit auf 6 h, wenn Trockentemperatur täglich mehr als 3 h über 28°C bzw. Effektivtemperaturen zwischen 25 und 29°C liegt
- Reduzierung der Beschäftigungszeit auf 5 h, wenn Effektivtemperatur täglich mehr als 2,5 h zwischen 29 und 30°C liegt
- Beschäftigungsverbot ab 30°C Effektivtemperatur
- im Einzelfall kurzzeitige Beschäftigung bis 32°C Effektivtemperatur möglich

Die kurzzeitige Beschäftigung bei Effektivtemperaturen über 30°C kann in Ausrichtungs-, Vorrichtungs-, Herrichtungs- und Raubbetrieben realisiert werden. Zeitlich dürfen diese Arbeiten aber *"...nicht länger als 6 Monate ohne Unterbrechung geführt werden"* (KlimaBergV 83). Als Unterbrechung ist ein Zeitraum von wenigstens sechs Wochen definiert.

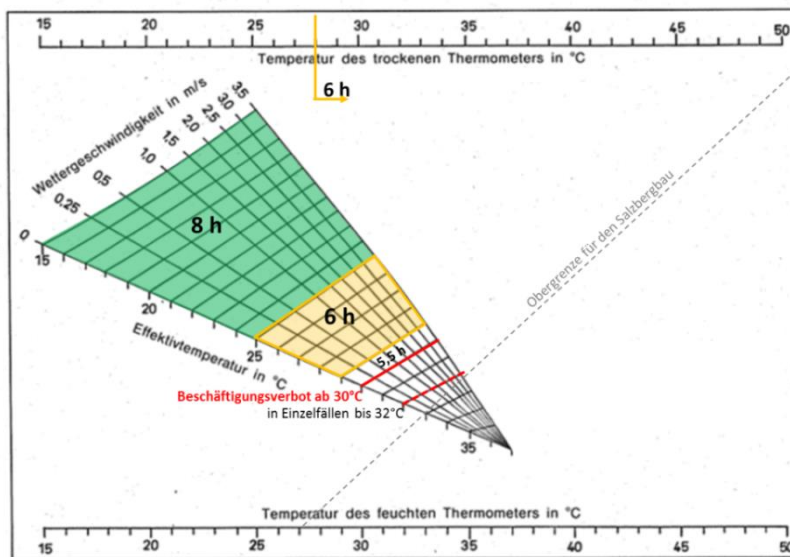


Abbildung 4-27:
Grenzen der Beschäftigung in Abhängigkeit der Normal-Effektivtemperatur

4.7.3 Modelle

Der Aufbau des Grubengebäudes und auch das Bewetterungskonzept wurden bereits in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben. Die Einlagerung der Behälter direkt in der Strecke erfordert eine höhere Anzahl an Einlagerungsfeldern. Im Vergleich zum Einlagerungskonzept der vertikalen Bohrlochlagerung ist das Grubengebäude für die horizontale Streckenlagerung deutlich größer. Zur Abschätzung der Bedingungen im Grubengebäude wurden zwei Modelle erarbeitet, siehe Abbildung 4-28. Das Modell 1 bildet Auffahrungstätigkeiten in den Hauptstrecken ab und repräsentiert die Neuauffahrung des Grubengebäudes. Das Modell 2 repräsentiert den eigentlichen Rückholungsbetrieb und bildet dazu unterschiedliche Betriebspunkte in vier verschiedenen Einlagerungsfeldern, verteilt auf beiden Einlagerungsbereiche des Grubengebäudes, ab. Die gleichzeitige Rückholung in beiden Einlagerungsbereichen führt zu einer erhöhten Anzahl offener Strecken bzw. einem erhöhten Wetterbedarf und gilt somit als abdeckend. Das Modell 2 berücksichtigt nur die an die aktiven Einlagerungsfelder angeschlossenen Hauptstrecken und 50% der Querschläge.

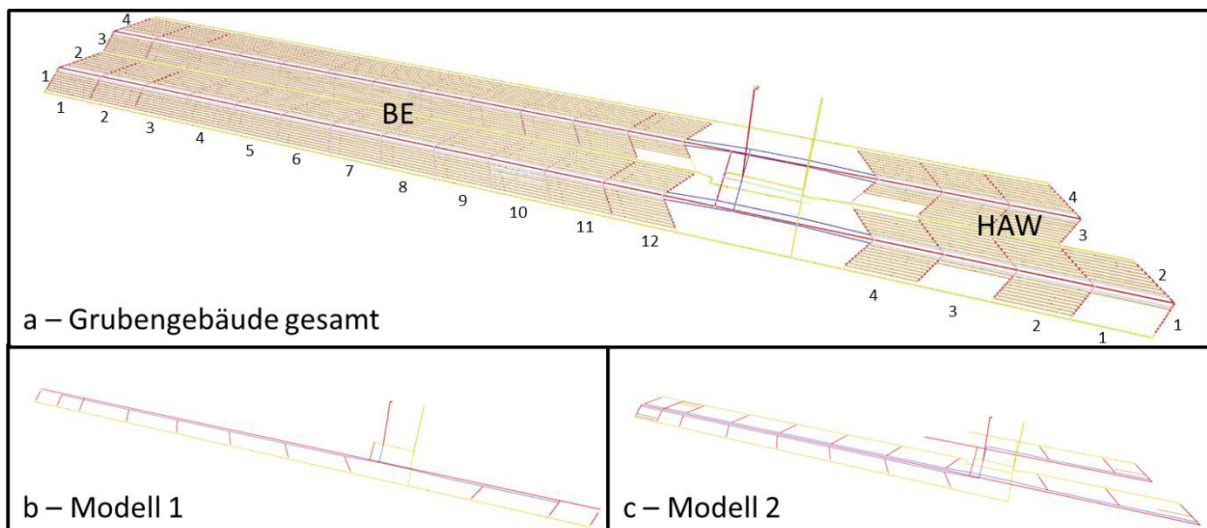


Abbildung 4-28: Übersicht Modelle

4.7.3.1 Auffahrung der Hauptstrecken – Modell 1

Mit der Neuauffahrung des Grubengebäudes werden alle bereits versetzen und verschlossenen Strecken wieder geöffnet. Die Auffahrung wird nach dem in Abschnitt 4.1 beschriebenen Schema durchgeführt. An jedem Vortriebsort wird eine mittelschwere Teilschnittmaschine, stellvertretend für die Vortriebstechnik, berücksichtigt. Das Haufwerk wird mit Ladern von der Ortsbrust zur Bandanlage gefördert. Alle Lader sollen mit Elektromotoren angetrieben werden. Der Einsatz elektrischer Antriebe soll den Wärmeeintrag der Maschinen reduzieren.

Im Modell werden in Summe vier Vortriebe berücksichtigt, zwei je Endlagerflügel. Die Auffahrungen finden in der Gebindetransportstrecke und der Bergbaustrecke statt. Von beiden Strecken aus können auch die Querschläge errichtet werden. Mit der Auffahrung der Querschläge kann ein umläufiger Wetterkreislauf errichtet werden. Die Vortriebsstrecken selbst sind zunächst mit einer Sonderbewetterung auszustatten. Entsprechend des Endlagerlayouts entstehen während der Wiederauffahrung sonderbewetterte Vortriebslängen von bis zu ca. 1200 m. In diesem Fall erstreckt sich der Vortrieb parallel zu zwei Einlagerungsfeldern und über einen Querschlag.

