



BGE TECHNOLOGY GmbH

ERNESTA

Technische Konzepte für die Rückholung der
Einlagerungsvariante vertikale Bohrlochlagerung
in Tongesteinsformationen

BGE TEC 2018-08

ERNESTA

Technische Konzepte für die Rückholung der Einlagerungsvariante vertikale Bohrlochlagerung in Tongesteinsformationen

BGE TEC 2018-08

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	Allgemeine Rückholungsstrategie	3
3	Einlagerungskonzept	9
4	Rückholungskonzept	17
4.1	Einteilung der Strahlenschutzbereiche bei Wiederauffahrung	20
4.2	Umgang mit dem Ausbau	22
4.3	Auswirkungen der Rückholbarkeit auf die Verschlussbauwerke	27
4.4	Versatzentnahme und Neuauffahrung	29
4.5	Freilegen des Bohrloches	31
4.6	Entnahme der Behälter	36
4.6.1	Ablauf	36
4.6.2	Technik	38
4.7	Wettertechnik und Klimavorausberechnung	42
4.7.1	Bewetterungskonzept während Einlagerung und Rückholung	42
4.7.2	Randbedingungen	44
4.7.3	Modelle	52
4.7.4	Zwischenfazit	69
4.8	Umgang mit dem geräumten Grubengebäude	70
5	Zeit- und Kostenschätzung	72
5.1	Zeitschätzung	74
5.2	Kostenschätzung	78
6	Zusammenfassung	80
	Quellenverzeichnis	82
	Abbildungsverzeichnis	86
	Tabellenverzeichnis	90

1 Einleitung

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

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

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

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

2 Allgemeine Rückholungsstrategie

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

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

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

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

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

Die Sicherheitsanforderungen des BMU lassen sich rechtlich auf Grund der bisher nicht erfolgten Veröffentlichung im Bundesgesetzblatt nicht eindeutig einordnen. Sie entsprechen einer das Atomgesetz konkretisierende Verwaltungsvorschrift zur Feststellung der Genehmigungsfähigkeit. Daraus 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 nachweislich einhalten.

Hinter der Techniklausel "Stand von Wissenschaft und Technik" verbirgt sich ein aktueller Wissensstand entsprechend den gegenwärtigen Erkenntnissen in einem bestimmten Fachgebiet oder zu einer Fragestellung mit der Berücksichtigung der wissenschaftlich denkbaren Risiken. 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 hochradioaktive 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 Überle-

gungen 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.

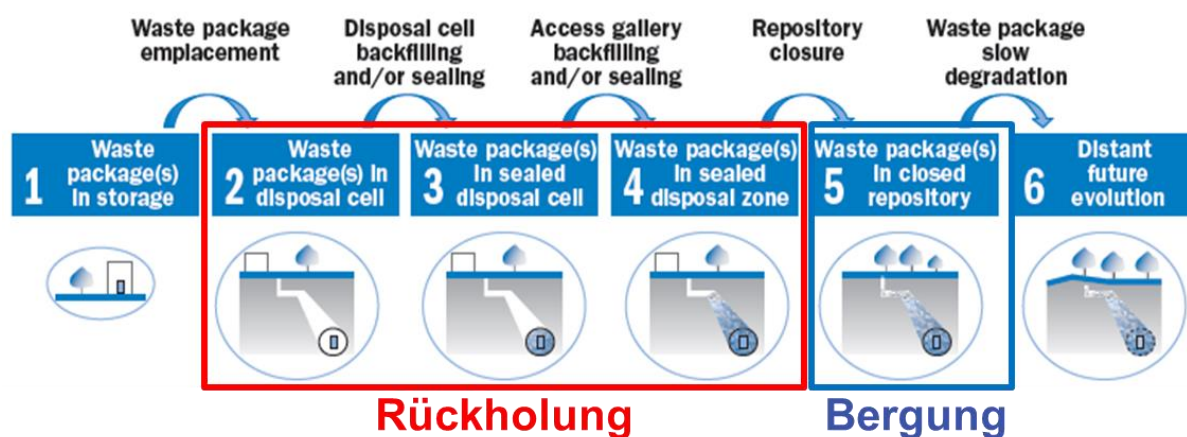


Abbildung 2-1: Einordnung der Begriffsdefinitionen Rückholbarkeit und Bergung gemäß (BMU, 2010) in typische Entwicklungsstufen eines Endlagers und Vergleich mit dem internationalen Verständnis zur Reversibilität, nach (NEA, 2011)

Die Betriebsphase eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente wird in Deutschland auf bis zu 40 Jahre abgeschätzt. In den bekannten deutschen Endlagerkonzeptionen finden die genannten Entwicklungsstufen – Einlagerung, Versatz, Verschluss – entsprechend des Einlagerungsfortschrittes parallel statt. Die Behälter werden zügig nach der Einlagerung versetzt. Die passive Sicherheit des Endlagers wird, in Übereinstimmung mit den Sicherheitsanforderungen des BMU, schrittweise erhöht. Die Behälter befinden sich damit nicht mehr in der aktiven Kontrolle durch den Mensch. Eine schrittweise Umsetzung der drei Hauptprozesse ist ebenso denkbar, würde aber nicht den bereits genannten 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 deren Entnahme 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 aus den Strecken vor deren Versatz geraubt werden. Eine Entscheidung, ob Strecken(teile) aus dem jeweiligen Strahlenschutzbereich (Kontroll- (KB) oder Überwachungsbereich (ÜB)) entlassen werden, wird erst in der Betriebsphase getroffen. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt erfolgt dazu keine Vorfestlegung.

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

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

und ausgedienten Brennelemente erforderlich werden. Weiterhin werden geeignete und in ausreichender Anzahl vorzuhaltende Behälter für die Zwischenlagerung und/oder den Transport und auch entsprechende Transportkapazitäten benötigt.

3 Einlagerungskonzept

Die Grundlage für eine Vertiefung der Rückholungskonzepte bilden das F&E-Vorhaben "Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein" ERATO (DBE TEC, 2010a), dessen Aufgabe u.a. die Entwicklung von Endlagerkonzepten in Tongestein war und die auf diesen Konzepten aufbauende Endlagerkonzeption (DBE TEC, 2015) aus dem F&E-Vorhaben ANSICHT. Im nachfolgenden Abschnitt erfolgt zunächst eine Zusammenfassung des Einlagerungskonzeptes.

Das in (DBE TEC, 2010a) entwickelte Endlagerlayout ist durch eine zentrale Doppelschachtanlage mit der Oberfläche verbunden. Im schachtnahen Bereich werden Infrastrukturräume errichtet, von denen aus Hauptstrecken zwei separate Einlagerungsflügel mit je vier Reihen Einlagerungsfeldern erschließen, siehe Abbildung 3-1. Die Einlagerungsbereiche sind nach Brennelementen (Kurzbezeichnung BE) und wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen (Kurzbezeichnung HAW) getrennt. Jede Reihe Einlagerungsfelder ist durch eine Gebindetransport-, eine Frischwetter- und eine Abwetterstrecke erschlossen. Querschläge verbinden alle drei Hauptstrecken. Die Bohrlochüberfahrungsstrecken sind durchschlägig zwischen zwei Querschlägen und verlaufen parallel zu den Hauptstrecken. Die Bohrlochüberfahrungsstrecken werden nach und nach im Zuge des Einlagerungsprozesses im Rückbau aufgeföhren, sodass die Einlagerung in den Bohrlochüberfahrungsstrecken des Querschlags beginnt, der am weitesten vom Schacht entfernt ist. Sie endet in einer Bohrlochüberfahrungsstrecke des Querschlags, der den Schächten am nächsten ist. In den Bohrlochüberfahrungsstrecken werden die Bohrlöcher in regelmäßigen Abständen vertikal abgeteuft. Jedes Bohrloch reicht von der Sohle aus 27 m in die Tiefe und fasst drei BSK Kokillen. Nach derzeitigem Wissensstand begrenzen die thermomechanischen Eigenschaften von Tongesteinen die Auslegungstemperatur des Endlagers auf 100 bis 150°C (DBE TEC, 2017a). Aus der thermischen Auslegung mit einer Auslegungstemperatur von 150°C ergibt sich ein Abstand der Bohrlöcher entlang der Streckenachsen von ca. 23 m und ein Abstand der Bohrlochüberfahrungsstrecken von 20 m.

Zur Gewährleistung der betrieblichen Sicherheit sind alle Strecken mit einem Ausbau versehen. Entsprechend dem Verfüll- und Verschlusskonzept sollen alle Strecken nach erfolgter Einlagerung versetzt werden. An den Einmündungen der Querschläge in die Hauptstrecken sollen weiterhin einfache Streckenverschlüsse und innerhalb der Hauptstrecken doppelte Streckenverschlüsse errichtet werden, siehe Abbildung 3-2. Der Ausbau beider Verschlüsse ist grundsätzlich gleich. Ein einfacher Verschluss besteht aus einem Bentonitdichtelement, das von zwei Betonwiderlagern eingefasst ist. Die doppelten Verschlüsse werden um ein weiteres Dichtelement und ein Widerlager ergänzt.

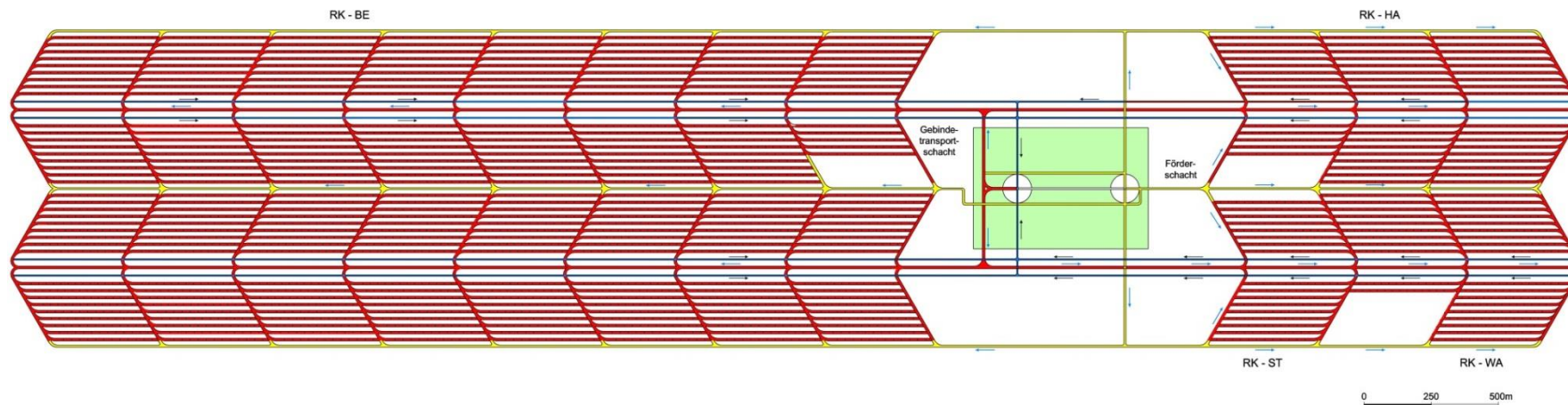


Abbildung 3-1: Konzept des Grubengebäudes für die Einlagerung ausgedienter Brennelemente und wärmeentwickelnder Abfälle durch Bohrlochlagerung (DBE TEC, 2015)

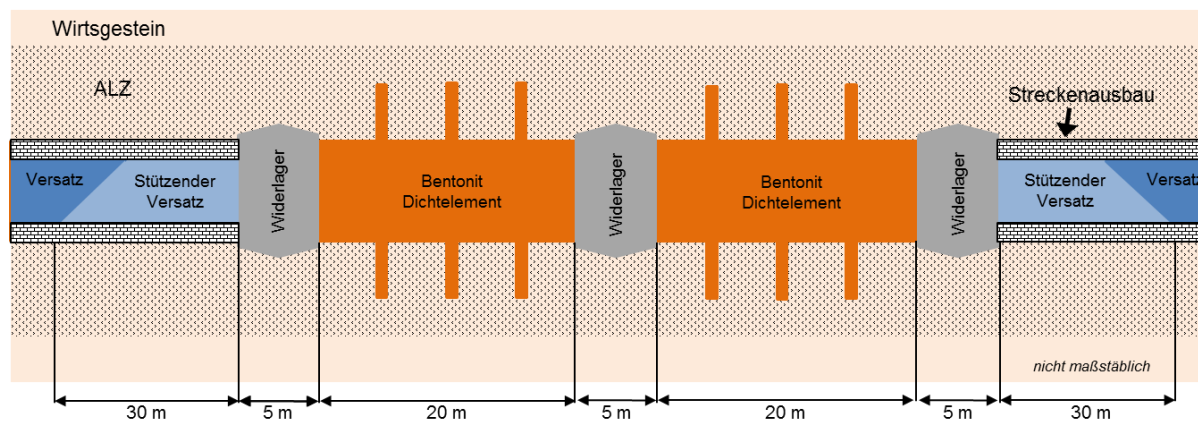


Abbildung 3-2: Schema eines doppelten Streckenverschlusses zur Abdichtung der Hauptstrecken im Einlagerungskonzept der Bohrlochlagerung nach (DBE TEC, 2015)

Im Bereich der Sohle wird jedes Bohrloch um einen Bohrlochkeller von 3 m Breite, 7 m Länge und 3 m Tiefe erweitert. Der zusätzliche Freiraum des Bohrlochkellers erlaubt die Drehung des Transferbehälters durch die Einlagerungsvorrichtung (ELV) bei gleichbleibender Geometrie der Einlagerungsstrecke. Nach erfolgreichem Abteufen des Bohrlochs erfolgt das Einbringen einer äußeren, perforierten Verrohrung zur Gewährleistung der Bohrlochstabilität. Zur Verzögerung möglicher Fluidzutritte aus dem Gebirge zu den Behältern wird im Bohrloch ein Buffer in Form vorkompakter Bentonitscheiben und -ringe eingebaut. Um die Kokillen zum Zweck der Rückholung vor einem Einspannen durch den Gebirgsdruck zu schützen, werden sie durch einen zweiten, lösungsdichten Innenliner vom Buffer abgeschirmt. Der Innenliner reicht während der Einlagerung bis zum Boden des Bohrlochkellers. Der Innenraum wird als Sperrbereich ausgewiesen und ist durch die Bohrlochschleuse stets vom restlichen Grubengebäude getrennt. Während der Einlagerung der Kokillen findet eine wechselweise Verfüllung mit Sandversatz statt. Abbildung 3-3 zeigt den schematischen Querschnitt eines Einlagerungsbohrlochs.

Die Geometrie der BSK Kokillen ist gleich der Kokillenform für die vertikale Bohrlochlagerung im Salz, siehe Abbildung 3-4. Im Rahmen der VSG (GRS, 2012a) wurde das Design der BSK an die veränderten Auslegungsanforderungen angepasst. Zur Erleichterung der Rückholbarkeit aus einem verfüllten Bohrloch kann die BSK mit einer konischen Außenform versehen werden, siehe Abbildung 3-4. Die veränderte Kokillenform wurde in der VSG als BSK-R benannt. Im Rahmen dieses Vorhabens wird auf die Unterscheidung zwischen zylindrischer Kokille (BSK) und konischer Kokille (BSK-R) verzichtet. Die Kokillen werden immer als BSK bezeichnet.

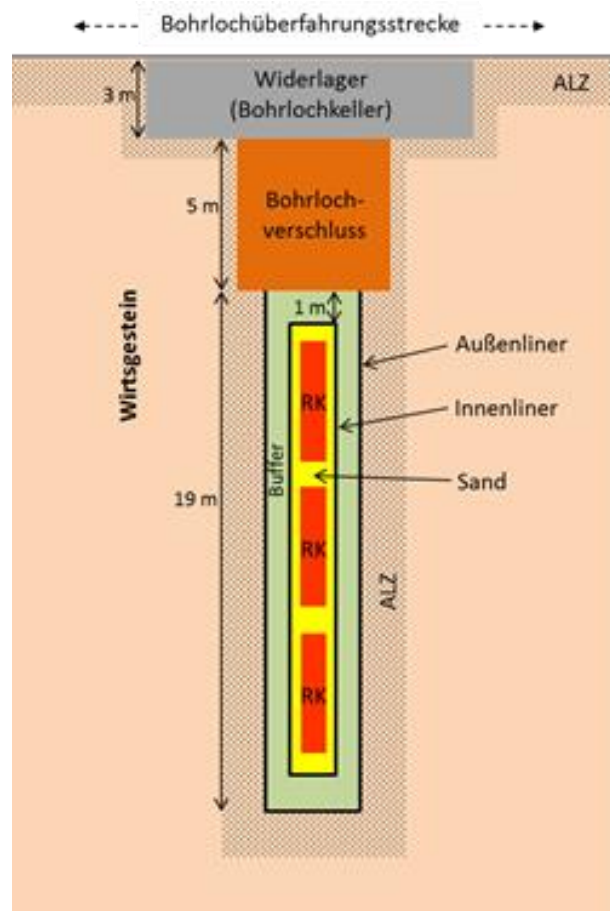


Abbildung 3-3: Schematische Darstellung des Einlagerungsortes der Bohrlochlagerung (DBE TEC, 2015)

Anders als im Salz, sind die Kokillen im Tongestein nur mit den Brennstäben von zwei DWR-Brennelementen (respektive sechs SWR- oder fünf WWER-Brennelementen) bzw. CSD-B/-C/-V Kokillen beladen. Die Brennelementstrukturteile können ebenfalls in die BSK gepackt werden. Die Geometrie der BSK wird durch die Länge der DWR-Brennstäbe und vom Durchmesser der CSD-B/-C/-V bestimmt.

Die im Grubengebäude einzulagernden Behältermengen ergeben sich auf Basis des Abfallmengengerüsts. Die Behältermengen wurden in (DBE TEC, 2015) gemäß dem Abfallmengengerüst der VSG (VSG AP 3, 2010) berechnet:

- 6.990 BSK mit Brennstäben aus DWR-BE
- 2.600 BSK mit Brennstäben aus SWR-BE
- 1.010 BSK mit Brennstäben aus WWER-BE
- 874 BSK mit Brennelementstrukturteilen
- 3.336 BSK mit Wiederaufarbeitungsabfällen (CSD-V/-B/-C)

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

- 1865 BSK mit CSD-V
- 1415 BSK mit CSD-B/-C

Die Einlagerungstechnik der vertikalen Bohrlochlagerung im Tongestein basiert auf der bereits erfolgreich getesteten Technik für die Einlagerung im Salz. Der Einlagerungsvorgang entspricht dem Stand der Technik (DBE TEC 2010b). Die notwendigen Anpassungen an die veränderten Randbedingungen im Tongestein stellen die technische Machbarkeit nicht in Frage. Auch die Technik zur Rückholung kann, als Umkehrung des Einlagerungsprozesses, aus dem Einlagerungsvorgang übernommen werden. Die Einlagerungstechnik für die Bohrlochlagerung umfasst eine batteriebetriebene Lokomotive, einen Plateauwagen für den Transport der Transferbehälter, die Einlagerungsvorrichtung (ELV) und die Bohrlochsleuse.