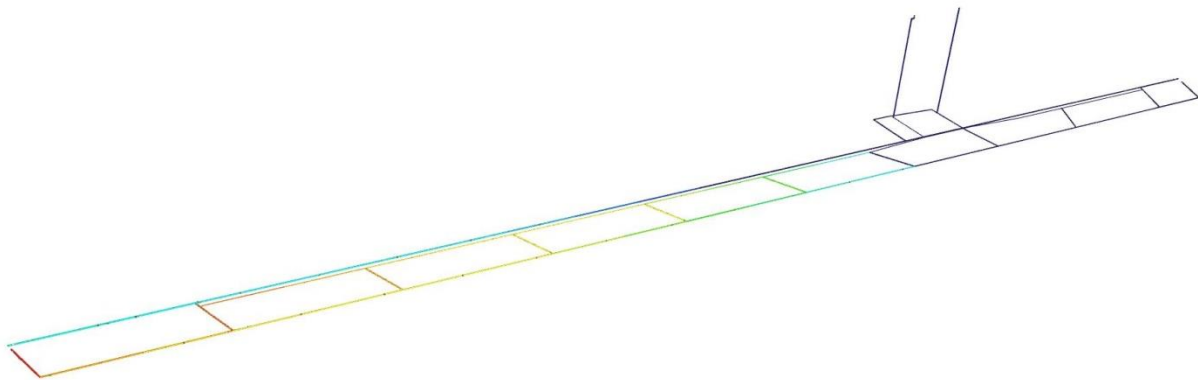


Abbildung 4-29: Modell M1 zur Simulation der Auffahrungsprozesse mit vier Betriebspunkten

Der der Vortriebe ist mit wenigstens $1.000 \text{ m}^3/\text{min}$ zu bewettern. Unter den angenommenen Umgebungsbedingungen (Jahresmitteltemperatur) weisen die einziehenden Wetter Effektivtemperaturen unter 20°C auf. Für den kurzen Endlagerflügel der HAW-Abfälle, in dem eine geringere Wärmentwicklung zu erwarten ist, ist unter den getroffenen Annahmen eine Einhaltung der Temperaturgrenzen ohne zusätzlichen technischen Kühlaufwand möglich.

Im größeren Einlagerungsflügel für ausgediente Brennelemente steigen die Gebirgstemperaturen vom schachtnahen Bereich hin zu den schachtfernen Einlagerungsfeldern stetig an. Der Wärmeeintrag aus dem Gebirge und der zusätzliche technische Wärmeeintrag der Maschinen führen zu stetig steigenden Wettertemperaturen. In den Hauptstrecken der schachtfernen Einlagerungsfelder ist eine Einhaltung der zulässigen Temperaturgrenzen nur mit zusätzlicher technischer Kühlung möglich. Der Kühlbedarf innerhalb der einzelnen Vortriebsstrecken steigt bis auf 460 kW_R .

4.7.3.2 Auffahrung in den heißen Bereichen und Rückholung – Modell 2

Das Modell 2 repräsentiert die Bedingungen während des laufenden Rückholungsbetriebes. Die im Modell 1 simulierten Auffahrungsarbeiten der Hauptstrecken sind weiter vorangeschritten. Damit sind ca. 50 % der Einlagerungsfelder durch die Hauptstrecken erschlossen. Die Streckenvortriebe finden weiterhin statt. Zusätzlich zu den Betriebspunkten der Vortriebe werden im Modell 2 auch Betriebspunkte für die Rückholung selbst eingeführt. Tabelle 4-3 fasst die unterschiedlichen Betriebspunkte, deren Anzahl im Modell sowie Wetterbedarf und die wesentlichen Verbraucher zusammen. In Summe ergibt sich für beide Endlagerflügel ein Wetterbedarf von 8.800 m³/min oder 147 m³/s. Für die Grubennebenräume des Infrastrukturbereiches wird pauschal ein Wetterbedarf von 10.000 m³/min unterstellt. Alle weiteren offenen Strecken werden mit einem Mindestwetterstrom versorgt. Daraus ergibt sich für das gesamte Grubengebäude ein Gesamtwetterstrom in Höhe von ca. 20.000 m³/min oder 333 m³/s. (DBE TEC, 2010)

Tabelle 4-3: Wetterbedarf der Betriebspunkte

| Betriebspunkt | Anzahl | Wetterbedarf [m ³ /min] | Verbraucher |
|-----------------------|--------|---------------------------------------|---|
| Hauptstreckenvortrieb | 2 | 1000 | TSM, E-Lader, Entstaubungsanlage |
| Rückholung | 4 | 850 | Manipulator, E-Lader |
| Erkundung | 1 | 200 | Bohrmaschine, kl. Fahrzeuge |
| Instandhaltung Ausbau | 1 | 200 | Ankerwagen und Spritzbetonfahrzeug, diesel-elektrisch |
| Gleisbau | 1 | 200 | kl. Fahrzeuge |
| Versatz | 2 | 1400 | Schleudertruck |

Die Betriebspunkte verteilen sich über das gesamte Grubengebäude und beide Endlagerflügel. Wie in Abschnitt 4 beschrieben, beginnen die Rückholungstätigkeiten in den schachtnahen Einlagerungsfeldern. Das Modell 2 weicht von diesem Ansatz ab. Die aktiven Rückholungsstrecken bzw. die Betriebspunkte der Rückholung wurden in schachtferne Einlagerungsfelder gelegt. Hier treten deutlich erhöhte Gebirgstemperaturen rund um die Behälter auf. Wenn das Bewetterungskonzept in diesen Bereichen umgesetzt werden kann, ist auch die Bewetterung der restlichen Bereiche möglich.

In den Einlagerungsfeldern BE 1.1 und BE 2.2 werden jeweils zwei aktive Rückholungsstrecken berücksichtigt. Der Betriebspunkt der Erkundung liegt im letzten Querschlag, am Einlagerungsfeld BE 2.1. Der Betriebspunkt der Instandhaltung liegt im Querschlag des Einlagerungsfeldes BE 1.3. Die Betriebspunkte zu den Versatzarbeiten liegen im HAW-Einlagerungsflügel.

Alle aktiven Einlagerungsstrecken werden nach dem in Abbildung 4-30 dargestellten Schema bewettert. Die Sonderbewetterung soll trotz der hohen Umgebungsbedingungen saugend ausgeführt werden, um anfallende Stäube möglichst vollständig fassen zu können und so eine mögliche Kontaminationsverschleppung zu vermeiden, vgl. dazu auch Abschnitt 4.5. Für jede Sonderbewetterung ist eine Entstaubung vorgesehen. Die Lutten sollen mit einem

Durchmesser von 1,2 m als Stahlblechlutten ausgeführt werden. Die Entstaubungsanlagen können im Querschlag aufgestellt werden. Die Lutten werden aus den Rückholungsstrecken über den Querschlag bis in die Abwetterstrecke geführt. Die Positionierung der Auslassöffnung in den Abwetterstrecken erlaubt die Trennung der heißen und ggf. Staubbelasteten Wetter vom Arbeitsbereich in den Querschlägen.