Die Batterielokomotive ist für den söglichen Transport des Plateauwagens vom Füllort am Schacht bis hin zur Einlagerungsvorrichtung vorgesehen, siehe Abbildung 3-5. Die Spurweite der Gleise beträgt 1.990 mm, um die Einlagerung der Kokillen zu ermöglichen.

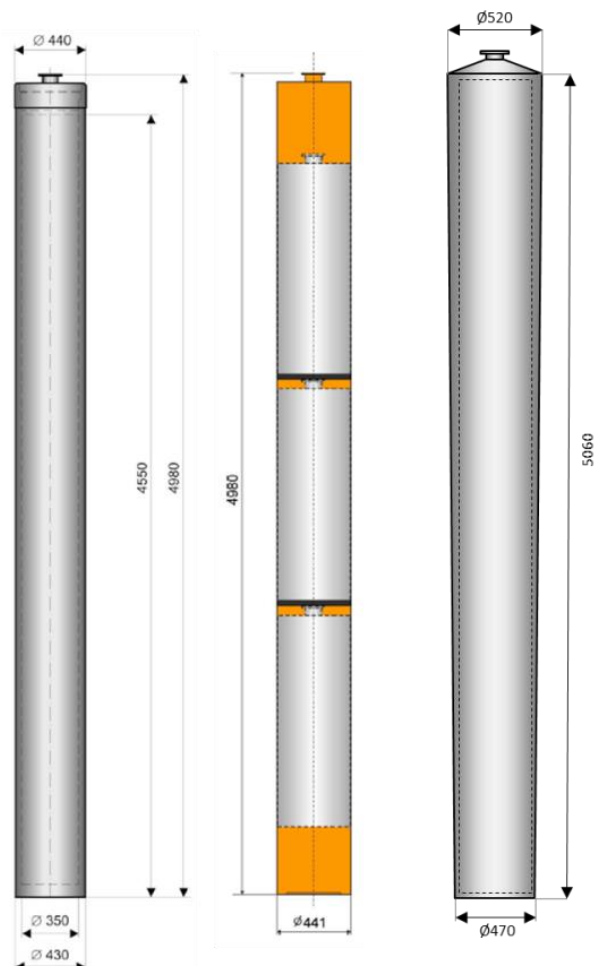


Abbildung 3-4: BSK-3 (links), Triple Pack für HAW-Kokillen (Mitte) nach (GRS, 2011) und BSK-R (rechts) nach (GRS, 2012)

Der Plateauwagen ist zum Transport des Transferbehälters von der Konditionierungsanlage an der Oberfläche bis zum untertägigen Einlagerungsort vorgesehen. Seine Mulde ist dem Transferbehälter entsprechend nachgeformt, inklusive der Tragzapfenaufnahme des Behälters, um ein Verrutschen zu vermeiden. Über eine Deichsel mit Kupplung wird der Wagen mit der Lokomotive verbunden.



Abbildung 3-5: Batterie Lokomotive mit Führerhaus und Energieteil (links) und Plateauwagen mit Transferbehälter (rechts), (DBE TEC 2010b)

Die Einlagerungsvorrichtung ist in der Lage, den Transferbehälter vom Plateauwagen aufzunehmen und in die Vertikale zu drehen. Des Weiteren besitzt sie mit der Abschirmhaube die Möglichkeit, den Transferbehälter kopfseitig zu öffnen, um dann den Greifer der Winde am Tragpflanz der innen liegenden Kokille anzuschlagen. Über den Elektromotor der Winde kann die Kokille dann nach dem Anheben und Öffnen der Bohrlochsleuse in das Bohrloch versenkt werden.

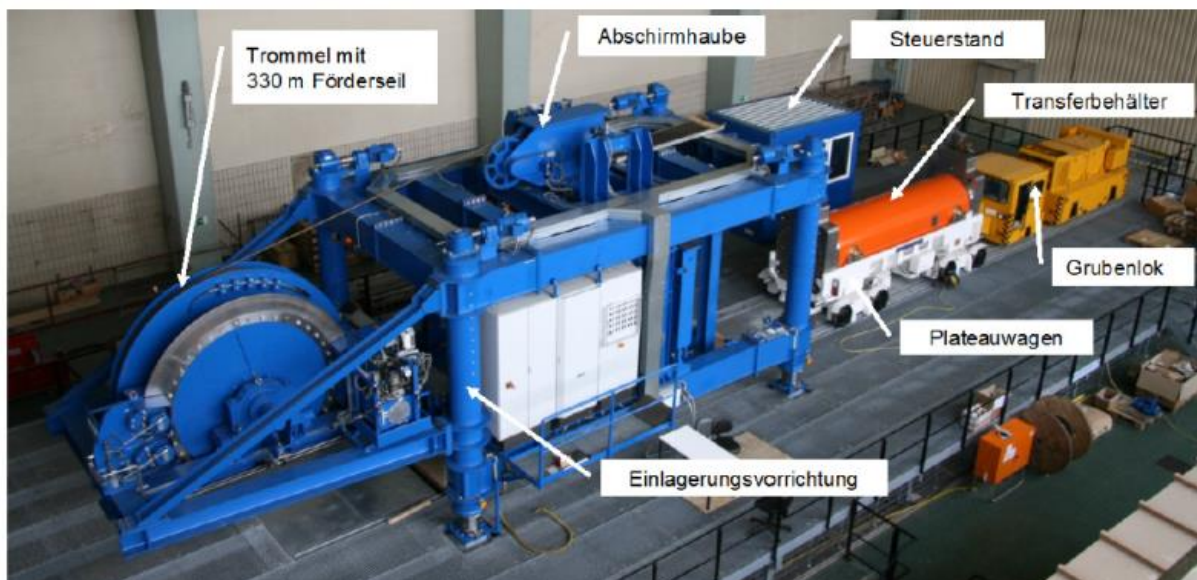


Abbildung 3-6: Prototyp der Einlagerungsvorrichtung (ELV) am Versuchsstand, (DBE TEC, 2010b)

Positionierbolzen

Entriegelungsbolzen

Schleuse

Schleusenrahmen

Schleusengetriebe

Schleusengehäuse

Entlüftungsflansch

Die Errichtung der einzelnen Bohrlochverschlüsse erfolgt unmittelbar nach der Einlagerung. Einzelne Arbeitsschritte finden innerhalb der Verrohrung statt und sind dem Sperrbereich zugeordnet, siehe Abbildung 3-8. Im ersten Arbeitsschritt ist der Innenliner ca. 9 m unterhalb der Sohle der Überfahrungsstrecke zu verschließen (Abbildung 3-8 b). Der obere Teil der Verrohrung (ca. 6 m) muss für den weiteren Verschluss des Bohrloches zurückgebaut werden. Dazu ist eine Entfernung dieses Linersegments und auch der Bohrlochschleuse aus dem Sperrbereich nötig. Der freigemessene und ggf. dekontaminierte Innenliner wird oberhalb des Deckels abgetrennt (vgl. Abbildung 3-8 c und d).

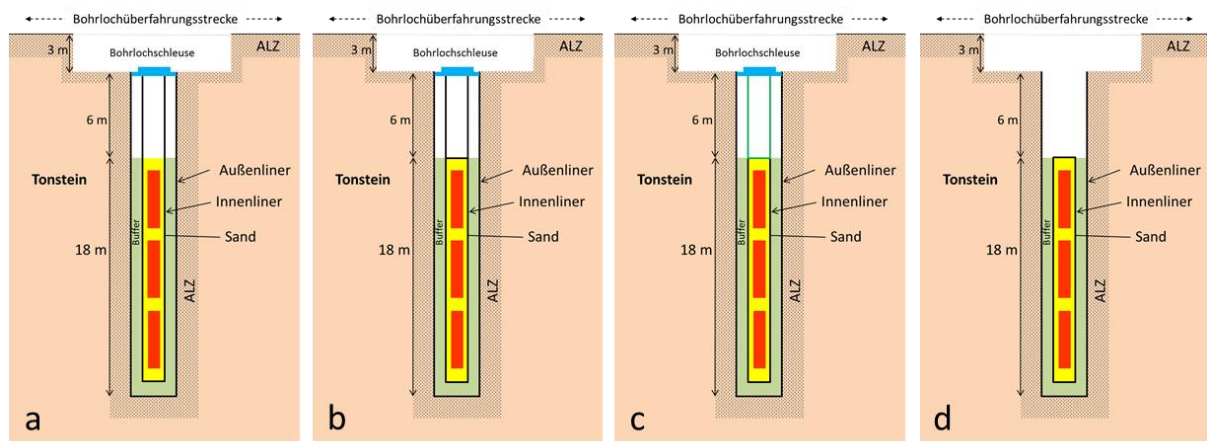


Abbildung 3-8: Schematische Darstellung der Rückbauprozesse zur Errichtung des Bohrlochverschlusses im Einlagerungsbohrloch

Auf den verschlossenen Innenliner wird eine weitere Scheibe des kompaktierten Tonbuffers aufgelegt (vgl. Abbildung 3-9 a). Im Anschluss kann der Außenliner im Bereich zwischen dem Bohrlochkeller und dem Buffer (ca. 5 m) entfernt werden (vgl. Abbildung 3-9 b). Vor dem Einbau des Bohrlochverschlusses ist die Kontur am Dichtungsstandort entsprechend der bestehenden ALZ nachzuschneiden (vgl. Abbildung 3-9 c). Anschließend folgen die Errichtung der Bentonitdichtung und die Verfüllung des Bohrlochkellers. Das befüllte und verschlossene Bohrloch entspricht dann dem in Abbildung 3-3 dargestellten schematischen Aufbau.

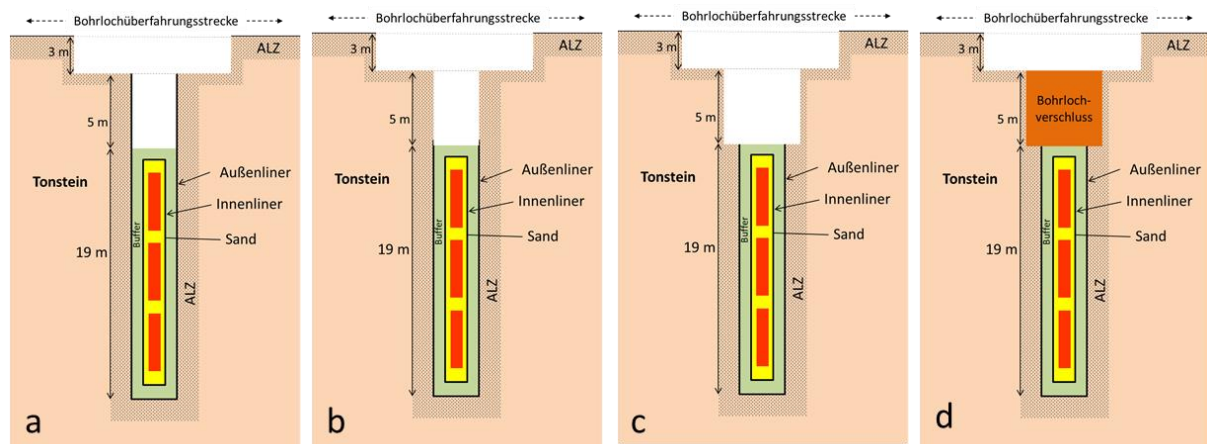


Abbildung 3-9: Schematische Darstellung der Errichtung des Bohrlochverschlusses

4 Rückholungskonzept

Das im FuE-Vorhaben ERATO (DBE TEC, 2010a) bevorzugte Einlagerungskonzept Bohrlochlagerung berücksichtigte, in Anlehnung an die zu diesem Zeitpunkt geltenden Sicherheitskriterien, keine Rückholbarkeit. Mit dem FuE-Vorhaben ANSICHT (DBE TEC, 2015) wurde dieses Einlagerungskonzept weiterentwickelt und unter Berücksichtigung der „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ (BMU 2010) einzelne Maßnahmen zur Erleichterung der Rückholbarkeit implementiert. Bei einem Rückholungsbeschluss sollen die eingelagerten Kokillen in Umkehrung des Einlagerungsprozesses zurückgeholt werden. Die Überführung des Grobkonzeptes und der allgemeinen Rückholungsstrategie in eine konkrete Rückholungsplanung muss unter Berücksichtigung der geltenden Sicherheits- und Auslegungsanforderungen nach (BMU, 2010) erfolgen. Tabelle 4-1 fasst die wesentlichen Auslegungsanforderungen nach (BMU, 2010) zusammen und bewertet deren Relevanz für die Rückholung.

Tabelle 4-1: Übersicht Auslegungsanforderungen für die Einlagerung

Auslegungsanforderung		Beurteilung
8.1	Für die Sicherheit des Endlagers in der Betriebsphase einschließlich Stilllegung ist die Zuverlässigkeit und Robustheit von Sicherheitsfunktionen innerhalb des Endlagers in Anlehnung an das kerntechnische Regelwerk für vergleichbare Funktionen in anderen kerntechnischen Anlagen nachzuweisen.	Für Konzeptebene gegenwärtig nicht nötig
	Für die Betriebsphase sind darüber hinaus in vier Sicherheitsebenen gestaffelte Maßnahmen zu planen, wie dies analog auch für Kernkraftwerke gilt. Durch die Zuordnung dieser vier Ebenen zu Anlagenzuständen und durch die Festlegung der für diese Anlagenzustände zu ergreifenden oder vorgesehenen Schutzmaßnahmen ist ein Konzept in der Tiefe gestaffelter Abwehrmaßnahmen (defence in depth) zu realisieren. Folgende vier Sicherheitsebenen sind zu betrachten: Normalbetrieb - Maßnahmen verhindern Eintreten von Betriebsstörungen Anomaler Betrieb (Betriebsstörungen) - Maßnahmen verhindern Eintreten von Störfällen Störfälle - Maßnahmen beherrschen Störfälle Auslegungsüberschreitende Störfälle/Ereignisse - Maßnahmen verringern die Eintrittswahrscheinlichkeit oder vermindern Umgebungsauswirkungen	Für Konzeptebene gegenwärtig nicht nötig
8.2	Die Durchörterung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit Schächten, Auffahrungen oder Bohrungen ist zu minimieren.	Wird teils erfüllt
	Bohrungen, Schächte und weitere Auffahrungen sind gebirgsschonend auszuführen und, falls sie nicht mehr gebraucht werden, vor dem Einlagerungsbetrieb so zu verschließen, dass die Barriereigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und sonstiger sicherheitsrelevanter Barrieren erhalten bleiben.	Wird erfüllt

Fortsetzung Tabelle 4-1:

Auslegungsanforderung		Beurteilung
8.3	Bei der Festlegung der Grenzen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit den darin aufgefahrenen Einlagerungsfeldern und Einlagerungskammern oder Einlagerungsbohrlöchern müssen sowohl eine hinreichende Tiefenlage wie auch ein ausreichender Abstand zu geologischen Störungen eingehalten werden. Die Tiefenlage und der Abstand sind im Rahmen der durchgeführten Sicherheitsanalysen und Sicherheitsbewertungen abzuleiten.	Wird erfüllt, Mindestabstände werden eingehalten
8.4	Die Handhabung von Abfallgebinden ist möglichst vollständig von den z. B. für Erhalt, Auffahrung oder Versatz von Stollen erforderlichen bergmännischen Arbeiten zu trennen.	Wird erfüllt
8.5	Das Endlager ist in Einlagerungsfelder mit einzelnen Einlagerungsbereichen zu untergliedern. Die Anzahl der offenen Einlagerungsbereiche ist gering zu halten. Diese sind zügig zu beladen, anschließend zu verfüllen und sicher gegen das Grubengebäude zu verschließen.	Wird erfüllt
8.6	Für die wahrscheinlichen Entwicklungen muss eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole zu beachten.	k.A.
	In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein. Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung oder Bergung getroffen werden, dürfen die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen.	Wird bedingt erfüllt, Gegenstand des vorliegenden Vorhabens
8.7	Das Einschlussvermögen des Endlagers muss auf verschiedenen Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen beruhen. Mit Blick auf die Zuverlässigkeit des Einschlusses ist das Zusammenspiel dieser Barrieren in ihrer Redundanz und Diversität zu optimieren.	Wird erfüllt
8.8	Vor Inbetriebnahme des Endlagers muss ein umsetzbares und geprüftes Stilllegungskonzept vorliegen. Es muss dafür gesorgt sein, dass die personellen, finanziellen und technischen Gegebenheiten eine eventuell notwendige kurzfristige Umsetzung des Stilllegungskonzeptes ermöglichen. Das Stilllegungskonzept ist im Rahmen der alle zehn Jahre stattfindenden Sicherheitsüberprüfungen entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik zu überprüfen und Notwendigenfalls fortzuentwickeln. Es muss dargelegt werden, innerhalb welchen Zeitraumes ein Verschluss möglich ist.	Für Konzeptebene gegenwärtig nicht nötig

Das bestehende Endlagerkonzept nach (DBE TEC, 2015) weist keinen ewG aus. Die Festlegung eines ewGs ist nur in Folge einer Sicherheitsanalyse möglich. Die im Punkt 8.2 formulierten Auslegungsanforderungen einer minimalen Durchörterung kann daher nicht abschließend beurteilt werden. Eine Minimierung der Perforation des Wirtsgesteins wird durch die Limitierung der Tageszugänge auf zwei Schächte erfüllt. Eine zusätzliche Minimierung der Auffahrungen ist nur unter Berücksichtigung bergmännischer bzw. betrieblicher Zwänge möglich. Mit der Anwendung des aus drei Hauptstrecken bestehenden Auffahrungsschemas und der Zusammenführung der Einlagerungsreihen wird der Auffahrungsaufwand soweit möglich minimiert. Für eine mögliche Rückholung soll dieses Grundkonzept des Grubengebäudes beibehalten werden. Zusätzliche Durchörterungen sind nicht vorgesehen.