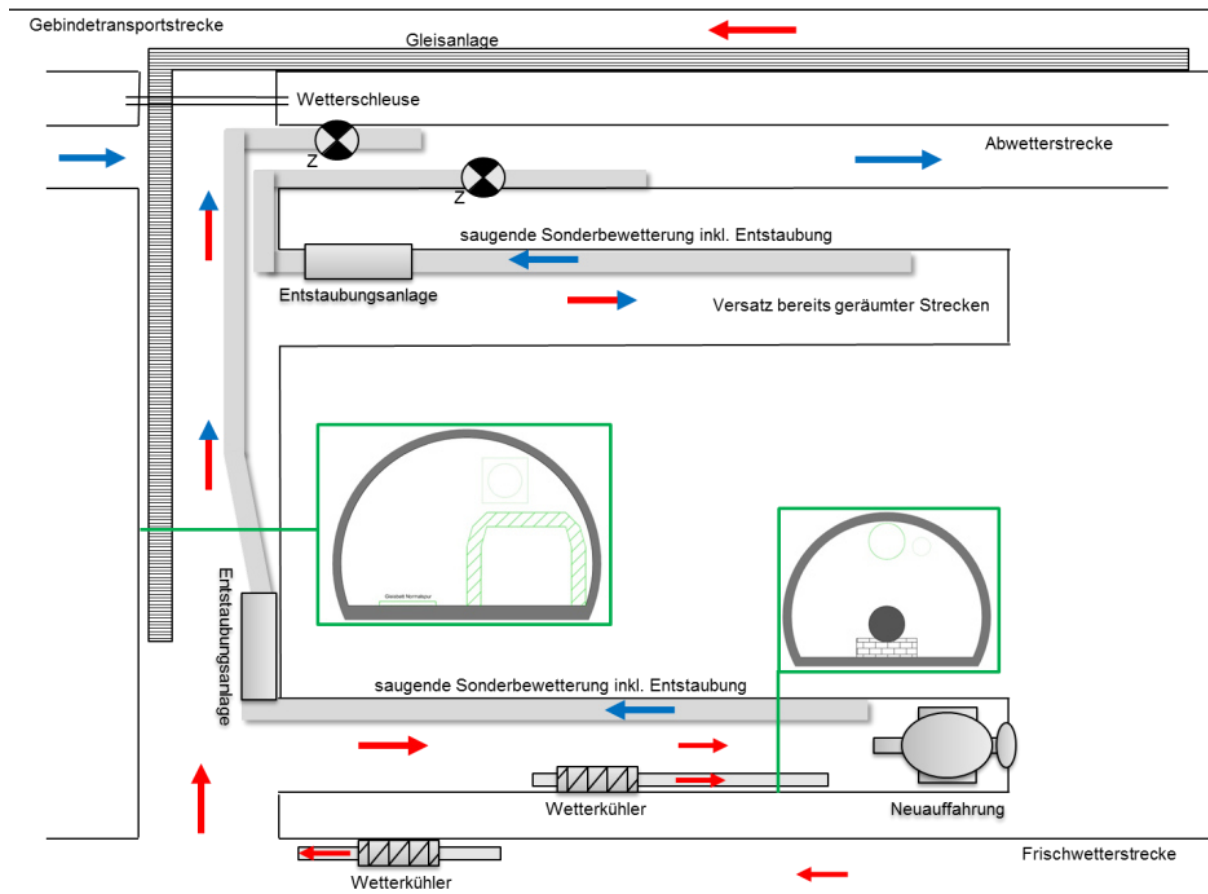


Abbildung 4-30: Skizze Bewetterungskonzept im Querschlag bei Rückholung

Die Neuauffahrung schreitet vergleichsweise langsam voran. Die Ursachen liegen in den ungünstigen Umgebungsbedingungen. So muss die alte Strecke wieder aufgewältigt werden, Ausbau muss ggf. erneuert werden und im Wechsel zu Auffahrung findet auch die Rückholung statt.

In den heißesten Einlagerungsfeldern werden innerhalb der Rückholungsstrecke Temperaturen bis 90°C erwartet. In direkter Nähe zum Behälter kann die Temperatur auch nahe der Auslegungsgrenze liegen. Die Temperaturfelder innerhalb der Rückholungstrecken sind durch diese stetigen Schwankungen gekennzeichnet. Am Behälter treten hohe Temperaturen, nahe der Auslegungsgrenze auf, in den versetzten Streckenteilen zwischen den Behältern liegen die Temperaturen bei bis zu 90°C. Die unterschiedlichen Temperaturen werden im Modell durch eine in regelmäßige Abschnitte unterteilte Strecke dargestellt. An den Lagerten der Behälter wird eine ursprüngliche Gebirgstemperatur von 140°C berücksichtigt. In den versetzten Strecken zwischen den Behältern wird eine ursprüngliche Gebirgstemperatur von 85°C angenommen. Mit fortschreitender Auffahrung und Offenstandszeit wird Wärme

über die Wetter abgeführt. Dieser Alterungseffekt wird über das Streckenalter abgebildet. Die Vortriebsgeschwindigkeit liegt bei ca. 3 m pro Arbeitstag. Die Rückholdauer für eine Einlagerungsstrecke wird gemäß der berechneten Vortriebsleistung auf 0,42 Jahre oder rund 150 Tage geschätzt. Mit der bevorzugten saugenden Sonderbewetterung müssen die einziehenden Wetter auf dem Weg zur Ortsbrust die heißen und bereits geräumten Teile der Einlagerungsstrecke passieren. dabei kommt es zu einem stetigen Wärmeaustausch. Im Modell wird als abdeckender Fall die Rückholung des letzten Behälters in einer Einlagerungsstrecke betrachtet, siehe Abbildung 4-31. Innerhalb der Strecke teilt sich der Wärmeeintrag zu etwa gleichen Teilen in Wärme aus dem Gebirge und Abwärme aus den Maschinen.

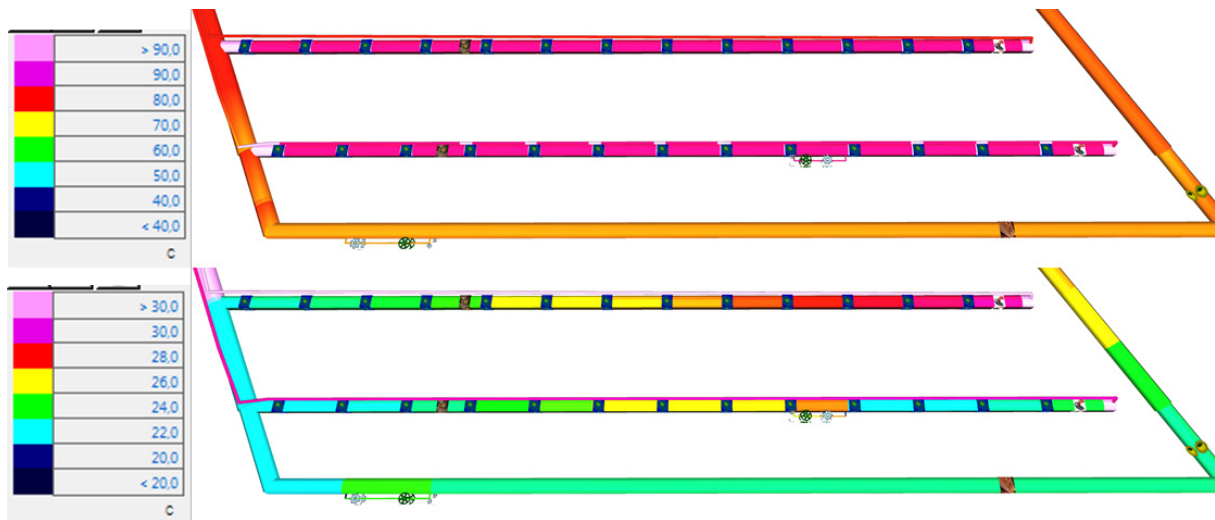


Abbildung 4-31: erwartete Effektivtemperaturen (unten) saugender Bewetterung und zusätzlicher Kühlung im vordern Teil der Rückholdungsstrecke im Vergleich zur Gebirgstempertur vor Auffahrung (oben)

Der Frischwetterstrom zieht direkt vom Infrastrukturbereich über die Hauptstrecke des ÜB zum Einlagerungsfeld. Eine signifikante Erwärmung der Wetter findet im Bereich der letzten, besonders warmen Einlagerungsfelder statt. Diese Bereiche liegen vier bis fünf Kilometer vom Schacht entfernt. Am Eintritt in den letzten Querschlag weisen die Wetter eine Effektivtemperatur von ca. 24°C auf. Durch einen zusätzlichen Wetterkühler innerhalb der Hauptstrecke wird die Effektivtemperatur auf 22°C gesenkt. Dazu wird ein Teilwetterstrom (7,5 m³/s) durch einen Wetterkühler mit 300 kW_R Kühlleistung geleitet. Die Abwärme der Anlage wird in einem benachbarten Querschlag abgegeben. Unter den beschriebenen Bedingungen ist eine Einhaltung der Temperaturgrenzwerte an der Ortsbrust nicht ohne zusätzliche Kühlmaßnahmen möglich. Die Effektivtemperatur im Arbeitsbereich der TSM bzw. am Ort der Rückholung steigt bis auf 34°C. Mit der Einrichtung eines zweiten Wetterkühlers innerhalb der Rückholdungsstrecke können die Temperaturgrenzwerte auch an der Ortsbrust eingehalten werden.

Dem Teilsystem eines Einlagerungsfeldes mit zwei aktiven Rückholdungsstrecken wird eine Wärmemenge von bis zu 1,7 MW zugeführt, siehe Abbildung 4-32. Je Rückholdungsstrecke entfallen davon ca. 0,4 MW auf die Gebirgswärme und ca. 0,3 MW auf die Ausrüstung. Die zugeführten Wetter können nicht genug der Gesamtwärmemenge abführen, um die Tempe-

raturgrenzwerte in jedem Bereich einzuhalten. Zusätzliche technische Kühlungen sind nötig. Dabei ist jeder Aktive Querschlag und jede aktive Rückholungsstrecke zu kühlen. In den wärmsten Einlagerungsfeldern wird dazu eine Kühlleistung von 300 kW_R abgeschätzt. In kühleren Einlagerungsfeldern reduziert sich die notwendige Kühlleistung entsprechend. Im HAW-Flügel ist eine Einhaltung der Grenztemperaturen auch ohne zusätzliche technische Kühlung möglich. Die benötigte Gesamtkühlleistung des Rückholungsbergwerkes hängt damit stark von der Anzahl der Betriebspunkte bzw. der Anzahl der aktiven Einlagerungsfelder und Rückholungstrecken ab.

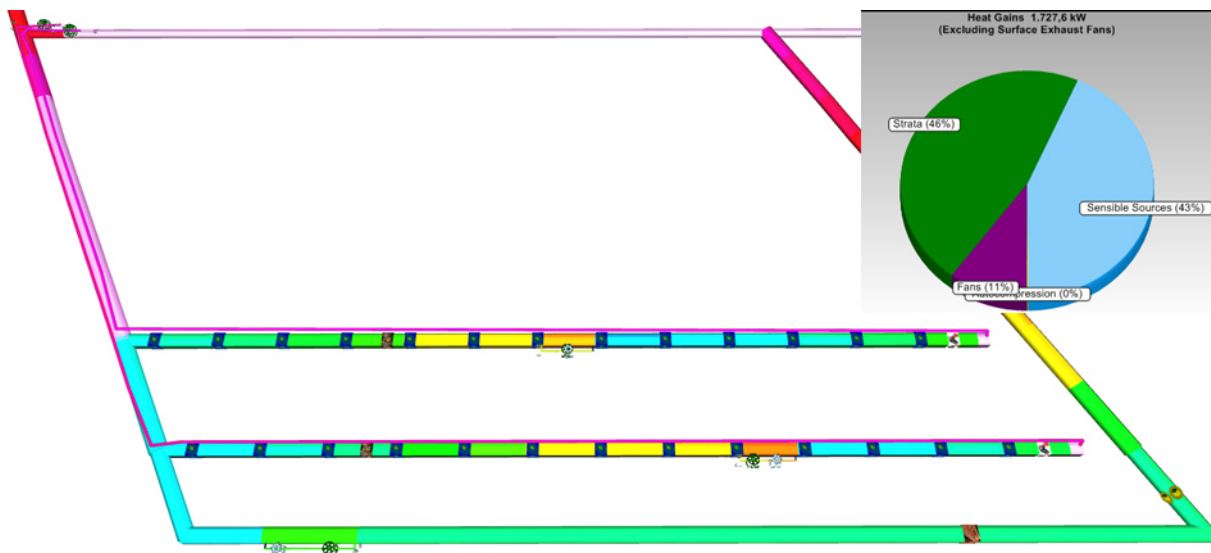


Abbildung 4-32: Effektivtemperaturen innerhalb der Strecken und Anteile der Wärmequellen

4.7.4 Schlussfolgerungen aus der Klimavorausberechnung

Für die Einlagerungsvariante der horizontalen Streckenlagerung im Ton sind aus (DBE TEC, 2015-ANSICHT) das generische Endlagerlayout, Einlagerungskonzept und erste vorläufige Auslegungsberechnungen zur Temperaturverteilung im Grubengebäude bekannt. Aufbauend auf diesen Kenntnisstand wurden erste vereinfachte Modelle zur Klimavorausberechnung erstellt. Ziel war es die Umgebungsbedingungen während des Rückholungsbetriebes abzuschätzen. Dazu wurden vorläufige Streckenquerschnitte erstellt und ein Bewetterungssystem angepasst an die Betriebspunkte simuliert.

Im angedachten Rückholungszeitraum treten immer deutlich erhöhte Gebirgstemperaturen auf. Diese sind nur mit einem erheblichen technischen Aufwand zu beherrschen. Die Errichtung eines Kühlsystems wird für den Rückholungsbetrieb und besonders die Vortriebe unerlässlich. Für den erwarteten hohen Kühlbedarf scheint eine Kühlung mit einzelnen dezentralen wenig effektiv. Für das Rückholungsbergwerk sollte eine zentrale "Kälterzeugung" mit entsprechender Verteilung in die zu kühlenden Bereiche umgesetzt werden. Zusätzlich zur Kühlung sind auch die eingesetzten Maschinen in ihrer Auslegung an die heißen Umgebungsbedingungen anzupassen. Zur Schutz des Personals sind alle Maschinen mit klimatisierten Kabinen auszustatten. Auch in der Grube sollten Klimatisierte Räume geschaffen werden. Zusätzlich sollten Arbeitsabläufe während der Rückholung soweit wie möglich automatisiert werden, um den Aufenthalt des Personals in den heißen Bereichen zu minimieren. Für die Haupttätigkeiten – Lösen, laden, Fördern – ist dies bereits heute Stand der Technik. Zusätzliche Herausforderungen werden aber für die Umsetzung weiterer Nebentätigkeiten, wie die Errichtung und den Betrieb von Versorgungsmedien (Luft, Kälte, Strom) erwartet.

4.8 Umgang mit dem geräumten Endlager

Der Umgang mit dem gewonnenen Haufwerk ist je nach Vortriebsort unterschiedlich. Die Auffahrung der Hauptstrecken erfolgt vorseilend zur eigentlichen Rückholung. Die langlebigen Hauptstrecken bleiben über die gesamte Dauer der Rückholung offen und sind durch eine lange Offenhaltungsdauer gekennzeichnet. Ein Versatz ist erst am Ende ihre Nutzungsdauer und damit erst gegen Ende des Rückholungsbetriebes möglich. Die Auffahrungen umfassen ca. 16.100 m Gebindetransportstrecken, 31.100 m Abwetterstrecken, 23.200 m Frischwetterstrecken und 23.800 m Querschläge. Dies entspricht einem Ausburchsvolumen von ca. 3.500.000 m³. Mit entsprechender Auflockerung (Auflockerungsfaktor 1,2) entsteht ein Haufwerksvolumen von wenigstens 4.200.000 m³, das auf eine übertägige Halde verbracht werden muss. Die Zuordnung der einzelnen Auffahrungen zu den Strahlenschutzbereichen ist zu beachten. Das Verlassen des KB bedarf einer Freimessung des Haufwerks.