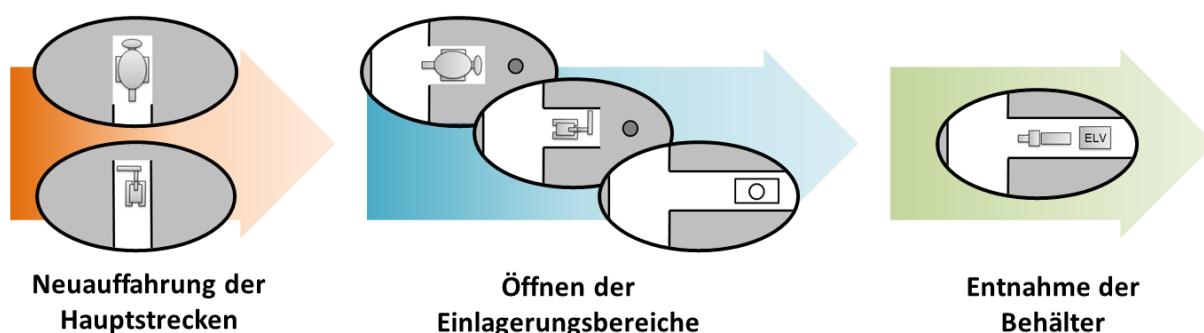


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung der Hauptprozesse im Rückholungsbetrieb

Für das bisherige Behälterkonzept der BSK wurde nicht untersucht, in wie weit die Auslegungsanforderung der Handhabbarkeit der Abfallbehälter für einen Zeitraum von 500 Jahren erfüllt ist. Auch die Umsetzung der im Punkt 8.6 gestellten Anforderung der Rückholbarkeit der Behälter während der Betriebszeit ist im bestehenden Konzept unzureichend beschrieben. Die Erarbeitung eines geeigneten Rückholungskonzeptes ist der Auslöser für die Arbeiten im Rahmen des vorliegenden FuE-Projektes.

Die Auslegungsanforderungen (BMU, 2010) werden vom Endlagerkonzept der vertikalen Bohrlochlagerung im Tongestein (DBE TEC, 2015) weitestgehend erfüllt. Die im Punkt 8.6 geforderte Rückholbarkeit der Behälter ist berücksichtigt. Auf Basis der allgemeinen Rückholungsstrategie wird nachfolgend das Rückholungskonzept beschrieben und die Planungen dazu in den anschließenden Abschnitten weiter vertieft.

Der Rückholung der eingelagerten Behälter ist die Neu- bzw.- Wiederauffahrung aller bereits verfüllten Zugangsstrecken vorangestellt. Das Grubengebäude des Einlagerungsbetriebes soll auch während des Rückholungsbetriebes wieder genutzt werden.

Nach der Wiederauffahrung der Bohrlochüberfahrungsstrecken, ist der verfüllte Bohrlochkeller wieder freizulegen und der Bohrlochverschluss sowie Teile des Buffers soweit zu entfernen, dass der verschlossene Innenliner zugänglich ist. Der Innenliner muss wieder geöffnet und die Bohrlochsleuse erneut auf diesem installiert werden.

Die Entnahme des Sandversatzes und der Kokillen soll in Umkehrung des Einlagerungsvorganges und mit der gleichen Technik erfolgen. Dazu wird die Einlagerungsvorrichtung (ELV) über dem Bohrloch positioniert. Mittels einer Saugvorrichtung soll das Versatzmaterial (Quarzsand) schrittweise aus dem Bohrloch entfernt werden. Das Versatzmaterial ist auf eventuell vorhandene Kontaminationen hin zu überprüfen und abzutransportieren. Ist der Kopf der oberen Kokille freigelegt, wird mit der ELV ein leerer Transferbehälter auf dem Bohrloch positioniert und die Kokille mit der ELV aus dem Bohrloch gezogen. Dazu wird der Greifer der Einlagerungsvorrichtung in das Bohrloch gelassen. Der Greifer schlägt am Traggilz der rückholbaren Kokille an und zieht diese in den selbstabschirmenden Transferbehälter. Der Transferbehälter wird anschließend in eine liegende Position gedreht und auf einen Plateauwagen abgeladen. Der beladene Plateauwagen wird mit dem gleisgebundenen Transportsystem von der Bohrlochüberfahrungsstrecke über die Gebindetransportstrecke bis zum Förderschacht und von dort aus nach über Tage transportiert. Die Arbeitsschritte zur Entnahme des Sandversatzes und der Kokille werden solange wiederholt bis das Bohrloch komplett geräumt ist.

4.1 Einteilung der Strahlenschutzbereiche bei Wiederauffahrung

Während des Einlagerungsbetriebes finden die bergbaulichen Tätigkeiten (Vortrieb) im 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 gemäß § 44 (StrlSchV, 2017) auf Kontamination/Aktivierung hin geprüft und ggf. gemäß § 29 (StrlSchV, 2017) freigemessen werden. Dies kann beispielsweise notwendig sein, um das Haufwerk übertage aufzuhalten oder anderweitig zu nutzen. Die radiologische Überwachung der Neuauffahrung und das potenzielle Freimessen des gesamten Haufwerks stellen einen großen technischen und zeitlichen Aufwand dar und beeinflusst damit die Errichtungs- und Betriebsdauer des Rückholungsbergwerks.

Zur Erleichterung der Rückholungsarbeiten besteht theoretisch die Möglichkeit, die Bohrlochüberfahrungsstrecken oder die Hauptstrecken vor dem Versatz aus dem KB zu entlassen. Dies ist mit einem erheblichen zeitlichen und technischen Aufwand verbunden, würde aber eine spätere Rückholung evtl. erleichtern. Dies gilt aber nur soweit wie potenzielle Kontaminationen oder Freisetzungen entlang der geplanten Streckenachsen ausgeschlossen werden können. Zum heutigen Zeitpunkt und auch während eines zukünftigen Einlagerungsbetriebes ist nicht bekannt, ob eine Rückholung überhaupt umgesetzt wird bzw. warum eine Rückholung notwendig wird. Der Nutzen resultierend aus dem Entlassen von Grubenteilen aus dem KB als vorsorglich getroffene Maßnahmen zur potenziellen Erleichterung der Rückholung ist im Vergleich zum notwendigen Aufwand daher äußerst fraglich.

Das entlassen der Strecken aus dem KB muss dann in das Verfüll- und Verschlusskonzept aufgenommen werden. Negative Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit sind nicht zu er-

kennen; somit entsteht kein Widerspruch zu den geltenden Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010). 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 vollständig ausgeschlossen werden.

Die Bohrlochüberfahrungsstrecken sollen nach der Neuauffahrung und vor dem Beginn der Rückholungstätigkeit in den KB überführt werden. Das Entfernen der Bohrlochverschlüsse muss vorsorglich im KB, getrennt vom restlichen Grubengebäude, erfolgen. Die Errichtung eines KB im Grubengebäude erfordert, dass alle wettertechnisch nachgeschalteten Grubenteile auch dem KB zugeordnet werden. Das größte Risiko einer Kontaminationsverschleppung wird während des Öffnens des Bohrlochliners und dem Aufsetzen der Bohrlochschleuse erwartet. Diese Arbeiten sollten stets in einer Einhausung erfolgen. Der Innenraum des Bohrlochinnenliners wird stets dem Sperrbereich zugeordnet.

Ein regulärer Übergang zwischen beiden Strahlenschutzbereichen ist untertage nur im Infrastrukturbereich vorgesehen. Gemäß den Anforderungen aus § 44 StrlSchV (StrlSchV, 2014) 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, 2014) 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 Bohrlochüberfahrungsstrecken und Richtstrecken. 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, 2014) 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.

4.2 Umgang mit dem Ausbau

Die geomechanischen Eigenschaften des Tongesteins erfordern die Errichtung eines Ausbaus in allen Grubenbauen. Ziel ist es die Eigentragfähigkeit des Gebirges so zu verstärken, dass der Grubenraum für die Dauer der Nutzung zweckentsprechend offengehalten werden kann. Für alle Grubenbaue ist im Endlagerkonzept ein massiver Betonausbau vorgesehen. Die genaue Ausgestaltung hängt von den Eigenschaften des Wirtsgesteins und Anforderungen des jeweiligen Grubenbaus und dessen Nutzungsdauer ab. In der Betriebszeit ist die Gewährleistung der betrieblichen Sicherheit (Hohlraumstabilität) maßgeblich. Der Ausbau wird direkt nach der Auffahrung eingebracht und verbleibt auch nach Ende der Nutzungsdauer im Gebirge. Damit beeinflusst der Ausbau die Neuauffahrung aller Strecken während der Rückholung. Zusätzlich kann der Ausbau einen Einfluss auf die Langzeitsicherheit bzw. die Entwicklung des Endlagersystems nach Versatz und Verschluss haben. Die Aspekte der betrieblichen Sicherheit, der Langzeitsicherheit und der Rückholbarkeit führen zu einem Zielkonflikt, gekennzeichnet durch teils gegensätzlichen Anforderungen an das Ausbausystem. Die betriebliche Sicherheit erfordert einen zuverlässig funktionsfähigen Ausbau, mit einer Lebensdauer über die gesamte Betriebszeit. Dies gilt vor allem für den Ausbau im KB. Dort sind zusätzliche Instandsetzungsarbeiten während der Betriebszeit zu vermeiden. Das Rauben des Ausbaus vor dem Verschluss birgt erhebliche betriebliche Risiken und ist nicht vorgesehen. Für die Langzeitsicherheit und auch die Rückholbarkeit ist ein verbleibender Ausbau aber eher hinderlich.

Aus Sicht der betrieblichen Sicherheit scheint für alle Grubenbaue die Nutzung eines mehrschaligen Ausbausystems zielführend. Entsprechend dem Stand der Technik, wird im ersten Schritt parallel zur Auffahrung ein Verbundausbau aus Gebirgsankern und armiertem Spritzbeton eingebracht. Das Gebirge wird so kurz nach der Erstauffahrung stabilisiert. Die Dimensionierung der Anker wie der Spritzbetonschicht hängt wesentlich von der Nutzungsdauer der jeweiligen Grubenbaue ab. Die zweite, innere Schale des Ausbaus wird nach Abklingen der Gebirgskonvergenz errichtet. Dem Stand der Technik entsprechend kann diese Schale in Ortbetonbauweise oder auch aus vorgefertigten Segmenten errichtet werden.

Das Verfüll- und Verschlusskonzept, der Anforderung 8.5 (BMU 2010) folgend, sieht die zügige Verfüllung von Einlagerungsbereichen nach Ablauf ihrer Nutzungsdauer vor. Die Offenhaltungsdauer eines Grubenbaus besteht somit aus der Zeit zwischen Auffahrung und Verfüllung; im Fall der Infrastrukturstrecken und Teile der Hauptstrecken betrifft dies die gesamte Betriebszeit von mehreren Jahrzehnten. Die Querschläge bleiben bis zur vollständigen Belegung des jeweiligen Einlagerungsfelds offen, was einigen Jahren entspricht. Die Bohrlochüberfahrungsstrecken werden bedarfsgerecht errichtet und bleiben bis zum Ende ihrer Besetzung mit Abfallgebinden offen. Dies entspricht ca. ein bis zwei Jahren Offenstandszeit.

Als Anwendungsbeispiel für das beschriebene Ausbausystem kann das französische Endlagerprojekt Cigéo genannt werden. Im Endlagerprojekt Cigéo ist vorgesehen, nach Erstauffahrung, Ankerung und dem Auftragen einer Spritzbetonschicht, eine gewisse Gebirgskon-

vergenz (je nach Grubenbau 6 Monate bis zwei Jahre) abzuwarten, um dann eine knapp ein Meter mächtige Ortbetonschicht als Innenschale zu gießen. Dieser Ausbau soll für die gesamte Betriebszeit des Endlagers (> 100 Jahre) intakt bleiben. Eine bedarfsgesteuerte Ausbesserung innerhalb dieses Zeitraums ist zulässig. Die Herangehensweise an die Auslegung des Ausbaus ist dabei dem Tunnelbau entnommen. Einige Strecken werden mit Tunnelbohrmaschinen errichtet. Diese Strecken werden im ersten Schritt mit einem Ausbau in Tübbingbauweise (vorgefertigte, armierte Betonsegmente) verkleidet und im Nachgang mit einem Innenausbau vergossen. (Krieger et al., 2017)

Für das Einlagerungskonzept der vertikalen Bohrlochlagerung bildet die späteste mögliche Rückholung das Referenzszenario. Zu Beginn der Rückholung sind alle Strecken des Grubengebäudes bereits vollständig versetzt und durch Streckenverschlüsse verschlossen. Grundsätzlich ist es sinnvoll, bei der Rückholung das vorhandene Grubengebäude wiederzuverwenden. Dies schließt eine Nutzung des vorhandenen Streckenausbaus mit ein. Eine zusätzliche Durchörterung des Einlagerungshorizonts wird insbesondere bei der zwangsläufigen Annäherung an das alte Grubengebäude als gebirgsmechanisch ausgesprochen nachteilig angesehen und ist deshalb nach Möglichkeit zu vermeiden.

Eine Entnahme des Ausbaus vor dem Versatz würde zwar den Zielkonflikt zur Langzeitsicherheit entschärfen, ist aber mit hohen Risiken der Betriebssicherheit verbunden und wird daher nicht weiter betrachtet. Die Entnahme sollte nur auf die unbedingt notwendigen Streckenteile (z.B.: Dichtungsstandorte) begrenzt sein.

Für die Konzeption der Neuauffahrung sind somit die Eigenschaften des Versatzkörpers, des Ausbaus und des Wirtsgesteins zu beachten. Alle drei Materialien weisen deutlich unterschiedliche mechanische Eigenschaften auf. Dies ist bei der Auswahl einer geeigneten Vortriebstechnik zu beachten. Bei Neuauffahrung des Grubengebäudes wird im Wesentlichen der weiche Bentonit- oder der Tonstein-Granulat-Buffer entfernt und parallel dazu die Stabilität des Hohlraums geprüft bzw. wieder hergestellt. Im Umgang mit dem vorhandenen Streckenausbau sind drei grundsätzliche Strategien denkbar:

- A) Ausbaudimensionierung für Einlagerung und Ertüchtigung bei Neuauffahrung
- B) Rauben des alten und Errichtung eines neuen Ausbaus bei Neuauffahrung
- C) Ausbaudimensionierung für die maximale Betriebszeit (Einlagerung und Rückholung)

Die Vor- und Nachteile aller drei Strategien werden im Weiteren kurz erläutert. Nach dem bestehenden Einlagerungskonzept wird der Ausbau eines Grubenbaus für die Betriebszeit der Einlagerung ausgelegt.

Im Referenzszenario der Rückholung (späteste Rückholung) ist für die langlebigen Grubenbaue das Ende der geplanten Nutzungsdauer somit mit dem Beginn der Rückholung erreicht. Unter der Annahme, dass die Rückholung ähnlich lang wie die Einlagerung dauert, muss der Ausbau dann für die weitere Nutzungsdauer der Rückholung ertüchtigt werden. Dies entfällt nur für andere Rückholungsszenarien mit einem früheren Rückholungsbeginn. Solange die Betriebszeit "Einlagerung" plus die Betriebszeit "Rückholung" kleiner als die ursprünglich geplante Gesamtbetriebszeit der Einlagerung ist, deckt der Auslegungszeitraum

des Ausbaus langlebiger Grubenräume den Rückholungsbetrieb ab. Die Nutzungsdauer kurzlebiger Grubenbaue ist mit Rückholungsbeginn teils deutlich überschritten. Kurzlebige Grubenteile sind mit Rückholungsbeginn schon lange versetzt und verschlossen. Die verbleibende Tragfähigkeit der einzelnen Grubenteile ist nicht bekannt. Im Rahmen der Strategie A muss deshalb parallel zur Wiederauffahrung der Zustand des gesamten Ausbaus überprüft und dieser ggf. instand gesetzt werden. Die Neuauffahrung beschränkt sich in diesem Fall im Wesentlichen auf die Versatzentnahme. 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. Der erforderliche Instandsetzungsaufwand muss parallel zur Versatzentnahme geprüft und umgesetzt werden. Die Instandsetzungsarbeiten können begrenzt, auch die Entnahme geschädigter Bereiche des Ausbaus umfassen. Dies ist bei der Auswahl der Vortriebstechnik zu berücksichtigen und kann zu deutlich variierenden Vortriebsleistungen führen.

Mit der Ertüchtigung des Ausbaus kann eine Verringerung des offenen Streckenquerschnitts einhergehen die wiederum zu einer Beeinträchtigung der Fahrwege für die benötigten Maschinen führen kann. Dies ist in jedem Fall zu vermeiden.

Eine Alternative zur Instandsetzung besteht in der vollständigen Entnahme des alten Ausbaus und der Errichtung eines neuen Ausbaus, ausgelegt für die Betriebszeit Rückholung (Strategie B). Eine Querschnittsminimierung der Strecken während der Einlagerung ist möglich. Die Entnahme würde während der Neuauffahrung, durch ein Überschneiden des alten Ausbaus stattfinden. Damit muss für die Auffahrung aller Strecken eine geeignete Technik zur Versatzentnahme und dem Überschneiden bereitgehalten werden. Die zeitgleiche Entnahme von quasi losem Versatz und festem Betonausbau stellt hohe und teils widersprüchliche Anforderungen an die Vortriebstechnik. Das Haufwerksvolumen steigt um das Volumen des zusätzlich entfernten Ausbaus. Dieser Ansatz erfordert zusätzlich, dass der Ausbau des Einlagerungsbergwerks so gestaltet wird, dass er ein Überschneiden zumindest erleichtert. Spritzbeton mit Mattenverzug und bspw. stählernen Spreizhülsenankern würden nur einen sehr langsamen Vortriebsfortschritt erlauben, da eine Teilschnittmaschine nicht für das Durchschneiden von Stahl ausgelegt ist. Faserarmerter Spritzbeton und glasfaserverstärkte Kunststoffanker würden den Vortrieb vereinfachen. Ob mit überschneidbarem Ausbau ein grundsätzlich tragfähiger Ausbau für die Betriebszeit der Einlagerung herstellbar ist, ist abhängig von den geomechanischen Randbedingungen im Einlagerungshorizont des Endlagers. Da dieser unbekannt ist, ist die Machbarkeit dieser Ausbauvariante schwer bewertbar; insbesondere, da langfristige Erfahrungen von untertägigen Arbeiten in Tongestein nicht verfügbar sind.

Als dritte Variante könnte der Ausbau des Grubengebäudes des Einlagerungsbergwerks für die Betriebszeit der Einlagerung und eine mögliche Betriebszeit der Rückholung ausgelegt werden (Strategie C). Dies entspricht einer Verdoppelung der Betriebszeit langlebiger Grubenbaue und einer Vervielfachung der Betriebszeit kurzlebiger Grubenbaue. Der Ausbau ist so wesentlich massiver, um seine Standfestigkeit trotz sämtlicher Einwirkungen, die ihn während der Lebensdauer negativ beeinflussen, erhalten zu können. Dementsprechend ist auch der Querschnitt der Erstauffahrung größer als der Querschnitt ohne Berücksichtigung der Rückholungsanforderung. Die Wiederauffahrung beschränkt sich auf die Versatzentnahme und ist in diesem Szenario theoretisch wesentlich einfacher zu bewerkstelligen. Alle Arbeiten

würden in einem anforderungsgerechten Ausbau für die gesamte Rückholungszeit stattfinden können.

Eine wesentliche Schwierigkeit dieser Variante ist die Vorhersagbarkeit der Tragfähigkeit des Ausbaus für die notwendigen Zeiträume. Je länger der Ausbau seine Tragfähigkeit garantieren soll, desto schlechter sind die Einwirkungen auf den Ausbau innerhalb des notwendigen Zeitraums prognostizierbar. Zusätzlich ist der Ausbau in verfüllten Strecken zwischen Verfüllung und Wiederauffahrung nicht überwachbar. Die Auslegung für die Betriebszeiten der Einlagerung und Rückholung ist also mit deutlichen Unsicherheiten behaftet, wodurch der Ausbau vermutlich stark überdimensioniert ausfallen würde.