Die Auffahrung der Rückholungsstrecken findet stets im KB statt. Bereits geräumte Rückholungsstrecken werden parallel zur Rückholung wieder mit Haufwerk versetzt. Dies kann als Sturzversatz während der Auffahrung erfolgen oder aber als Schleuderversatz mit entsprechender Zwischenspeicherung und Zerkleinerung. Der direkte Versatz des gelösten Haufwerks kann frühestens nach der Räumung der ersten Einlagerungsstrecke erfolgen. Entsprechend der Betriebsabläufe muss ein Teil des Haufwerks in Bunkern zwischengespeichert oder ebenfalls auf Halde verbracht werden. Das Haufwerksvolumen einer Rückholungsstrecke wird auf wenigstens 14.400 m³ geschätzt. Zur Vergleichmäßigung der Massenströme kann ein zusätzlicher Bunker im KB errichtet werden.

Nach erfolgter Rückholung wird angestrebt das geräumte Endlager aus dem aus dem Atomrecht zu entlassen. Dies beinhaltet eine Aufhebung aller Strahlenschutzbereiche, was mit dem Freimessen aller Grubenräume im KB und dem Versatz einhergeht. Gelingt dies, kann das geräumte Endlager nach den geltenden bergbehördlichen Vorgaben verwahrt werden. Mit dem vollständigen Versatz des Grubengebäudes sollen die Auswirkungen auf die Oberfläche begrenzt und das verbleibende Haldenvolumen reduziert werden. Nach (LBEG, 2007) müssen zum Erreichen der Schutzziele das Grubengebäude und die Tagesschächte so verwahrt werden, dass die Sicherheit an der Tagesoberfläche dauerhaft gewährleistet wird und keine nachteiligen Beeinflussungen durch Stoffein- oder -austräge in bzw. aus dem Grubengebäude zu einer Schädigung der Umwelt führen. Der Versatz des Grubengebäudes entspricht einer trockenen Verwahrung. Die Schachtverschlüsse der beiden Tagesschächte werden entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik verschlossen. Für den langzeitsicheren Verschluss konventioneller Bergwerksschächte existieren hinreichend viele Anwendungsbeispiele.

5 Zeit- und Kostenschätzung

Der Lebenszyklus eines Endlagers reicht von der Standortsuche über die Planung, Errichtung, Betrieb und den Verschluss. In Summe dauern diese Projektphasen typischerweise mehrere Jahrzehnte. Die Abschätzung zeitlicher Abläufe und Kosten für den gesamten Lebenszyklus ist daher mit erheblichen Ungewissheiten verbunden. Auch die Abschätzung von Zeit und Kosten für nachfolgende Projektphasen sind mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Ein Deutsches Endlager für insbesondere wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente steht nach dem Neustart der Endlagersuche am Anfang dieses Lebenszyklus, vgl. Abbildung 5-1.

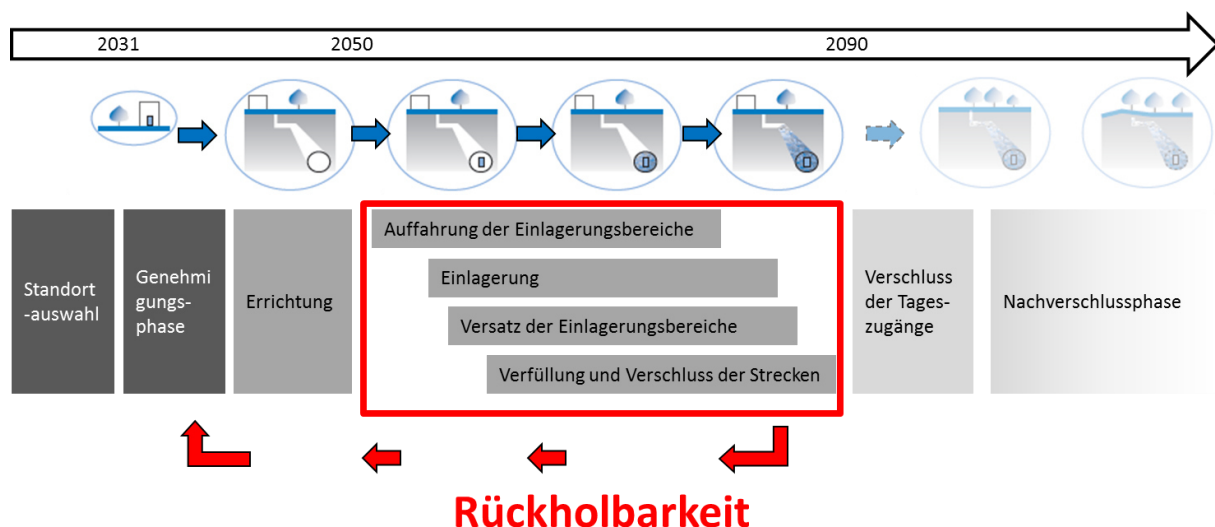


Abbildung 5-1: Lebenszyklus eines Endlagers und möglicher Rückholungszeitraum

Für Überlegungen zur technischen Umsetzung der Rückholbarkeit gelten die genannten Aspekte besonders, da die Rückholung ein von der Normalentwicklung abweichendes Szenario darstellt. Der Zeitraum in dem entsprechend den geltenden Sicherheitsanforderungen eine Rückholbarkeit zu gewährleisten ist, liegt mehrere Jahrzehnte in der Zukunft und umfasst außerdem eine Zeitspanne von mehreren Jahrzehnten. Basierend auf dem erwarteten Abfallmengengerüst und den bekannten Endlagerkonzepten wird eine Betriebszeit von ca. 40 Jahren erwartet. Während dieser Zeit ist eine Rückholbarkeit zu gewährleisten. Der genaue Zeitpunkt und die Gründe die zur Entscheidung einer Rückholung führen sind heute aber unbekannt. Daraus ergeben sich, wie bereits im Abschnitt 4 erläutert erhebliche Unsicherheiten zu den anzutreffenden Randbedingungen. Eine Abschätzung von Zeit- und Kostenaufwand über die Beurteilung von Einzelprozessen und mit im Bergbau und der Bauwirtschaft üblicher Schätzfaktoren scheint nicht geeignet um diese Unsicherheiten in geeigneter Weise zu berücksichtigen. In (Bertrams, 2017) wurde für neuentwickelte Endlagerkonzepte entsprechend der Empfehlungen der IAEA (IAEA, 2017) die Zeit- und Kostenschätzung mit Hilfe von Analogien zu weiterentwickelten Endlagerprojekten durchgeführt. Als Vorbild für die neuen Endlagerkonzepte in Kristallingestein diente das weitfortgeschrittene und gut dokumentierte Endlagerprojekt Schwedens.

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

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

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

5.1 Zeitschätzung

Die Rückholbarkeit der Behälter ist während der gesamten Betriebsphase, bis zum Verschluss der Schächte zu gewährleisten. Eine Rückholung aus dem Endlager ist frühestens mit der Einlagerung des ersten Behälters möglich. Zum spätestmöglichen Zeitpunkt sind dagegen alle Behälter eingelagert, versetzt und die Zugangstrecken verfüllt und verschlossen. Zwischen beiden Szenarien liegen ca. 40 Jahre Betriebszeit mit stetig wechselndem Einlagerungsfortschritt. Im Rahmen der Zeitschätzung soll eine Rückholung zum spätestmöglichen Zeitpunkt berücksichtigt werden. Weiterhin wird angenommen, dass der Rückholungsablauf allein durch die untertägigen Arbeiten bestimmt wird. Alle dafür benötigten Planungen, Genehmigungen, Einrichtungen und Ausrüstung stehen zur Verfügung. Die Rückholung wird nach dem in Abschnitt 4 beschriebenen Konzept durchgeführt. Die Rückholung in den beiden Endlagerflügeln findet getrennt statt.