Die Auswirkungen eines widerstandsfähigen Ausbaus für die Einlagerungs- und Rückholungszeit auf die Langzeitsicherheit ist nach aktuellem Stand von Wissenschaft und Technik noch wenig erforscht. Ein deutlich widerstandsfähigerer Ausbau würde den Zielkonflikt weiter verschärfen. Der Beton im Ausbau stellt einen Fließweg für Fluide dar. Da sich die Zementphasen im Laufe der Zeit zersetzen, nimmt die Tragfähigkeit des Betons ab. Durch die Konvergenz wird er schließlich kompaktiert und die Wegsamkeiten werden verschlossen. Die integrale Permeabilität des endgültigen Zustands nach Zersetzung und Kompaktion des Betons ist vermutlich unabhängig von der ursprünglichen Widerstandsfähigkeit des Ausbaus. Mit zunehmender Widerstandsfähigkeit des Ausbaus dauert dieser Prozess aber länger. Der Betonausbau könnte damit die notwendige Funktionsdauer der Verschlussbauwerke beeinflussen. Eine Beeinflussung der Qualität der Langzeitsicherheit nach Ablauf der Funktionsdauer dieser Bauwerke wird gegenwärtig aber nicht erwartet (DBE TEC, 2017b). Die Verlängerung der Funktionsdauer der Verschlussbauwerke ist, neben den Unsicherheiten in der Auslegung des Ausbaus, allerdings ein wichtiges Gegenargument zu dieser Ausbauvariante. Eine Lebensdauer der geotechnischen Verschlüsse erhöht ebenfalls maßgeblich die Unsicherheiten bei ihrer Auslegung. Dies stellt einen Widerspruch zur Anforderung 8.6 (BMU, 2010) dar, wonach die Maßnahmen zur Berücksichtigung der Rückholung die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen dürfen.

Der steigende Auslegungsaufwand der Ausbaudimensionierung ist eng mit dem Verschluss der jeweiligen Grubenbaue verknüpft. Die geltenden Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010) schreiben vor, *„die Anzahl der offenen Einlagerungsbereiche [...] gering zu halten. Diese sind zügig zu beladen, anschließend zu verfüllen und sicher gegen das Grubengebäude zu verschließen.“* Je nach Definition der Einlagerungsbereiche können die restlichen Strecken bis zum Ende der Betriebszeit offengehalten werden. Das Konzept der Offenhaltung, wie auch in (Kommissionsbericht, 2016) beschrieben, führt zu einer zeitlichen Trennung des Einlagerungsbetriebes und der Verfüll- und Verschlusstätigkeit. Die Offenhaltung würde die Nutzungsdauer aller Strecken auf die gesamte Betriebszeit ausdehnen. Eine zusätzliche Beobachtungsphase vor dem Verschluss (vgl. Kommissionsbericht, 2016) führt zu einer weiteren Verlängerung der Nutzungsdauer und damit wird tendenziell auch ein immer stärkerer Ausbau benötigt. Mit der Annahme, dass die Einlagerungsdauer gleich der Rückholungsdauer ist, würde im Konzept der Offenhaltung bis zur Hälfte der Betriebszeit auch die Rückholung abgedeckt sein. Das Konzept der Offenhaltung steht aber klar im Widerspruch zu den geltenden Sicherheitsanforderungen, die einen zügigen Verschluss des gesamten Endlagers vorsehen. Die zeitliche Trennung von Einlagerungs-, Verfüll- und Verschlusstätigkeit ändert

außerdem nichts an der Notwendigkeit die Neuauffahrung in die Rückholung einzubeziehen, da diese per Definition bis zum Verschluss der Schächte gegeben sein muss und somit auch die Verfüll- und Verschlussstätigkeit in den Strecken abdecken muss.

Von den vorgestellten Strategien zum Umgang mit dem Ausbau wird Strategie A – Ausbaudimensionierung für Einlagerung und Ertüchtigung bei Neuauffahrung – als Vorzugsvariante für alle Grubenbaue gewählt. Die Auswirkungen auf das Ausbausystem sind für die verschiedenen Grubenbaue unterschiedlich. Zu betrachten sind langlebige Grubenteile wie die Frischwetterstrecken (ÜB), die Abwetterstrecken (KB), die Gebindettransportstrecken (KB) sowie die Grubenräume des Infrastrukturbereichs im ÜB und KB. Diese Grubenteile werden während der gesamten Betriebszeit genutzt. Im Gegensatz dazu ist die Nutzungsdauer der Querschläge und Bohrlochüberfahrungsstrecken zeitlich deutlich begrenzt.

Infrastrukturräume im ÜB und KB sind für den Betrieb unerlässlich. Die Grubenräume werden während der gesamten Betriebszeit genutzt. Für Infrastrukturräume im KB wird gefordert, dass der Ausbau über die gesamte Nutzungsdauer hinweg ohne zusätzliche Instandsetzungsmaßnahmen gebrauchstauglich bleibt. Auch für den Rückholungsbetrieb sind Infrastrukturräume unerlässlich. Mit der Neuauffahrung werden auch diese wiederaufgefahren und entsprechend instandgesetzt. Querschnittsreduzierungen in den Infrastrukturräumen sind nach Möglichkeit zu vermeiden können aber ggf. durch die Neuauffahrung weiterer Grubenräume kompensiert werden.

Die Nutzungsdauer der Hauptstrecken variiert in Abhängigkeit des Abstandes zu den Schächten. Die einzelnen Einlagerungsfelder und die angeschlossenen Teile der Hauptstrecken werden nach der Einlagerung versetzt und verschlossen. Zur Bewertung der Auswirkungen der Rückholbarkeit auf den Ausbau wird vereinfachend für alle Hauptstrecken eine Nutzung über die gesamte Betriebszeit hinweg angenommen. Die Verfüllung der Grubenbaue erfolgt somit kurz vor Beginn der Rückholung. Thermische, hydraulische, mechanische und chemische Einwirkungen auf den Ausbau führen mit der Zeit zu einer Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit und später auch der Tragfähigkeit. Im Zuge der Wiederauffahrung muss der Ausbau soweit ertüchtigt werden, dass die Gebrauchstauglichkeit für die Betriebsdauer der Rückholung gewährleistet ist. In allen Grubenteilen des KB sollen zusätzliche Instandhaltungsmaßnahmen während der Betriebszeit der Rückholung vermieden werden. Zur Erleichterung der Ertüchtigung bzw. Instandsetzung des Ausbaus muss bei der Dimensionierung eine Überschneidbarkeit der verwendeten Materialien berücksichtigt werden.

Die Bohrlochüberfahrungsstrecken werden nach der Befüllung aller Einlagerungsbohrlöcher versetzt. Die Nutzungsdauer der Strecken ist zeitlich eng begrenzt und beträgt nur einige Monate bis wenige Jahre. Auch die Querschläge werden nach Abschluss der Einlagerung in allen angeschlossenen Strecken versetzt. Die Nutzungsdauer beträgt einige Jahre und liegt deutlich unter der Gesamtbetriebszeit. Mit Beginn der Rückholung sind einige der Querschläge und Bohrlochüberfahrungsstrecken bereits seit mehreren Jahrzehnten verfüllt. Thermische, hydraulische, mechanische und chemische Einwirkungen auf den Ausbau führen zur bereits genannten Degradation der Ausbaumaterialien. In Folge dieser Einwirkungen über den unbestimmten Zeitraum hinweg sind zumindest teilweise ein Verbruch bzw. eine Schädigung des alten Ausbaus und parallel dazu eine Kompaktion des Versatzes zu erwarten.

ten. Der Instandsetzungsaufwand bei der Wiederauffahrung der Bohrlochüberfahrungsstrecken wird als deutlich höher als bei den langlebigen Strecken eingeschätzt. Verbrochene und geschädigte Bereiche müssen im Zuge der Neuauffahrung entfernt werden. Um dies zu erleichtern, sollte bereits bei der Endlagerplanung des Einlagerungsbetriebes eine Überschneidbarkeit des Ausbaus berücksichtigt werden. Die Entnahme des massiven Betonausbaus durch die Vortriebstechnik wird beispielsweise durch den Verzicht von Stahlmattenarmierung im Spritz- und Ortbeton oder auch die Nutzung von stahlarmen Gebirgsankern begünstigt. Generell vereinfacht der Verzicht auf Stahlkomponenten im Ausbau das Lösen und Erleichtert damit die Rückholbarkeit. Die Bohrlochüberfahrungsstrecken sind dem KB zugeordnet. Die Neuauffahrung muss im KB stattfinden. Während der Neuauffahrung ist eine potenzielle Kontaminationsverschleppung im angeschlossenen Grubengebäude möglichst zu vermeiden. Das Haufwerk darf den KB nicht ohne vorher auf eine Kontamination hin gemäß § 44 (StrlSchV, 2017) geprüft zu sein verlassen. Aus der Zuordnung zum KB erwächst für die Ertüchtigung des Ausbaus die Anforderung, dass der Streckenausbau ohne zusätzliche Instandhaltungsmaßnahmen seine Gebrauchstauglichkeit über die gesamte Nutzungsdauer der Rückholung erhält.

4.3 Auswirkungen der Rückholbarkeit auf die Verschlussbauwerke

Zusätzlich zu den Bohrlochverschlüssen sind im Verfüll- und Verschlusskonzept (DBE TEC, 2015) Streckenverschlüsse in den Hauptstrecken und Querschlägen vorgesehen, siehe Abbildung 4-2. Alle Streckenverschlüsse bestehen aus Betonwiderlagern und Bentonit-Dichtelementen. Sie unterscheiden sich in Anordnung und Anzahl der einzelnen Elemente. In den Querschlägen werden einfache Streckenverschlüsse mit einem, in zwei Widerlager eingefassten Dichtelement errichtet. In den Hauptstrecken werden doppelte Streckenverschlüsse mit zwei Dichtelementen und je drei Widerlagern errichtet. Zur direkten Anbindung des Bentonitdichtkörpers an das Gebirge wird im Bereich der Dichtelemente der Streckenausbau entfernt.

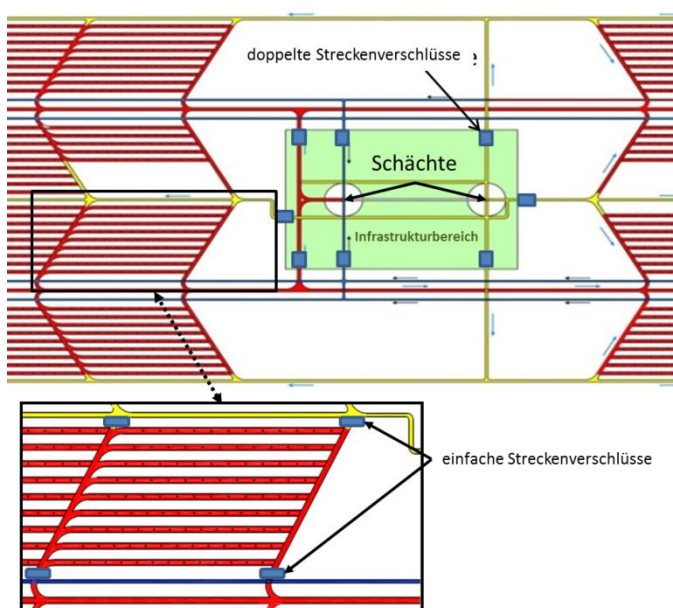


Abbildung 4-2: Lage der Streckenverschlüsse im Grubengebäude
NORD, nach (DBE TEC, 2015)

Die Verschlussbauwerke in den Hauptstrecken werden am Rand des Infrastrukturbereiches errichtet. Diese Gebirgsbereiche bieten ausreichend Platz, um die Verschlussstandorte zu umfahren. Mit der Wiederauffahrung werden vom Infrastrukturbereich aus die Hauptstrecken in neuen Streckenverläufen an den Verschlüssen vorbei errichtet.

Die einfachen Streckenverschlüsse sind zwischen den äußeren Bohrlochüberfahrungsstrecken der Einlagerungsfelder und den Hauptstrecken platziert. Nach der bisherigen Auslegung beträgt der Abstand zwischen den Streckenachsen der beiden benachbarten Strecken 26 bzw. 30 m. Eine Umfahrung der Verschlüsse ist durch eine veränderte Streckenführung der Querschläge oder der Hauptstrecken möglich. Dies resultiert stets in einer Unterschreitung der Mindestabstände zwischen den Strecken. Da die Streckenabstände und verbleibenden Festen maßgeblich zur geomechanischen Stabilität des Grubengebäudes beitragen sollte in beiden Fällen das gegenwärtige Grubengebäudelayout des Einlagerungsbetriebes angepasst werden. Die Vergrößerung der Streckenabstände erleichtert eine spätere Rückholung, indem ausreichend Raum für eine alternative Streckenführung, unter Einhaltung notwendiger Sicherheitspfeiler/-abstände, bereitgestellt wird. Dies würde zu einer Vergrößerung des Grubengebäudes führen, was teils im Widerspruch zu den Sicherheitsanforderungen des BMU (BMU, 2010) steht, zur Erleichterung der Rückholbarkeit aber nach StandAG § 23 (5) durchaus gestattet ist. Für die einfachen Streckenverschlüsse wird eine Durchörterung angenommen. Mit der Vortriebstechnik Teilschnittmaschine (TSM) können die Betonwiderlager rückgebaut und mit einem Tunnelbagger die Bentonit-Dichtelemente entnommen werden, parallel zur Entnahme des Dichtkörpers muss ein neuer Streckenausbau errichtet werden.

4.4 Versatzentnahme und Neuauffahrung

Tongesteine im Allgemeinen und auch das potenzielle Wirtsgestein am Referenzstandort NORD sind mäßig fest und gebräuchig. Die mittlere einaxiale Druckfestigkeit liegt nach (Nowak & Maßmann, 2013) bei ca. 25,6 MPa ± 1,5 MPa. Die Auffahrung der Strecken erfolgt gebirgsschonend mit einer TSM. Wie bereits ausführlich erläutert ist ein regelmäßiger Ausbau der Strecken unerlässlich. Dazu muss wenigstens ein Anker-Spritzbeton-Ausbau errichtet werden. In langlebigen Grubenbauen muss außerdem eine zweite Innenschale aus Beton eingebracht werden (vgl. Abschnitt 4.2). Von einem solchen Betonausbau sind einaxiale Druckfestigkeiten von ca. 50 MPa und größer zu erwarten.

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 Versatzmaterial aus geschnittenem Haufwerk mit einer Kohäsion $c = 3,7$ MPa und einem inneren Reibungswinkel $\varphi = 12^\circ$ mechanisch charakterisieren. Daraus folgt nach Gl. (4-1) eine einaxiale Druckfestigkeit von ca. 9 MPa. Dies entspricht nur ca. einem Drittel der Gebirgsdruckfestigkeit.

$$\sigma_D = \frac{2 * c * \cos\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad 4-1$$

Für die Neuauffahrung der Hauptstrecken vom Infrastrukturbereich bis zu den ersten Einlagerungsfeldern wird eine Vortriebstechnik analog zum Einlagerungsbetrieb genutzt. Hinsichtlich der Fräsbarkeit des Gebirges sollten zu diesem Zeitpunkt ausreichende Erfahrungen zur Auswahl der geeigneten Vortriebstechnik vorliegen. Die Hauptstrecken werden zumindest teilweise im unverritzten Gebirge aufgeföhren. Der Ausbau wird parallel zum Vortrieb eingebracht.

Für die Aufwältigung der verfüllten Strecken scheinen TSM deutlich ungeeigneter. Das zeitgleiche Schneiden 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 stark schwankende Vortriebsleistungen zu erwarten. Zusätzlich sind TSM für die Entnahme des weichen und ggf. stark gesättigten Versatzes 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 4-3. Tunnelbagger sind in der Lage den weichen Versatz zu entnehmen, können den gesamten Streckenquerschnitt abdecken und sind im Betrieb weniger sensibel in Bezug auf den Feuchtegehalt des Versatzes. Das Werkzeug der Tunnelbagger kann über Schnellwechselvorrichtungen zügig und unkompliziert getauscht werden. Schaufeln zur Versatzentnahme können gegen Hydraulikhämmer oder auch Schneidköpfe getauscht werden. Dies erlaubt eine schnelle Anpassung an wechselnde Be-

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



Abbildung 4-3: Teilschnittmaschine zur Neuauffahrung (links), Tunnelbagger (Liebherr, 2016) (mitte) oder alternativ Haggloader (EPIROC, 2017) (rechts) zur Versatzentnahme

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

Haufwerk, das aus dem Kontrollbereich gefördert werden soll und bspw. über täglich auf Halde deponiert wird, muss gemäß § 44 (StrISchV, 2017) auf Kontamination hin überprüft werden. Soll das Haufwerk als nicht radioaktive Stoffe verwendet werden, so ist es gemäß § 29(StrISchV, 2017) freizumessen. 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. Solche 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.

Parallel zur Wiederauffahrung der Strecken ist die Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit des Ausbaus zu bewerten und dieser entsprechend Instand zu setzen bzw. 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.

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 abge-

schirmten Kabinen auszustatten. Eine stetige radiologische Überwachung der Vortriebsarbeiten ist unerlässlich. Dazu zählen Erkundungsbohrungen mit Kerngewinn, regelmäßige Beprobung des Haufwerks, Abluftüberwachung, Messungen der Ortsdosisleistung sowie persönliche Dosimeter.

4.5 Freilegen des Bohrloches

Nach der Einlagerung der Behälter werden Teile der Bohrlocheinbauten im Kopfbereich entfernt und ein Bohrlochverschluss errichtet, siehe Abbildung 4-4 a. Vor der eigentlichen Rückholung der Behälter (deren aktive Entnahme) muss der Bohrlochverschluss entfernt (Abbildung 4-4 b bis d), die Verrohrung geöffnet und die Bohrlochschleuse erneut aufgesetzt werden. Die notwendigen Arbeitsschritte zur Vorbereitung der eigentlichen Rückholung sowie die aktive Entnahme der Behälter werden in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

Die Lagebestimmung des Bohrlochkellers erfolgt zunächst rein optisch. Die Betonverfüllung ist deutlich vom geschlossenen Streckenausbau zu unterscheiden. Vorseilend zum Rückbau kann eine Erkundungsbohrung von der Sohle aus, entlang der Bohrlochlängsachse, gestoßen werden. Die Bohrung erlaubt die Erkundung des Widerlagers, des Dichtelements, des Kopfbereiches des Buffers, eine Lagebestimmung des Innenliners und eine Beprobung aller Komponenten. Damit können potentielle Kontaminationen frühzeitig erkannt und entsprechende Vorsorgemaßnahmen während der weiteren Arbeiten ergriffen werden.

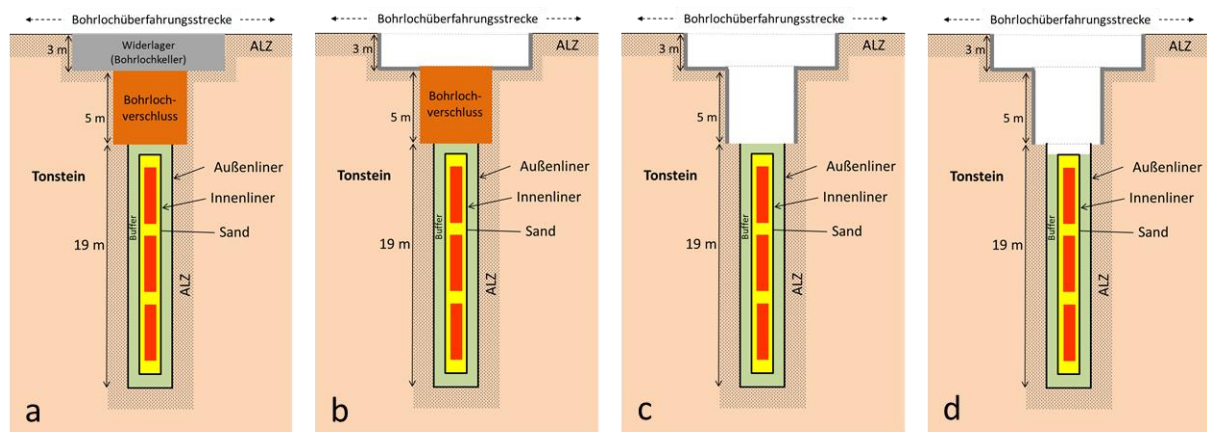


Abbildung 4-4: Schematische Darstellung der Teilschritte zum Rückbau des Bohrlochverschlusses

Die Errichtung des Bohrlochkellers erfolgt mit der Entnahme des Betonwiderlagers. Ähnlich der ursprünglichen Errichtung des Bohrlochkellers vor der Einlagerung kann auch bei der Neuerrichtung eine Kettenschrämmaschine genutzt werden. Dies erlaubt eine profilgenaue Errichtung des Bohrlochkellers. Der Einsatz von Kettenschrämmaschinen entspricht dem Stand der Technik in der Gewinnung von Naturwerksteinen, wurde im Erkundungsbergwerk Gorleben zur Errichtung eines Bohrlochkellers erprobt (DBE TEC, 2010a) und ist auch im französischen Endlagerkonzept zur Errichtung von Schlitten vorgesehen (Bock et al. 2010), siehe Abbildung 4-5. Das Ausbruchsvolumen des Widerlagers kann in mehrere Teilblöcke

zerschnitten werden. Hierzu kann ein Tunnelbagger mit entsprechendem Werkzeug (Hydraulikhammer oder Schneidkopf) genutzt werden. Der Bagger ist auch in der Lage Bruchstücke des Widerlagers aufzunehmen und auf ein bereitstehendes Fördermedium zu laden. Die Grabkurve bekannter Tunnelbagger ist ausreichend groß, um den Bohrlochkeller zu errichten. Alternativ kann das gelöste Haufwerk mit einem Saugbagger aus dem Bohrlochkeller gesaugt werden, siehe Abbildung 4-6. Entsprechende Geräte sind aus dem Straßenbau bekannt. Die Kontur des Bohrlochkellers kann mit Spritzbeton gesichert werden.



Abbildung 4-5: Anwendungsbeispiele Kettenschrämmaschine, links: Natursteingewinnung (Fantini, 2016), mitte: Erkundungsbergwerk Gorleben (DBE TEC, 2010a), rechts: Schlitzsäge im URL Bure (Bock et al. 2010)

Im nächsten Schritt des Rückbaus ist der Bentonitkörper des Dichtelementes und der obere Teil des Buffers zu entfernen (siehe Abbildung 4-4 c und d). Das Dichtelement liegt 3 bis 8 m unterhalb der Streckensohle. Der obere Teil des Buffers bis zum Top des Innenliners ist 0,5 m mächtig. Die beengten Platzverhältnisse erschweren den Einsatz von Gewinnungsgeräten. Der Rückbau des Bentonitbuffers muss mit sehr kleinbauenden Baggern oder fernbedienten Manipulatoren mit Schneidkopf, Hydraulikhammer oder Schaufel erfolgen. Die Geräte können von der Belegschaft aus einer erhöhten Position, wie beispielsweise dem Bohrlochkeller, bedient werden. Die Förderung des Haufwerks kann wiederum über Saugbagger erfolgen. Mobile Saugbagger als Aufbauten auf konventionelle LKWs sind in der Lage über mehrere Dezimeter und bis in ca. 15 m Tiefe loses Material abzusaugen. Die tatsächliche Saugleistung hängt dabei auch von der Art und Korngröße des Materials ab. Aus dem Tiefbau sind kleinbauende Manipulatoren mit integriertem Einlass für eine Saugleitung bekannt, vgl. Abbildung 4-6.



Abbildung 4-6: Biespiele für den Einsatz von Saugbaggern im Tiefbau (Gerotto, 2017)

Die neuentstandene Kontur kann mit einer Zwischensicherung (Spritzbeton) versehen werden. Um die Geräte und Ausrüstung an den Arbeitsort (bis ca. 8,5 m unter Streckensohle) zu transportieren, muss eine temporäre Fördereinrichtung, in Form einer kleinen Schachtförderanlage/Haspel über dem Bohrloch errichtet werden. Der Bohrlochkeller ist dazu mit einer geeigneten Stahlkonstruktion abzudecken. Die Konstruktion wird im weiteren Verlauf auch benötigt um die Bohrlöcher mit dem Plateauwagen und der ELV überfahren zu können.

In den weiteren Arbeitsschritten muss der Innenliner geöffnet und die Verrohrung sowie die Bohrlochschleuse neu errichtet werden (Abbildung 4-8 a bis d). Mit dem Öffnen des Innenliners wird ein direkter Zugang zum Sperrbereich (Innenraum des Liners) geschaffen. Es ist dafür Sorge zu tragen, dass bis zum Einbau der Bohrlochschleuse kein unbefugter Zutritt zum Sperrbereich erfolgt. Vorbeugend zu einer möglichen Kontaminationsverschleppung müssen alle Arbeitsschritte am Innenliner unter einer temporären Einhausung erfolgen. Ziel der Einhausung ist die vorrübergehende Abtrennung des Arbeitsbereiches vom restlichen KB. Dies erlaubt eine bessere Kontrolle aller ein- und ausgehenden Personen, Ausrüstung, Materialien und Medien. Die Einhausung muss nicht den gesamten Streckenquerschnitt belegen, sodass der durchgängige Wetterzug nicht unterbrochen werden muss. Der Streckenquerschnitt bietet ausreichend Raum, um den Bohrlochkeller sowie den zusätzlich benötigten Arbeitsbereich einzuhausen. Der Zugang zum Bohrlochkeller ist über einen Schleusenbereich möglich. Abbildung 4-7 zeigt den Querschnitt, der für eine Einhausung genutzt werden kann. Für die Dauer der Arbeiten

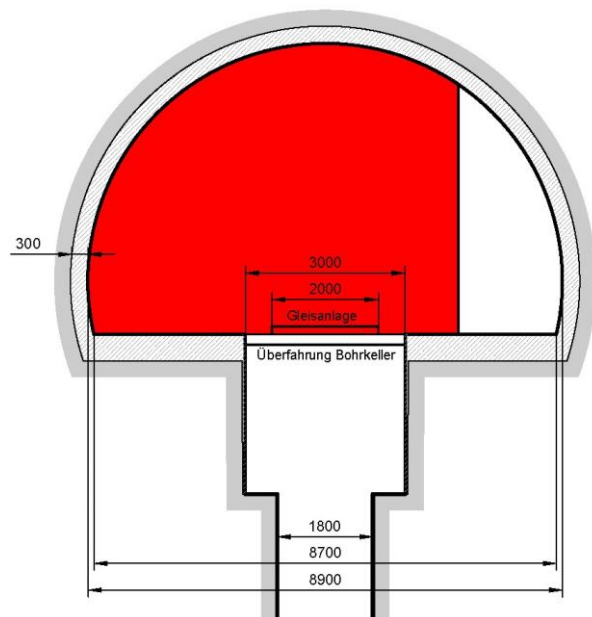


Abbildung 4-7: Querschnitt Bohrlochüberfahrungsstrecken mit neuem Bohrlochkeller und potenziellen Bereich für die Einhausung

an der offenen Verrohrung ist der eingehauste Bereich separat zu bewettern. Die Sonderbewetterung ist bis in den Arbeitsbereich im Bohrloch zu führen. Es muss sichergestellt werden, dass diese Bereiche stetig bewettert werden. Die Einhausung wird an eine kontinuierliche Raumluftüberwachung angeschlossen.

Nach dem Freilegen des Innenliners kann eine Beprobung des Innenraums erfolgen. Der Deckel des Innenliners wird anschließend abgetrennt, siehe Abbildung 4-8 b. Geeignete Maßnahmen stehen aus dem Rückbau von Kernkraftwerken zur Verfügung und entsprechen dem Stand der Technik. Je nach Bewertung des Strahlenschutzes kann dies durch die Belegschaft vor Ort oder aber fernbedient erfolgen. Wie bereits beschrieben bietet die Sohle des Bohrlochkellers eine mögliche Standfläche. Im Anschluss ist die Verrohrung bis zur Sohle des Bohrlochkellers zu verlängern. Die Verrohrung kann mit Hilfe der temporären Fördereinrichtung aufgesetzt werden. Der Innenraum der Verrohrung wird während der eigentlichen Rückholung (aktiven Entnahme der Behälter) dem Sperrbereich (SB) zugeordnet. Die einzelnen Segmente der Verrohrung müssen den Anforderungen des Strahlenschutzes entsprechen und KB und SB sicher voneinander trennen. Für die Errichtungsdauer der Verrohrung ist der Innenraum der Verrohrung nicht vom eingehausten Bereich getrennt. Es ist zu prüfen, ob die Einhausung temporär dem Sperrbereich zuzuordnen ist. Im Sohlbereich des Bohrlochkellers ist eine zusätzliche Abdeckung im Bereich des früheren Dichtelementes zu errichten. Diese stützt die Verrohrung und trägt die Bohrlochschleuse, siehe Abbildung 4-8 c und d. Die Installation der Bohrlochschleuse im selben vertikalen Abstand zur Streckensohle, also im Tiefsten des Bohrlochkellers wie auch bei der Einlagerung, erlaubt die Nutzung der Einlagerungsvorrichtung während des Rückholungsbetriebes.

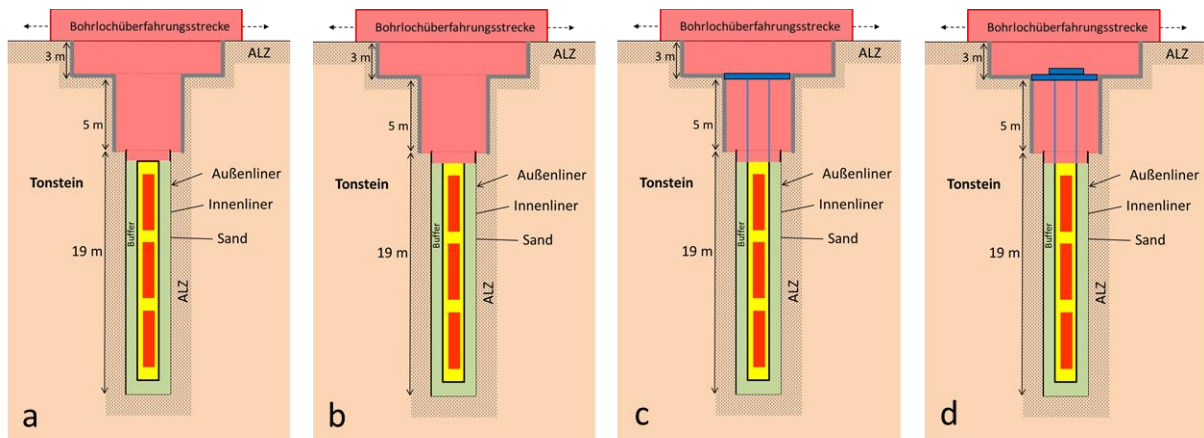


Abbildung 4-8: Schematische Darstellung der Teilschritte zur Neuerrichtung der Innenverrohrung und der Bohrlochschleuse

Mit dem Einbau der Bohrlochschleuse ist der Innenraum der Verrohrung (SB) sicher vom restlichen Grubengebäude getrennt. Die Einhausung über dem Bohrloch kann entfernt werden. Die vorbereitenden Maßnahmen zur Rückholung sind damit abgeschlossen. Abbildung 4-9 zeigt schematisch den Aufbau am Bohrloch.

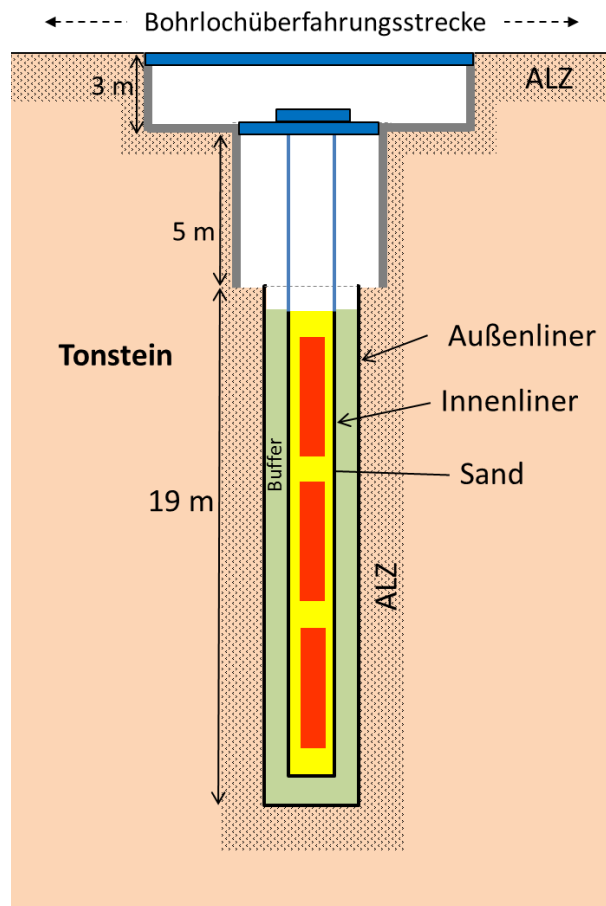


Abbildung 4-9: Schematische Darstellung des Aufbaus des Bohrloches während der Entnahme der Behälter

4.6 Entnahme der Behälter

4.6.1 Ablauf

Der Betriebsablauf am Bohrloch umfasst die Versatzentnahme und die Rückholung, also die Entnahme der Kokillen selbst. Beide Arbeitsschritte finden im Wechsel statt, siehe Abbildung 4-10. Die ELV bleibt währenddessen über dem Bohrloch positioniert. Die Saugkokille und die Transferbehälter werden mit dem Zugverband im Wechsel an- und abtransportiert.

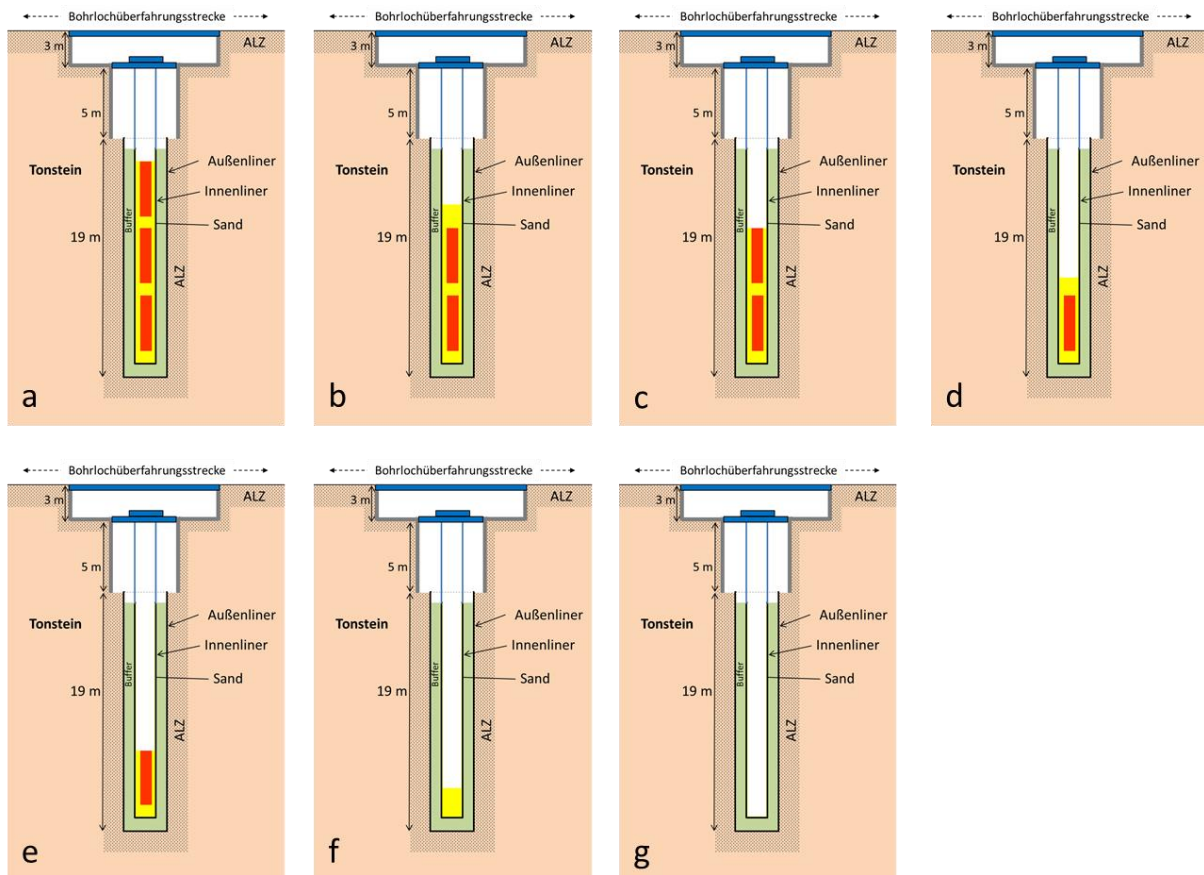


Abbildung 4-10: Schematische Darstellung: Entnahme Versatz und Entnahme BSK

Nach der Positionierung der ELV über dem Bohrloch muss zunächst der Bohrlochversatz bis zur ersten Kokille entfernt werden. Jedes Bohrloch wird mit ca. $2,4 \text{ m}^3$ Versatz verfüllt, was einem Anteil von ca. $0,8 \text{ m}^3$ je Kokille entspricht. Die Entnahme des Bohrlochversatzes im Rahmen der Rückholung erfolgt mit Hilfe einer Saugvorrichtung. Aufbau und Funktionsweise der Saugkokille werden im nachfolgenden Abschnitt erläutert. Der Speicherraum innerhalb der Saugkokille kann die Hälfte des Versatzvolumens (ca. $0,4 \text{ m}^3$) aufnehmen. Pro BSK sind somit zwei Saugvorgänge nötig. Die Saugvorrichtung wird liegend in einem eigenen Transferbehälter zum Einsatzort befördert. Das Einsetzen der Vorrichtung in das Bohrloch entspricht dem Einlagerungsvorgang der Kokillen. Greifer und Saugvorrichtung werden über das Förderseil zum Einsatzort herabgelassen. Während des Saugvorganges ist das Bohrlochinnere stets von der Umgebung abgesichert. Das Bohrloch und der Transferbehälter bilden ein geschlossenes System. Das verfügbare Luftvolumen ist auf das Volumen in die-

sem geschlossenen System begrenzt. Die Saugvorrichtung muss die 1 m mächtige Verfüllung über der oberen Kokille und die ca. 0,6 m mächtige Verfüllung zwischen zwei BSK entfernen und den Kopfbereich der unteren BSK soweit freilegen, dass ein Ziehen der Kokille möglich ist. Die Entnahme des Quarzsandes kann in mehreren Arbeitsschritten erfolgen. Ist die Saugvorrichtung mit Quarzsand gefüllt, wird sie wieder aus dem Bohrloch entfernt. Das Herausziehen aus dem Bohrloch und das Ablegen in einem Transferbehälter entsprechen, wie auch die Behälterentnahme, einer Umkehrung des Einlagerungsvorgangs. Das Entleeren der Saugkokille erfolgt abseits des Rückholungsbetriebs in einem gesonderten Bereich. Dafür können im Infrastrukturbereich unter Tage oder auch über Tage Räume vorgesehen werden. Denkbar ist auch der direkte Versatz des Quarzsandes in bereits geräumte Bohrlöcher. Sofern dazu eine Entlassung aus dem AtG angestrebt wird, müssten diese Bohrlöcher und der Versatz zuvor gemäß § 29 (StrlSchV, 2017) freigemessen werden. Dies erfordert auch eine vollständige Versatzentnahme aus dem Bohrloch, vgl. Abbildung 4-10 g. Die Arbeitsschritte zur Versatzentnahme sind:

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

Im Anschluss an das Entfernen des Versatzes erfolgt der eigentliche Rückholungsvorgang. Die Arbeitsschritte während der Entnahme der Kokille sind:

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

Im Anschluss kann mit der erneuten Versatzentnahme ein weiterer Rückholungszyklus beginnen. Der Zyklus wird sooft wiederholt bis der letzte Behälter aus einem Bohrloch rückgeholt ist. Die evtl. im Bohrloch verbliebende Versatzmenge kann falls erforderlich nach der Entnahme der letzten Kokille ebenfalls abgesaugt und der Versatz damit vollständig aus dem Innenliner entfernt werden.

4.6.2 Technik

4.6.2.1 Einlagerungsvorrichtung

Die Entnahme der Behälter erfolgt mit der Einlagerungstechnik, in Umkehrung des Einlagerungsvorganges. Das Einlagerungskonzept der vertikalen Bohrlochlagerung im Tongestein wurde aus dem Konzept für Salz entwickelt. Die benötigte Technik basiert auf den bereits erprobten Prototypen für die Einlagerung von BSK in einer Salzformation, siehe Abbildung 3-6 (Abschnitt 3). Die technischen Abläufe während der Einlagerung und Rückholung sind in beiden Wirtsgesteinsformationen gleich. Die Tiefe der Einlagerungsbohrlöcher und damit die Anzahl der Behälter je Bohrloch unterscheiden sich aber in beiden Konzepten. Bisher existiert noch kein Prototyp der Einlagerungsvorrichtung (ELV), speziell angepasst an die Randbedingungen der vertikalen Bohrlochlagerungen im Tongestein.

Für den Einsatz im Tongestein sind, gegenüber dem Prototyp der Einlagerungsvorrichtung im Salz folgende konstruktiven Anpassungen notwendig:

- 2. Förderseil, entsprechend KTA (wie auch im Salz erforderlich)
- Begrenzung der Förderhöhe auf 30 m
- vollständige Einhausung der Förderseile
- ggf. Rüttelmotor am Greifkopf
- Gewährleistung der Energieversorgung der Saugkokille

4.6.2.2 Saugkokille

Die Saugvorrichtung muss kompakt gebaut sein, um in dem begrenzten Bohrlochquerschnitt eingesetzt werden zu können. Sie wird an dem seilgeführten Greifer der ELV in das Bohrloch herabgelassen. Der Innenliner hat einen inneren Durchmesser 0,76 m.

Der Kopf der Saugvorrichtung ist mit dem gleichen Anschlag wie die BSK ausgestattet. Die Außenmaße der Saugvorrichtung entsprechen im Wesentlichen der BSK. Abbildung 4-11 zeigt einen Schnitt durch die Saugvorrichtung im Bohrloch. Die Saugvorrichtung besteht aus folgenden Baugruppen:

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

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

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

Auf Grund der sehr beengten Platzverhältnisse und als Ergebnis erster Saugversuche ist eine zweistufige Axialturbine mit zwei Radiallaufrädern und einem feststehenden Leitradssystem zwischen den beiden Laufrädern vorgesehen. Der Lüfter muss zum einen, eine hinrei-

chend hohe Strömungsgeschwindigkeit zur Mitnahme der Partikel erzeugen und zum anderen den Druckverlust innerhalb der Saugkokille überwinden. Der Antrieb ist mit 25 kW Nennleistung vorgesehen. Im Rahmen der ersten Machbarkeitsstudie wurde ein 30 kW Asynchronmotor als Antriebsmotor vorgesehen. Die an den Greifer angehängte Saugvorrichtung muss mit 400 V gespeist werden können, um den Antriebsmotor zu versorgen. Ebenso ist die Möglichkeit vorgesehen, die Ventilatoreinheit ein- und ausschalten zu können und bei Bedarf ein Videosignal von der Saugstelle zum Leitstand zu führen.

Während des Saugvorganges wird das Luftvolumen stetig umgewälzt. Die Luft wird am Einlass eingesaugt, durchläuft die Saugvorrichtung, tritt im oberen Drittel der Konstruktion radial aus und strömt wieder nach unten. Damit wird das beteiligte Volumen stetig verdichtet, was zu einer Temperaturerhöhung führt. Unter der Annahme, dass im Luftstrom ein Mischungsverhältnis μ gleich 0,01 vorliegt, würde der Saugvorgang für 0,4 m³ ca. acht Minuten dauern. Während dieser Zeit wird das Luftvolumen ca. 150-mal umgeschlagen. Unter der Annahme einer stetigen adiabaten Verdichtung wird eine zusätzliche Temperaturerhöhung um 50 K erwartet. Die ungünstigen Umgebungsbedingungen sind bei der Material- und Komponentenauswahl zu berücksichtigen.

Das Förderrohr mit einem freien Innendurchmesser von 100 mm nimmt am unteren Ende den Saugstutzen mit Abdichtbereich auf (siehe Abbildung 4-12). Über einen Konus mit eingelegter Dichtung im Hüllrohr wird die Abdichtung zwischen Förderrohr und Hüllrohr im Saugprozess sichergestellt.

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

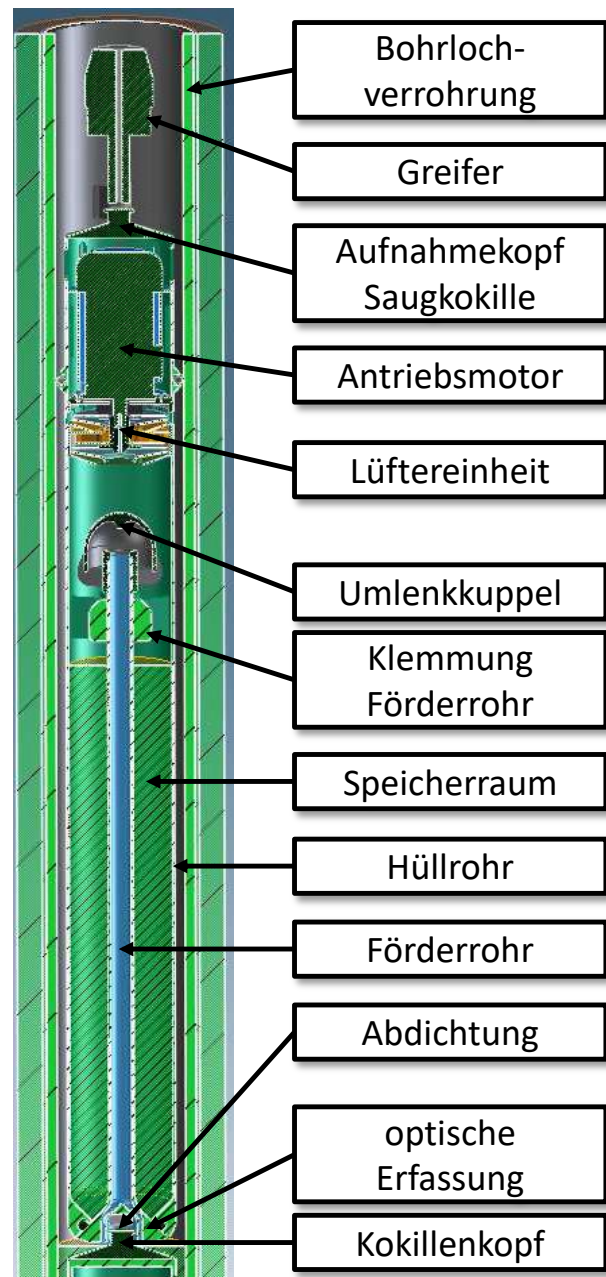


Abbildung 4-11: Schnittbild Saugvorrichtung im Bohrloch

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

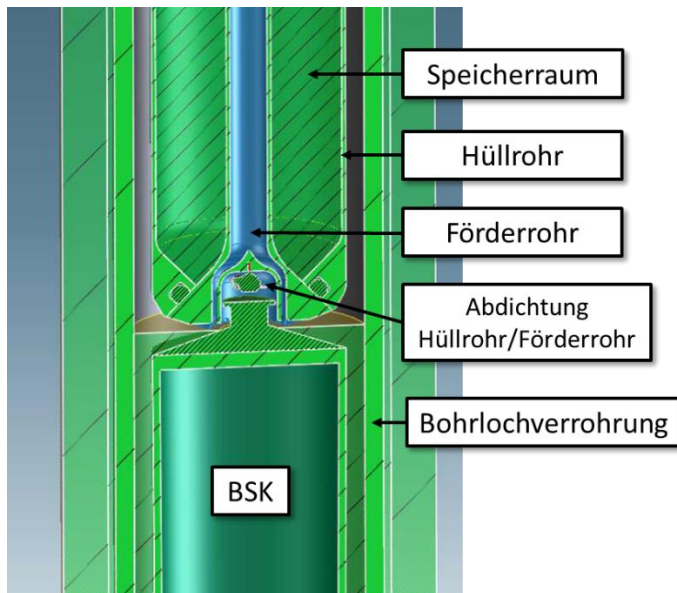


Abbildung 4-12: Schnitt durch Hüllrohr mit Förderrohr (blau) in geschlossener Stellung, zu sehen in der Position über dem Kopf des Endlagerbehälters zum Ende des Saugvorgangs vor der Behälterrückholung

Der direkte Einsatz einer handelsüblichen, digitalen Kamera nahe der Strahlenquelle sollte vermieden werden, da elektromagnetische Strahlung im „Gammaspektrum“ starke Störsignale oder sogar Beschädigungen der Photozellen verursachen kann.

Es empfiehlt sich daher ein optisches Endoskop einzusetzen, welches den für den Menschen sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums an eine Photozelle weiterleitet. Auch die Ausleuchtung des zu inspizierenden Objektes kann mittels eines Endoskops geschehen. Es kann auch eine Kamera, die für hochradioaktive Umgebungen konzipiert ist und beispielsweise in Kernkraftwerken eingesetzt wird, genutzt werden.

Der innere Aufbau der Saugkokille führt zu ca. 1 m Abstand zwischen der BSK und der verbauten Elektronik am Kopfbereich. Eine Beeinflussung der Elektronik durch Alpha- und Betastrahler aus einer geschlossenen radioaktiven Quelle wird ausgeschlossen. Zur vollständigen Abschirmung von Alpha- und Betastrahlern reicht bereits eine Stahlblechdicke von einigen Millimetern bis wenigen Zentimetern aus. Die Belastung durch Gammastrahlen wird als unbedenklich eingeschätzt.

Für eine Handhabung der Saugkokille mit der Einlagerungsvorrichtung sind folgende zusätzlichen Anpassungen nötig:

- Energieversorgung der Saugkokille im Bohrloch
- Konzeption eines Transferbehälters für die Saugkokille

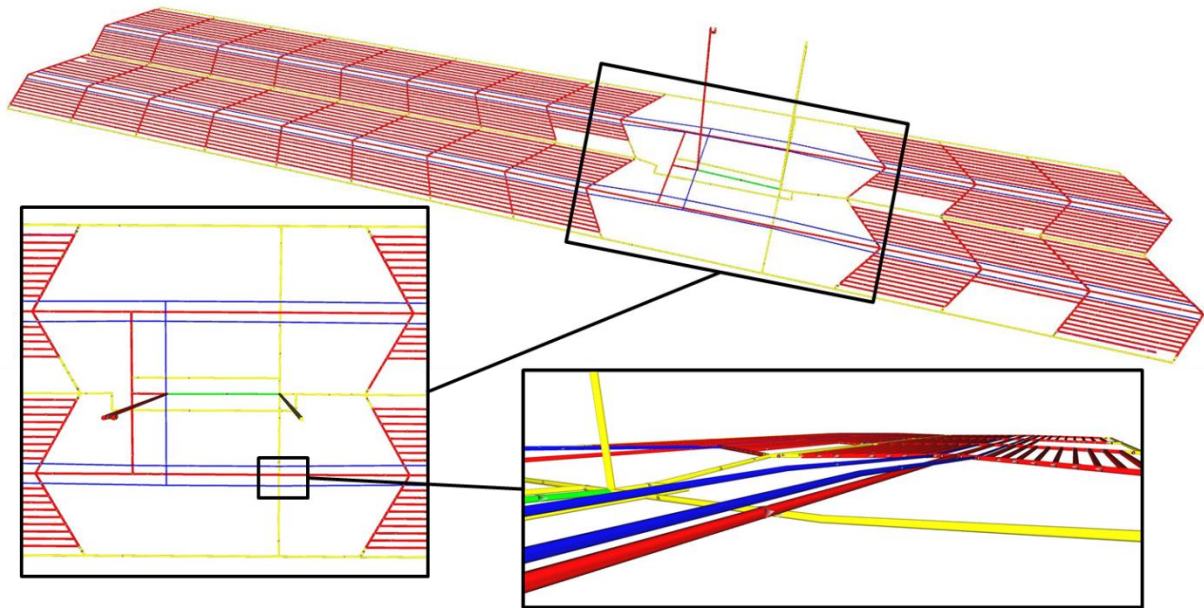


Abbildung 4-14: Grubengebäude gesamt mit Draufsicht Zentralbereich und Detailansicht Überführung der Hauptstrecken

Im Einlagerungsbetrieb sind die Bohrlochüberfahrungsstrecken durch eine temporäre Absperrung in einen dem ÜB zugehörigen Teil, in dem die Herstellung und Herrichtung der Bohrlöcher stattfindet, und in einen dem KB zugehörigen Teil unterteilt, in dem die Einlagerung erfolgt. Nach Abschluss der Einlagerung an einem Bohrloch erfolgt das Umsetzen der temporären Absperrung und anschließend der Bohrlochschleuse sowie der Einlagerungsvorrichtung zum nächsten Bohrloch. Der Streckenteil im ÜB wird blasend sonderbewettert und der Streckenteil im KB saugend. Die saugenden Lutten im KB werden durch die Querschläge bis zur Abwetterstrecke geführt. Um die Offenstandszeiten der Bohrlochüberfahrungsstrecken gering zu halten, werden die Bohrlochüberfahrungsstrecken nach Bedarf aufgefahren. Die Querschläge sind ebenfalls durch eine temporäre Absperrung in ÜB und KB unterteilt. (DBE TEC, 2010b)

Das Bewetterungskonzept im Rückholungsbetrieb entspricht dem zuvor beschriebenen System aus dem Einlagerungsbetrieb. Auch im Rückholungsbetrieb erfolgt eine bedarfsgerechte Auffahrung der Bohrlochüberfahrungsstrecken. Die Bohrlochüberfahrungsstrecken werden stets dem KB zugeordnet. Innerhalb der Bohrlochüberfahrungsstrecken findet keine Unterteilung in unterschiedliche Strahlenschutzbereiche statt. Die schachtfernen Querschläge (Frischwetter) werden ebenfalls vollständig dem KB zugeordnet. In den schachtnahen Querschlägen (Abwetter) erfolgt eine temporäre Absperrung, wodurch diese in ÜB und KB unterteilt werden. Damit können die verschiedenen Betriebspunkte vorbereitend zur Rückholung und der Rückholung selbst bedarfsgerecht bewettert werden.

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 4-15 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 4-16.