Die Rückholung als aktive Maßnahme der Behälterentnahme bildet den Hauptprozess der Rückholungstätigkeit. Zusätzlich sind verschiedene vorausseilende und unterstützende Prozesse für den Betrieb des Rückholungsbergwerkes notwendig. Im Rückholungskonzept der Streckenlagerung bilden die Neuauffahrung der Hauptstrecken, Querschläge und Rückholungstrecken wesentliche Teilprozesse. Zusätzlich sollen auch eine Erkundung der Einlagerungsbereiche, ein Gleisbau in den Hauptstrecken und der Versatz nicht mehr benötigter Grubenräume berücksichtigt werden.

Die Auffahrung der Hauptstrecken und Querschläge soll möglichst zügig umgesetzt werden. Die Errichtung der zwei Gebindetransportstrecken, vier Abwetterstrecken und aller Querschläge kann mit leistungsstarker Vortriebstechnik an drei Betriebspunkten und einem Mehrschichtsystem innerhalb von ca. fünf Jahren erfolgen. Die drei Frischwetterstrecken im ÜB werden separat aufgefahren. Dazu wird bei zwei Betriebspunkten eine Dauer von ca. 3,5 Jahren abgeschätzt. Ein Gleisbau ist nur in den Gebindetransportstrecken nötig. Die Dauer des Gleisbaus wird auf ca. 2 Jahren abgeschätzt.

Die in den Hauptstrecken eingesetzte Vortriebstechnik ist nicht für die Errichtung der Rückholungstrecken geeignet. Hier müssen entsprechende Hydraulikbagger und Hilfsgeräte eingesetzt werden. In 48 Einlagerungsfeldern sind ca. 164 km Rückholungstrecken zu errichten. Mit vier unabhängigen Vortrieben kann die Auffahrung aller Teilstrecken innerhalb von ca. 24 Jahren erfolgen. Das Rückholungsbergwerk wird von den Schächten weg errichtet. Die Vorrückung der Einlagerungsfelder kann beginnen sobald die Hauptstrecken und Querschläge um ein Einlagerungsfeld errichtet sind. Alle Vortriebsarbeiten können nach einem Vorlauf der Hauptstreckenvortriebe parallel stattfinden. Vorrauseilend zur Auffahrung der Rückholungstrecken findet stets eine Erkundung der Behälterlage aus dem Querschlag heraus statt. Die eigentliche Rückholung, also die Entnahme der Behälter kann mit zwei Betriebspunkten erfolgen. Der zeitliche Ablauf und die Abhängigkeiten der stattfindenden Hauptprozesse sind in Abbildung 5-2 dargestellt.

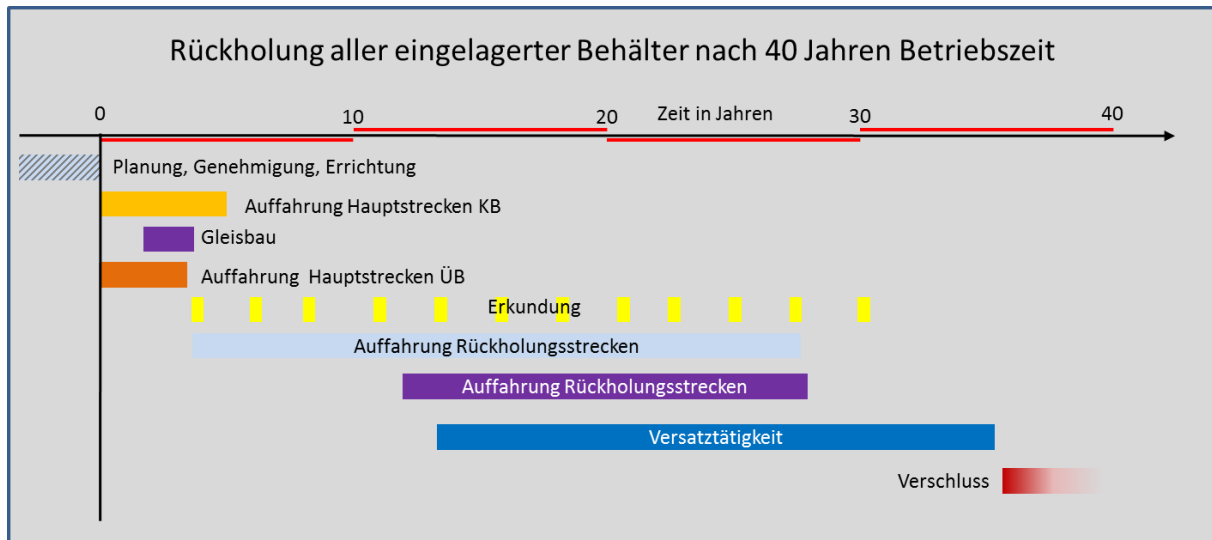


Abbildung 5-2: Schematische Darstellung zum Ablauf der Hauptprozesse während des Rückholungsbetriebes

Der eigentliche Rückholungsvorgang besteht aus zwei Teilschritten, siehe Abbildung 5-3. IM ersten Teilschritt muss der Pfeiler bis zum Behälter gewonnen und der Behälter freigelegt werden. Im zweiten Schritt wird der Behälter aus der Strecke entnommen und zurück nach Übertrage transportiert. Diese Schritte sind für jeden Behälter durchzuführen. Während des Entfernens des kurzen Pfeilers zwischen zwei Behältern können ein Nachschnitt der Sohle und auch zusätzliche Sicherungsmaßnahmen in der Rückholungstrecke erfolgen.

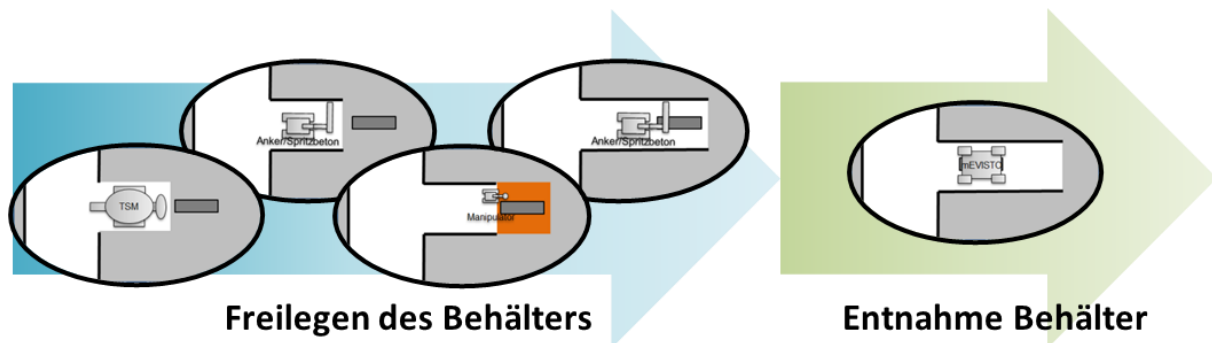


Abbildung 5-3: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte während der aktiven Rückholung der Behälter

Für die Rückholung aller eingelagerten Behälter wird in Summe eine reine Betriebsdauer von ca. 35 Jahren abgeschätzt. Vorlaufende Arbeiten, wie Planung, Genehmigung oder Errichtung neuer Anlagen, genauso wie nachgeschaltete Arbeiten (z.B.: Verschluss) sind dabei nicht berücksichtigt.

5.2 Kostenschätzung

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

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

Die Kosten während der Betriebsdauer der Rückholung sind:

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

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

- Anschaffungskosten
- Betriebskosten
- Wartungskosten
- Personalkosten

Kosten für den Betrieb der Tagesanlagen und des Rückholungsbergwerkes allgemein werden auf Basis der Kostenschätzung für das schwedische Endlager ermittelt [SKB TR-17-02]. Für Betrieb, Wartung und Reinvestitionen werden dort Kosten von insgesamt 7.400 Mio. SEK über eine 40-jährige Betriebszeit erwartet. Nach dem in (Bertrams, 2017) angewendeten Schema zur Umrechnung auf das deutsche Abfallmengengerüst entspricht dies Gesamtkosten von ca. 1.676 Mio. € oder aber 41,9 Mio. € pro Jahr.