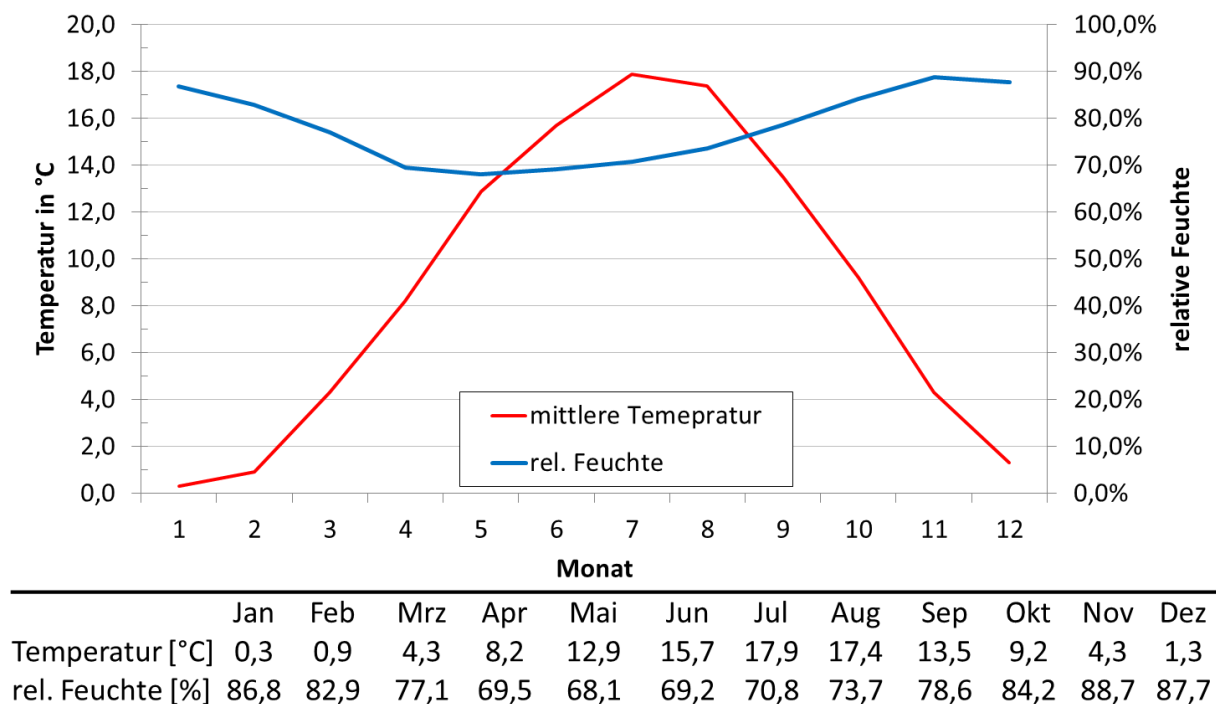


Abbildung 4-15: Temperatur und relative Feuchte im Jahresmittel für Deutschland (DWD, 2015)

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%.

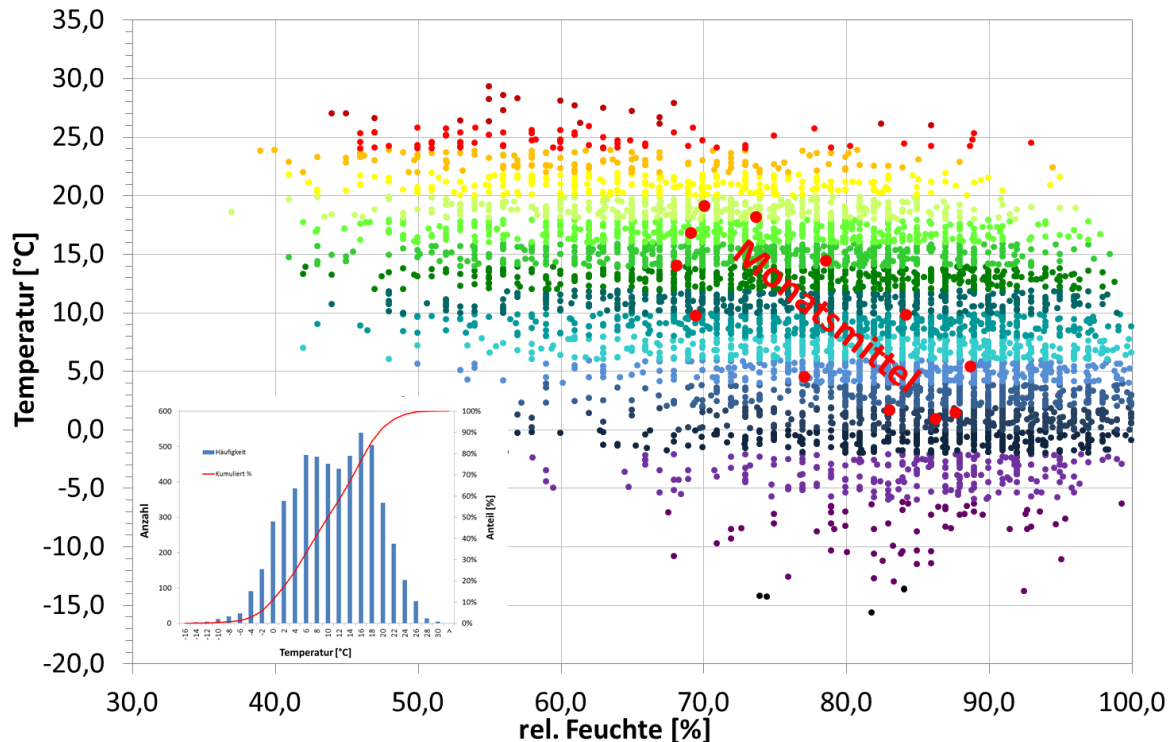


Abbildung 4-16: Mittlere Tagestemperaturen und rel. Feuchte im Betrachtungszeitraum 2000 bis 2014, (DWD, 2015)

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 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

Die Temperaturentwicklung in und um die Einlagerungsbereiche basiert auf den thermo-mechanischen Berechnungen des ANSICHT-Vorhabens (DBE TEC, 2017b). Die Berechnungen unterliegen der Annahme einer Zwischenlagerzeit von 23 Jahren und einer Auslegungstemperatur von 150°C. Die Berechnungen umfassen die Temperaturentwicklung in einem Einlagerungsbohrloch, zwischen zwei Bohrlöchern einer Strecke und zwischen zwei Bohrlöchern in benachbarten Strecken. Eine thermo-mechanische Simulation des gesamten Grubengebäudes erfolgte nicht.

Alle Wärmequellen (Behälter) liegen unterhalb der Einlagerungs- bzw. Rückholungssohle. Der Wärmeeintrag der Behälter führt zunächst zu einer Erwärmung der Komponenten im Bohrloch und anschließend der umliegenden Gebirgsbereiche. Temperaturen nahe der Grenztemperatur sind entsprechend der Endlagerauslegung nur im Bohrlochinneren zu erwarten, siehe Abbildung 4-17. Durch die anisotrope Wärmeleitfähigkeit des Gebirges wird der Wärmefluss in vertikaler Richtung und damit zum Grubengebäude hin zusätzlich gedämpft. Die Erwärmung der Einlagerungs- bzw. Rückholungssohle erfolgt deutlich langsamer als in der direkten Umgebung zu den Behältern und in horizontaler Richtung.

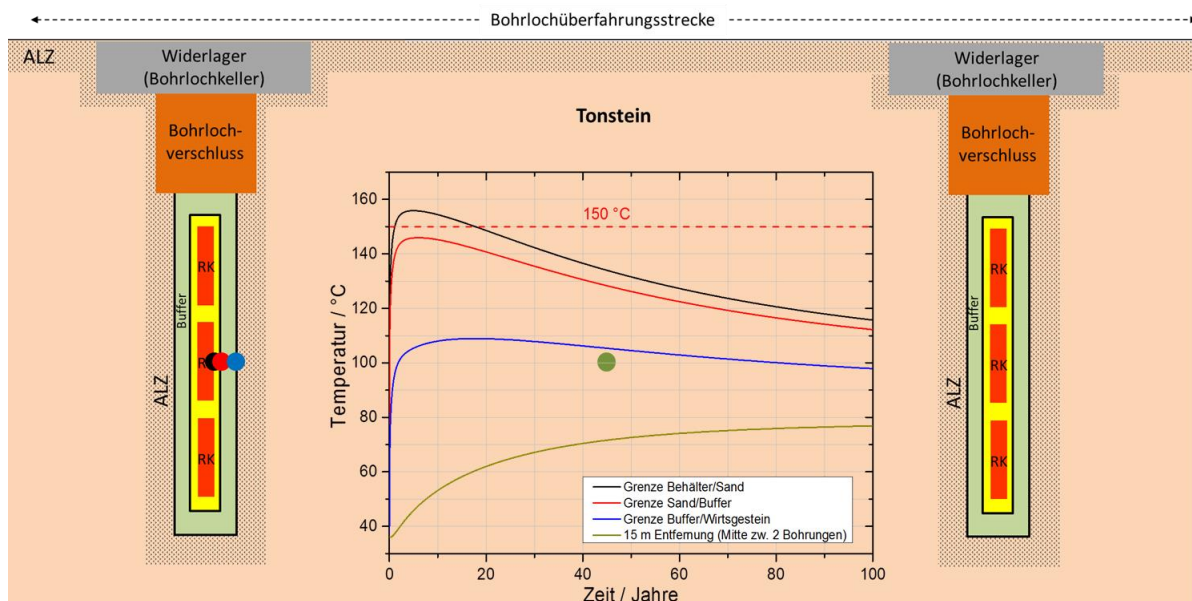


Abbildung 4-17: Temperaturentwicklung in Richtung der Streckenachse in den ersten 100 Jahren nach Einlagerung (DBE TEC, 2017b)

Neben dem Bohrlochaufbau bestimmt auch der zeitliche Abstand zwischen Einlagerung und Neuauffahrung bzw. Rückholung die tatsächliche Temperatur in den Grubenbauen. Für die Bohrlöcher mit der längsten Einlagerungsdauer (ca. 40 a) sind an der Oberseite des Bohrlochwiderlagers bzw. auf der Sohle der Bohrlochüberfahrungsstrecke ca. 57°C zu erwarten, siehe Abbildung 4-18. In den schachtnahen Einlagerungsfeldern, mit der kürzesten Einlagerungsdauer, sind auf der Sohle über den Bohrlöchern nur leicht erhöhte Temperaturen von ca. 40 °C zu erwarten. Die Temperaturen innerhalb der Bohrlöcher steigen zu den Behältern hin stetig an. Am Deckel des Bohrlochinnenliners wird das Temperaturmaximum nach ca. 40

Jahren erreicht und beträgt dort ca. 86°C. Im Inneren des Bohrlochinnenliners steigen die Temperaturen weiter an. Auf Höhe der mittleren BSK sind am Innenliner Temperaturen bis 140°C zu erwarten.

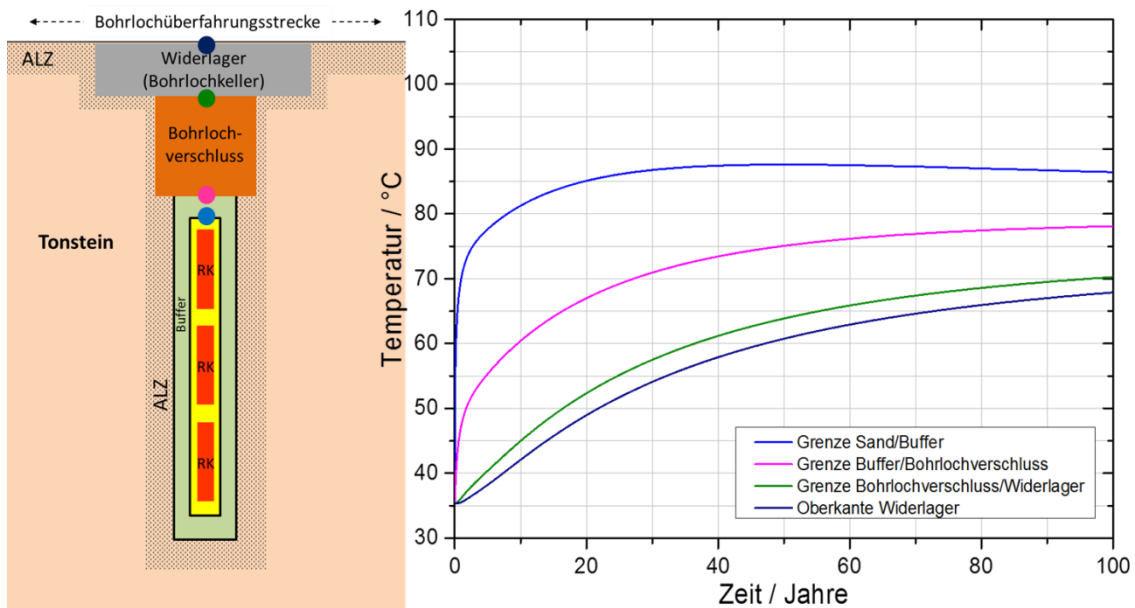


Abbildung 4-18: Temperaturentwicklung im Kopfbereich eines Einlagerungsbohrloches in den ersten 100 Jahren nach Einlagerung (DBE TEC, 2017b)

Die Temperatur in der Bohrlochüberfahrungsstrecke nimmt zur Firste hin weiter ab. Die mittlere Temperatur im Querschnitt über dem Bohrloch ist geringer als die Sohltemperatur. Auch in Richtung der Streckenachse sinkt die Temperatur mit zunehmendem Abstand vom Bohrloch. Das Minimum der Streckentemperatur liegt zwischen zwei Bohrlöchern.

Für die folgende Klimabetrachtung wird angenommen, dass die Temperatur am Bohrlochwiderlager der Temperatur in der gesamten Bohrlochüberfahrungsstrecke entspricht. Die Temperaturverteilung über den Querschnitt und die Länge der Bohrlochüberfahrungsstrecke wird vernachlässigt. Die Annahme führt zu einer Überschätzung der Streckentemperatur. Für alle Bohrlochüberfahrungsstrecken eines Einlagerungsfeldes wird die gleiche Streckentemperatur, entsprechend der Einlagerungsdauer, definiert. Mit Beginn der Rückholung, 40 Jahre nach der ersten Einlagerung, sind in den Einlagerungsfeldern Temperaturen von 43°C bis 57°C zu erwarten, siehe Abbildung 4-19. Für die Hauptstrecken wird ebenfalls eine einheitliche Temperatur angenommen. Die Streckentemperatur in den Frischwetter- und Abwetterstrecken beträgt 43°C. Die Streckentemperatur in den Gebindetransportstrecken beträgt 40°C und in den Querschlägen 45°C. Für das übrige Grubengebäude und den Einlagerungsbereich der HAW Behälter wird eine Erwärmung vernachlässigt. Die Temperatur ist gleich der ursprünglichen Gebirgstemperatur von 36°C.

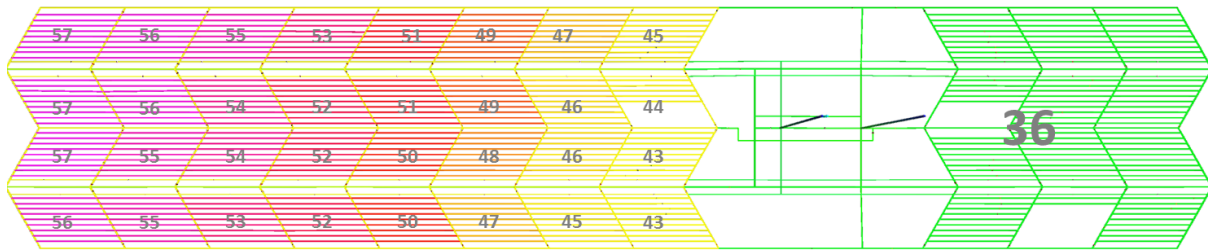


Abbildung 4-19: Angenommene Temperaturverteilung in den Einlagerungsfeldern zu Beginn der Rückholung

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 Abbildung 4-20. 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.

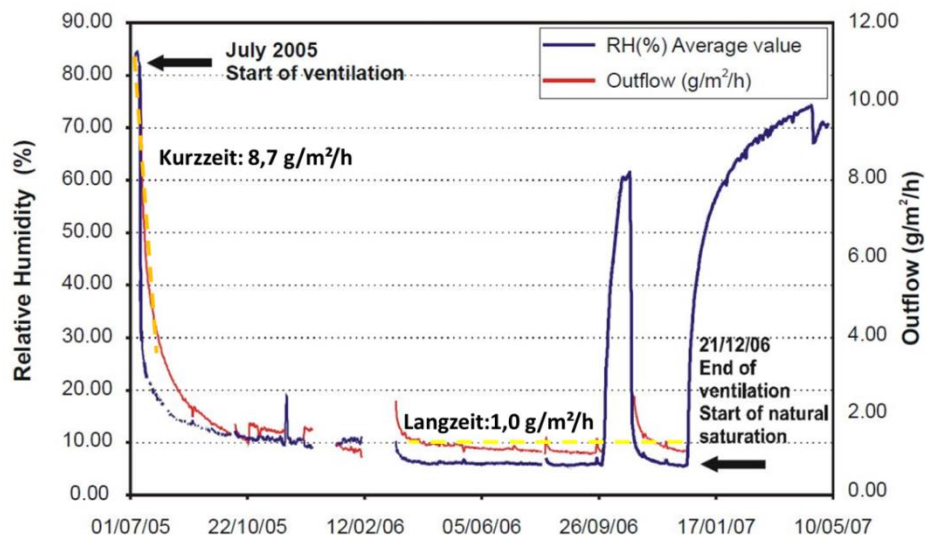


Abbildung 4-20: Zutrittsraten und relative Luftfeuchte während der 2. Phase des "Ventilation Experiments" im Untertagelabor Mont Terri (Mayor & Velasco, 2008)

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 Langzeitrates des Zutritts unterschieden. Die kurzzeitige Zutrittsrate von $8,7 \text{ g/m}^2/\text{h}$ wird in allen Streckenvortrieben angenommen. Zeitlich findet die kurzfristige Zutrittsrate nur im Zeitraum zwischen der Auffahrung und dem Einbringen des Ausbaus Anwendung. Räumlich wird die kurzfristige Zutrittsrate für 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 Feuchteeintrag wird in Form einer Punktquelle ($0,7$ bis $2,1 \text{ g/s}$, je nach Strecke, vgl. Tabelle 4-2) an der Ortsbrust berücksichtigt.

Innerhalb aller ausgebauten Strecken wird die Langzeit Zutrittsrate von $1,0 \text{ g/m}^2/\text{h}$ berücksichtigt. Abbildung 4-21 verdeutlicht die Einteilung innerhalb einer Vortriebsstrecke.