Tabelle 5-1: Kostenschätzung zur Rückholung der Streckenlagerung

| Position | Kosten | Einheit |
|--------------------------------|--------------------|------------|
| Auffahrung KB | 101.600.000 | € |
| Gleisbau | 56.000.000 | € |
| Auffahrung ÜB | 18.600.000 | € |
| Ausfahrung der RhS | 54.900.000 | € |
| Rückholung | 179.200.000 | € |
| Versatz | 29.200.000 | € |
| Erkundung | 35.300.000 | € |
| Kühlung/Bewetterung | 90.000.000 | € |
| Zwischensumme | 564.800.000 | € |
| Betriebsdauer | 40 | a |
| Unterhaltung/Betrieb allgemein | 41.900.000 | €/a |
| jährliche Kosten | 58.100.000 | €/a |

Ohne die Berücksichtigung einer Preissteigerung ("Overnight") ergeben sich aus den erwarteten ca. 58,1 Mio. € jährlicher Kosten über die geplante Rückholdungsdauer Kosten von insgesamt 2,03 Mrd. €.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen des FuE-Vorhabens "Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen" (ERNESTA) wurden bestehende Rückholungskonzepte für die Einlagerungskonzepte der horizontalen Streckenlagerung und vertikalen Bohrlochlagerung in den Wirtsgesteinen Salz und Tongestein weiterentwickelt. Im vorliegenden Teilbericht wurden die Arbeiten zur Vertiefung des Planungsstandes zu den Rückholungskonzepten für die Einlagerungsvariante der horizontalen Streckenlagerung im Tongestein zusammengefasst.

Die Konzeptentwicklung umfasst die Beschreibung aller notwendigen Arbeitsabläufe zur Neuaufführung des Grubengebäudes und den eigentlichen Rückholungsprozess.

Der Ausbau jedes Grubenbaus wird für die Betriebszeit der Einlagerung ausgelegt. Bei einer spätesten möglichen Entscheidung zur Rückholung, also gegen Ende der Betriebszeit, ist nicht davon auszugehen, dass der Ausbau noch ausreichend tragfähig ist. Gleichwohl ist eine Resttragfähigkeit zu erwarten. Die Neuaufführung entspricht im Wesentlichen der Entnahme des Versatzes. Parallel dazu ist der Zustand des Ausbaus zu prüfen und dieser instand zu setzen bzw. zu ertüchtigen. Die Instandsetzungsarbeiten umfassen begrenzt die Entnahme geschädigter Bereiche des Ausbaus. Eine gesonderte Vortriebstechnik ist dafür nicht nötig, dies kann aber zu deutlich variierenden Vortriebleistungen führen.

Zur Erleichterung einer möglichen Rückholung sollen alle Gleisanlagen nach der Einlagerung und vor dem Versatz geraubt werden.

Der für die Rückholung benötigte Streckenquerschnitt ist bei der Auslegung der Einlagerungsstrecken und Dimensionierung der Streckenabstände zu berücksichtigen. Auslegungstemperaturen zwischen 100°C und 150°C erlauben eine vergleichsweise dichte Packung der Behälter. Durch die aus bergmännischer Sicht ungünstigen geomechanischen Eigenschaften der Tongesteine können für die Auslegung der Einlagerungsfelder geomechanische Aspekte eine thermische Optimierung der Feldgröße einschränken. Dies gilt auch für den Rückholungsbetrieb. Sofern für die Rückholung größere Querschnitte als bei der Einlagerung vorgesehen sind, müssen diese in der Auslegung berücksichtigt werden.

In dem in diesem Vorhaben entwickelten Rückholungskonzept wird eine Neuaufführung mit Hilfe gleisloser Technik, konkret Hydraulikbaggern, bevorzugt. Die Rückholung soll aus einem Querschnitt vergleichbar zur Einlagerung erfolgen. Eine Aufweitung der Rückholungsstrecke ist nicht vorgesehen.

Im angedachten Rückholungszeitraum treten immer deutlich erhöhte Gebirgstemperaturen auf. Diese sind nur mit einem erheblichen technischen Aufwand zu beherrschen. Die Errichtung eines Kühlsystems wird für den Rückholungsbetrieb und besonders die Vortriebe unerlässlich. Für den erwarteten hohen Kühlbedarf scheint eine Kühlung mit einzelnen dezentralen wenig effektiv. Für das Rückholungsbergwerk sollte eine zentrale "Kälterzeugung" mit entsprechender Verteilung in die zu kühlenden Bereiche umgesetzt werden. Zusätzlich zur

Kühlung sind auch die eingesetzten Maschinen in ihrer Auslegung an die heißen Umgebungsbedingungen anzupassen. Zur Schutz des Personals sind alle Maschinen mit klimatisierten Kabinen auszustatten. Auch in der Grube sollten Klimatisierte Räume geschaffen werden. Zusätzlich sollten Arbeitsabläufe während der Rückholung soweit wie möglich automatisiert werden, um den Aufenthalt des Personals in den heißen Bereichen zu minimieren. Für die Haupttätigkeiten – Lösen, Laden, Fördern – ist dies bereits heute Stand der Technik. Zusätzliche Herausforderungen werden aber für die Umsetzung weiterer Nebentätigkeiten, wie die Errichtung und den Betrieb von Versorgungsmedien (Luft, Kälte, Strom) erwartet.

Mit dem vorliegenden Teilbericht des Vorhabens ERNESTA wurde ein Konzept für die Rückholung eingelagerter POLLUX®-3 Behälter aus horizontalen Einlagerungstrecken in einem Endlager im Tongestein entwickelt. Alle entwickelten Ansätze und technischen Lösungen sind als Grobkonzept zu betrachten und bedürfen zukünftig einer weiteren Vertiefung.

Quellenverzeichnis

- (BMU, 2010) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Berlin, 2010
- (Bock et al. 2010) Self-sealing of Fractures in Argillaceous Formations in the Context of Geological Disposal of Radioactive Waste
- (Bossart, 2008) P. Bossart: Annex 4: Characteristics of the Opalinus Clay at Mont Terri. – In: BOSSART, P. & THURY, M. (Hrsg.): Mont Terri Rock Laboratory Project, Programme 1996 to 2007 and Results. Reports of the Swiss Geological Survey 3: Annex 4-1 bis Annex 4-12; Wabern/Schweiz (Swiss Geological Survey).
- (DBE TEC, 2007) DBE TECHNOLOGY GmbH: Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland – GENESIS, Abschlussbericht, Peine, 2007
- (DBE TEC, 2010a) DBE TECHNOLOGY GmbH: Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein (ERATO) - Abschlussbericht, Peine, 2010
- (DBE TEC, 2014) DBE TECHNOLOGY GmbH: Auswirkungen der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte, Abschlussbericht, Peine, 2014
- (DBE TEC, 2015b) DBE TECHNOLOGY GmbH: Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell SÜD. Technischer Bericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2016
- (DWD, 2015) Deutscher Wetterdienst: Weste-Datenbank, Wetterdaten und -statistiken express, <http://www.dwd.de/DE/leistungen/witterungsreportexpress/witterungsreport-express.html>
- (Eichler 2007) Eichler, et al.: Fels- und Tunnelbau II - Verfahren und Kenngrößen - Technologie und Umwelt - Vortrieb und Sicherung - Baustoffe und Eigenschaften, expert Verlag, Renningen, 2007
- (ESK, 2015) Entsorgungskommission: Leitlinie zum sicheren Betrieb eines Endlagers für insbesondere Wärme entwickelnde radioactive Abfälle, 10.12.2015
- (Kulda et al., 2010) P. Knoll, M. Finder, W. Kudla: Entwicklung eines Grundkonzeptes für langlebige Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnalit) für UTD/UTV, Teil 2: Erprobung von Funktionselementen, Zusammenfassender Abschlussbericht, Freiberg, 2010

- (IAEA, 2009) International Atomic Energy Agency (IAEA): Geological Disposal of Radioactive Waste: Technological Implications for Retrievability NW-T-1.19, Wien, 2009
- (Jobmann et al. 2017) M. Jobmann, V. Burlaka, P. Herold, E. Kuate Simo, J. Maßmann, A. Meleshyn, A. Rübel, G. Zieffle: Projekt ANSICHT Systemanalyse für die Endlagerstandortmodelle - Methode und exemplarische Berechnungen zum Sicherheitsnachweis, Peine, 2017
- (KlimaBergV, 1983) Klima-Bergverordnung vom 9. Juni 1983 (BGBl. I S. 685)
- (Nowak & Maßmann 2013) Nowak, T. & Maßmann, J.: Endlagerstandortmodell NORD, Teil III: Auswahl von Gesteins- und Fluideigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis am Endlagerstandortmodell NORD für numerische Modellberechnungen, BGR, B3.1/B50112-43/2012-0009, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- Reuther, 1982 Ernst-Ulrich Reuther: Einführung in den Bergbau. 1. Auflage, Verlag Glückauf GmbH, Essen, 1982
- (StrlSchV, 2017) Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), die zuletzt durch nach Maßgabe des Artikel 10 durch Artikel 6 des Gesetzes vom 27. Januar 2017 (BGBl. I S. 114, 1222) geändert worden ist
- (StandAG, 2017) www.bundesregierung.de: Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG); StandAG
- (Zhang, 2014) C.-L. Zhang: Characterization of excavated claystone and claystone-bentonite mixtures as backfill/seal material, Geological Society London Special Publications, September 2014

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 2-1: Typische Entwicklungsstufen eines Endlagers und Zuordnung der Rückholbarkeit und Bergung, nach (NEA, 2011) | 4 |
| Abbildung 3-1: Abmessungen POLLUX®-3 (DBE TEC, 2010) | 7 |
| Abbildung 3-2: Ausschnitt des Grubengebäudes für die Streckenlagerung von POLLUX®-3 Behältern (DBE TEC, 2010) | 8 |
| Abbildung 3-3: Schematische Darstellung des Streckenlagerungskonzeptes für Wiederaufarbeitungsabfälle und ausgediente Brennelemente. Rechts: Längsschnitt durch eine Einlagerungsstrecke. Links: Querschnitt durch eine Einlagerungsstrecke, nicht maßstäblich (DBE TEC 2016) | 9 |
| Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des Rückholungsablaufes | 11 |
| Abbildung 4-2: Mögliche Vortriebstechnik für die Neuaufaufahrugn und Aufwältigung bereits verfüllter Strecken | 13 |
| Abbildung 4-3: Mögliche Technik zur Kontursicherung | 14 |
| Abbildung 4-4: Standorte Miragationssperren und Streckenverschlüsse | 16 |
| Abbildung 4-5: Idealisierung der geometrischen Verhältnisse und Belastungen im Einlagerungsfeld | 17 |
| Abbildung 4-6: Erwartete Pfeilerspannung bei unterschiedlichen Endlaeagrauslegungen | 19 |
| Abbildung 4-7: Schematische Darstellung zur Auffahrung der Rückholungsstrecken | 20 |
| Abbildung 4-8: Schematische Darstellung der Hauptprozesse zum Freilegen der Behälter | 21 |
| Abbildung 4-9: Prinzipskizze von Schritt 1 der Freilegung des Abfallgebindes | 22 |
| Abbildung 4-10: Prinzipskizze von Schritt 2 der Freilegung des Abfallgebindes | 22 |
| Abbildung 4-11: Prinzipskizze von Schritt 3 der Freilegung des Abfallgebindes | 23 |
| Abbildung 4-12: Schematische Darstellung zur Entnahme der Behälter | 24 |
| Abbildung 4-13: Querschnitt der Rückholungsstrecke | 25 |
| Abbildung 4-14: Strahlenschutzbereiche, wenn Freimessung vor Versatz kann QS auch im ÜB aufgefahren werden | 26 |
| Abbildung 4-15: Schematische Darstellung des Bewetterungskonzeptes für die Streckenlagerung während der Einlagerung (DBE TEC, 2010) | 31 |
| Abbildung 4-16: Grubengebäude gesamt mit Draufsicht Zentralbereich und Detailansicht Überfahung der Hauptstrecken | 32 |
| Abbildung 4-17: Temperatur und relative Feuchte im Jahresmittel für Deutschland (DWD, 2015) | 33 |
| Abbildung 4-18: Mittlere Tagestemperaturen und rel. Feuchte im Betrachtungszeitraum 2000 bis 2014, (DWD, 2015) | 34 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 4-19: Temperaturverlauf im Buffer um den Behälter, grün = Betriebszeit, graun = möglicher Rückholungszeitraum | 35 |
| Abbildung 4-20: Temperaturverlauf zwischen zwei Einlagerungsstrecken | 36 |
| Abbildung 4-21: Temperaturentwicklung radial zur Behälterachse, grün = Betriebszeit, graun = möglicher Rückholungszeitraum | 36 |
| Abbildung 4-22: Temperturentwicklung längs der Behälterachse, grün = Beginn der Rückholung (Beobachtungszeitpunkt) | 37 |
| Abbildung 4-23: Erwartete Gebirgstempertur in den Hauptstrecken und Querschlägen Jahre nach Einlagerungsbeginn | 37 |
| Abbildung 4-24: Zutrittsraten und relative Luftfeuchte während der 2. Phase des "Ventilation Experiments" im Untertagelabor Mont Terri (Mayor & Velasco, 2008) | 38 |
| Abbildung 4-25: Zuordnung der Zutrittsraten im Vortrieb und übrigen Grubengebäude, Orange= Kurzzeirate, Gelb=Langzeirate | 39 |
| Abbildung 4-26: Querschnitte der Hauptstrecken | 40 |
| Abbildung 4-28: 41 | |
| Abbildung 4-29: Übersicht Modelle | 42 |
| Abbildung 4-32: Modell M1 zur Simulation der Auffahrungsprozesse mit vier Betriebspunkten | 43 |
| Abbildung 4-33: Skizze Bewetterungskonzept im Querschlag bei Rückholung | 45 |
| Abbildung 4-32: erwartete Effektivtemperaturen (unten) saugender Bewetterung und zusätzlicher Kühlung im vordern Teil der Rückholungsstrecke im Vergleich zur Gebirgstempertur vor Auffahrung (oben) | 46 |
| Abbildung 4-32: Effektivtemperturen innerhalb der Strecken und Anteile der Wärmequellen | 47 |
| Abbildung 5-1: Lebenszyklus eines Endlagers und möglicher Rückholungszeitraum | 50 |
| Abbildung 5-2: Schematische Darstellung zum Ablauf der Hauptprozesse während des Rückholungsbetriebes | 53 |
| Abbildung 5-3: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte während der aktiven Rückholung der Behälter | 53 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|--------------|---|----|
| Tabelle 4-2: | Übersicht Zutrittsmengen in den Hauptstrecken | 39 |
| Tabelle 4-3: | Geometrie der Streckenquerschnitte | 40 |
| Tabelle 4-2: | Wetterbedarf der Bertiebspunkte | 44 |
| Tabelle 5-1: | Kostenschätzung zur Rückholung der Streckenlagerung | 55 |

BGE TECHNOLOGY GmbH

Eschenstraße 55

31224 Peine – Germany

T + 49 5171 43-1520

F + 49 5171 43-1506

info@bge-technology.de

www.bge-technology.de