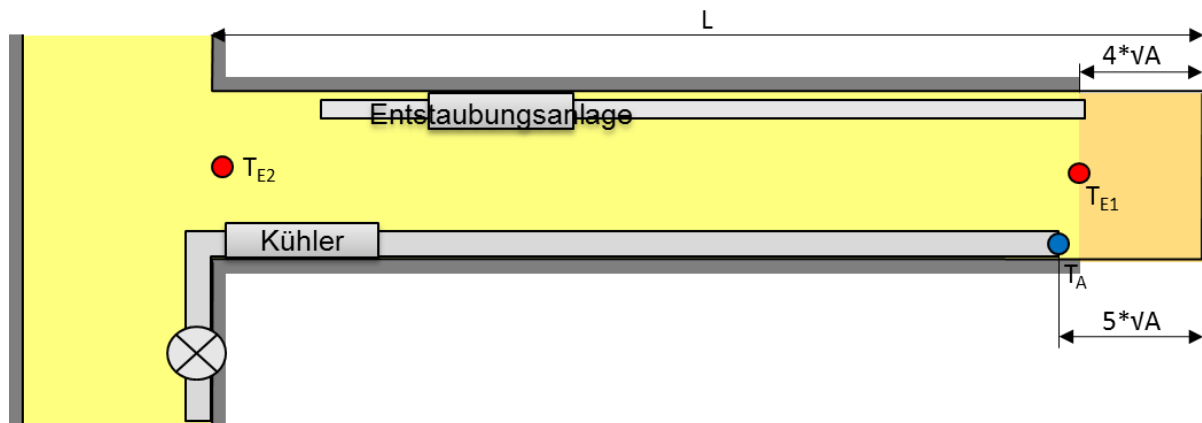


Abbildung 4-21: Zuordnung der Zutrittsraten im Vortrieb und im übrigen Grubengebäude, Orange= Kurzzeitrates, Gelb=Langzeitrates

Für die Gebindetransportstrecken ist je Streckenmeter ein konstanter Zufluss von $25,8 \text{ g/h}$ oder $7,2 \cdot 10^{-3} \text{ ml/s}$ zu erwarten. Für die Frisch- und Abwetterstrecken sind auf Grund der kleineren Querschnitte geringere Zutrittsmengen zu erwarten. Tabelle 4-2 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 4-2: Übersicht Zutrittsmengen in den Hauptstrecken

		Gebindetransport- strecke	Frischwetter- strecke	Abwetter- strecke
Querschnitt	m ²	40	30	15
Umfang	m	25,8	20,6	14,6
		Kurzzeit		
Zutrittsrate	g/m ² /h	8,7	8,7	8,7
Länge 5*√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	11.000	16.500	22.000
	g/s	78,8	94,4	89,2

4.7.2.4 Wettertechnische Eigenschaften der Grubenbaue

Das Endlagerkonzept für die vertikale Bohrlochlagerung im Tongestein (DBE TEC, 2015) benennt die erforderlichen freien Querschnitte der Grubenbaue, siehe Tabelle 4-3. Die Ausgestaltung der Querschnitte wurde bisher nicht festgelegt. Für die Wetternetzmodelle werden vorläufige Streckenquerschnitte definiert, siehe Abbildung 4-22. Die Querschnitte entsprechen den bekannten Vorgaben und Anforderungen. Die Gebindetransportstrecke muss eine Gleisanlage und einen Fahrweg für gleislose Fahrzeuge berücksichtigen. Die Querschläge und Bohrlochüberfahrungsstrecken 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.

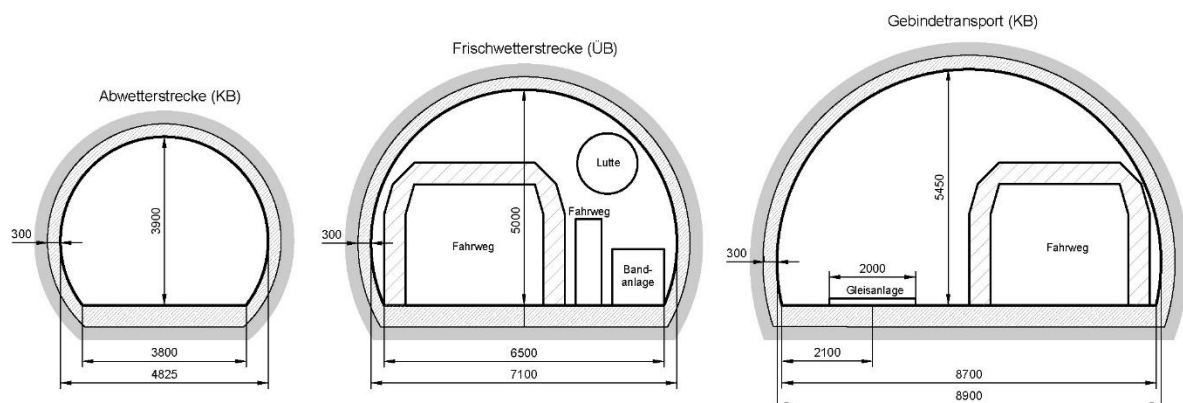


Abbildung 4-22: Skizze vorläufige Querschnitte der Hauptstrecken

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 4-3: 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
Bohrlochüberfahungstrecke	40,0	24,8	6,5
Abwetterstrecke	15,8	14,6	4,3
Frischwetterstrecke	29,8	20,6	5,8

Die in Abschnitt 4.5 beschriebene, temporäre Einhausung des Bohrloches führt in der Bohrlochüberfahungstrecke zu einer Querschnittsverengung. Die durchgängige Bewetterung der Bohrlochüberfahungstrecke soll nicht unterbrochen werden. Für die Wetternetzberechnung wird angenommen, dass 33 m² des Querschnitts durch die Einhausung belegt sind. Es verbleiben 7 m² für den durchschlägigen Wetterzug. Dies erlaubt einen Volumenstrom von 40 m³/s ($v_{\max} = 6$ m/s). Die Querschnittsverengung führt zu einem zusätzlichen Einzelwiderstand von ξ_E gleich 0,5 kg/m⁷.

4.7.2.5 Klimagrenzwerte

Der sichere Betrieb des Endlagers muss stets den Schutzziele 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 4-23. Die KlimaBergV gibt folgende Grenzwerte vor:

- Reduzierung der Beschäftigungszeit auf 6 h, wenn die Trockentemperatur täglich mehr als 3 h über 28°C liegt bzw. die Effektivtemperaturen zwischen 25 und 29°C liegen
- Reduzierung der Beschäftigungszeit auf 5 h, wenn die 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-, Vorrichtung-, 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.

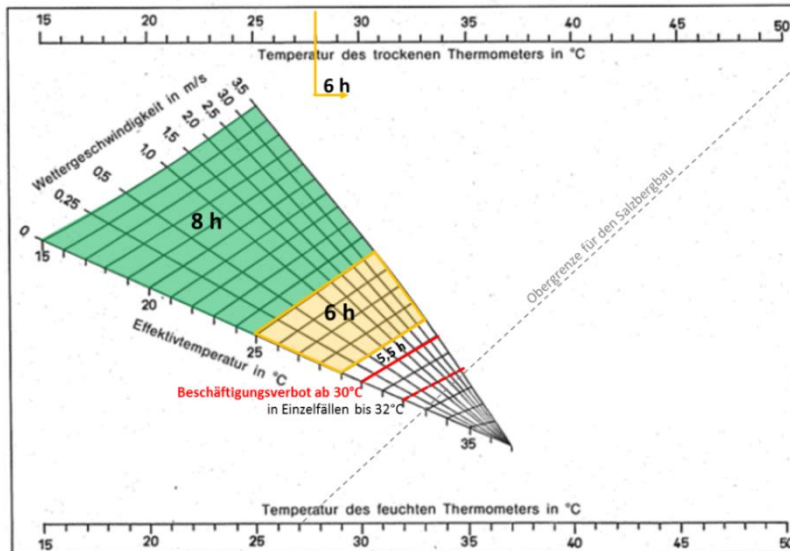


Abbildung 4-23: Grenzen der Beschäftigung in Abhängigkeit von der Normal-Effektivtemperatur

4.7.3 Modelle

Die Wetternetz- und Klimavorausberechnung erfolgt mit der Software VentSim Visual™ 3. Das Programm erlaubt die dreidimensionale Darstellung der Wetterwege (Grubenbaue) und die Simulation der thermo-dynamischen Zustände. Die verschiedenen Entwicklungsphasen des Rückholungsbergwerkes werden durch einzelne Modelle abgedeckt, siehe Abbildung 4-24 und umfassen den Auffahrungsfortschritt und die Rückholungstätigkeiten in verschiedenen Einlagerungsfeldern. Die Teilmodelle repräsentieren folgende Zustände:

- Modell 1: Auffahrung der Hauptstrecken
- Modell 2: Rückholung im Feld BE 1.1 und BE 1.2
- Modell 3: Rückholung im Feld BE 3.1 und BE 4.1
- Modell 4: Rückholung im Feld BE 1.6, BE 2.5, BE 3.4 und BE 4.3
- Modell 5: Rückholung im Feld BE 2.1, BE 4.1, HAW 1.1 und HAW 4.1

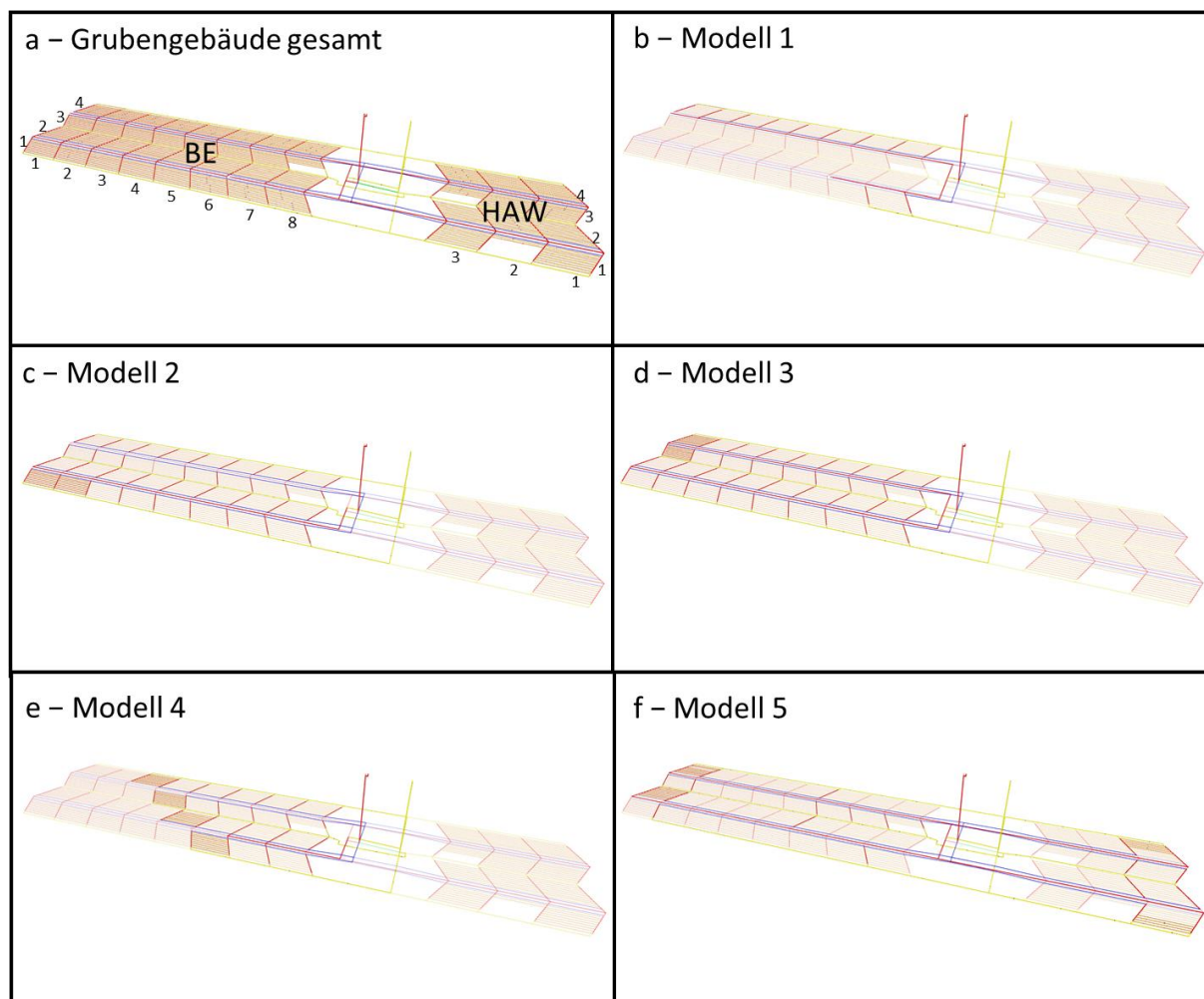


Abbildung 4-24: Übersicht Modelle

Die Benennung der Einlagerungsfelder richtet sich nach der Position im Grubengebäude. Beide Flügel des Endlagers werden nach den dort primär eingelagerten Abfällen unterschieden. Der Einlagerungsbereich der ausgedienten Brennelemente (links) wird mit BE bezeichnet. Der gegenüberliegende Bereich (rechts) mit wärmeentwickelnden Abfällen aus der Wiederaufarbeitung wird mit HAW bezeichnet. Jeder Flügel besitzt vier Reihen von hintereinander liegenden Einlagerungsfeldern. Die Einlagerungsfelder werden spalten- und zeilenweise beginnend am schachtfernsten Feld durchnummeriert. Das erste Einlagerungsfeld BE 1.1 liegt somit in der schachtfernen Randlage des linken Einlagerungsflügels. Dem gegenüber, vier Einlagerungsfelder weiter am oberen Ende des rechten Einlagerungsflügels liegt das Feld HAW 4.1, vgl. auch Abbildung 4-24 a.

Die Teilmodelle bilden unterschiedliche Zustände des Rückholungsbetriebes ab. Das Modell 1 dient zur Abbildung der vorauseilenden Auffahrung der Hauptstrecken. Die Modelle 2 und 3 repräsentieren die Rückholung in den schachtfernen Feldern und decken einen Zeitpunkt zu Beginn der Rückholung ab. Das Modell 4 repräsentiert eine fortschreitende Rückholung mit vier aktiven Feldern, in der Mitte des Einlagerungsbereiches BE. Im Modell 5 ist sowohl der Bereich BE also auch der Bereich HAW erschlossen. Das Grubengebäude hat seine größte Ausdehnung.

4.7.3.1 Neuauffahrung der Hauptstrecken

Die Neuauffahrung der Transport-, Frisch- und Abwetterstrecken erfolgt vorausseilend zur eigentlichen Rückholung. Jede der neun Hauptstrecken im Einlagerungsbereich BE erstreckt sich über eine Länge von ca. 4,5 km. Die Hauptstrecken werden in regelmäßigen Abständen durch die Querschläge verbunden. Dies erlaubt die Etablierung eines durchschlägigen Wetterstroms. Die Vortriebsstrecken selbst müssen sonderbewettert werden. Aus dem Layout des Grubengebäudes ergibt sich eine maximal notwendige Länge der Sonderbewetterung von ca. 800 m (Länge eines Querschlags plus Länge eines Einlagerungsfeldes).

Die Wiederaufsättigung des versetzten bzw. verschlossenen Grubengebäudes mit Porenwässern erfolgt nach (DBE TEC, 2017c) über einen Zeitraum von bis zu 1000 Jahren. In den Bohrlochüberfahungstrecken (Einlagerungsstrecken) wird dieser Prozess ebenfalls mehrere Jahrzehnte bis Jahrhunderte dauern. Während des Rückholungsbetriebes sind somit von teilgesättigten Verhältnisse zu erwarten. Für die Klimavorberechnung wird trotzdem angenommen, dass die Grubenbaue des früheren Einlagerungsbergwerkes bereits wieder vollständig gesättigt sind. Mit dieser Annahme werden ein hoher Feuchteeintrag und damit tendenziell ungünstigere Umgebungsbedingungen für das Grubengebäude angenommen. Damit entspricht der zu erwartende Feuchtegehalt dem des ungestörten Gebirges. Allen Streckenbereichen (Vortrieb) in bis zu $5 \cdot \sqrt{A}$ Entfernung zur Ortsbrust wird die kurzzeitige Zutrittsrate als Punktquelle (in ml/s) zugeordnet. In den restlichen Grubenbauen wird die langfristige Zutrittsrate berücksichtigt.

Das Modell 1 (Auffahrung Hauptstrecken) enthält je zwei Vortriebe zur Simulation der Auffahrung einer Gebindettransportstrecke und eines Querschlags im schachtnahen und schachtfernen Teil des Einlagerungsbereiches BE. Der sonderbewetterte Bereich aller Vortriebe beginnt am schachtnähesten Querschlag, mit einer Länge von ca. 800 m. Abbildung 4-25 gibt eine Übersicht zum Modell 1.

Alle Vortriebsstrecken werden blasend sonderbewettert. Die geforderte Wettermenge wird über Lutten (D = 1,2 m) an die Ortsbrust geführt. Für die Erzeugung der Druckdifferenz wurden Lüfterkennlinien, entsprechend dem Stand der Technik berücksichtigt.

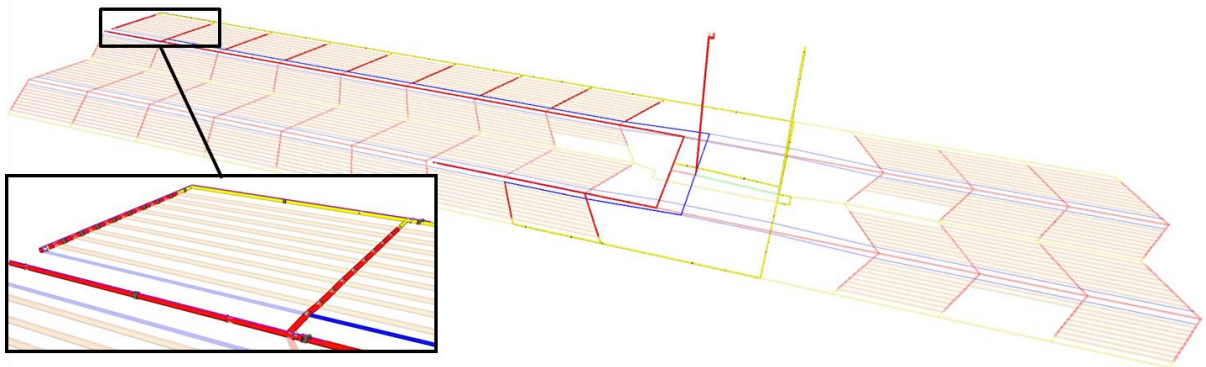


Abbildung 4-25: Übersicht Modell 1 und Detailansicht der simulierten Vortriebe um BE 4.1

Der Wetterbedarf wird im Wesentlichen von der Vortriebstechnik bestimmt. Für jeden Streckenvortrieb ist eine TSM bzw. ein Tunnelbagger, ein Fahrlader und eine Entstaubungsanlage berücksichtigt, für die ein Volumenstrom von 23 m³/s (ca. 1.400 m³/min) bereitzustellen ist. Der Gesamtvolumenstrom für die Vortriebe beträgt 92 m³/s. Zusätzlich werden für Nebenarbeiten, wie die Errichtung der Bandanlage, Fahrbahnbau und Fahrungen 13 m³/s berücksichtigt. Der Wetterbedarf für die Dauer der Errichtung der Hauptstrecken beträgt ca. 105 m³/s.

Neben dem Wärmeeintrag aus dem Gebirge, den wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen, bilden die Maschinen eine dritte wesentliche Wärmequelle. Für das Gewinnungsgerät wird eine thermisch relevante Leistung von 300 kW berücksichtigt. Der Fahrlader soll elektrisch betrieben werden und erzeugt 50 kW Wärme. Die Entstaubungsanlagen werden mit je 30 kW berücksichtigt. Für die Bandanlagen wird ein Wärmeeintrag von 0,35 kW je Meter berücksichtigt. Der Wärmeeintrag der Lüfter wird in Abhängigkeit des Arbeitspunktes bestimmt. Dem Grubengebäude werden insgesamt 6,30 MW aus den verschiedenen Wärmequellen zugeführt, siehe Abbildung 4-26.

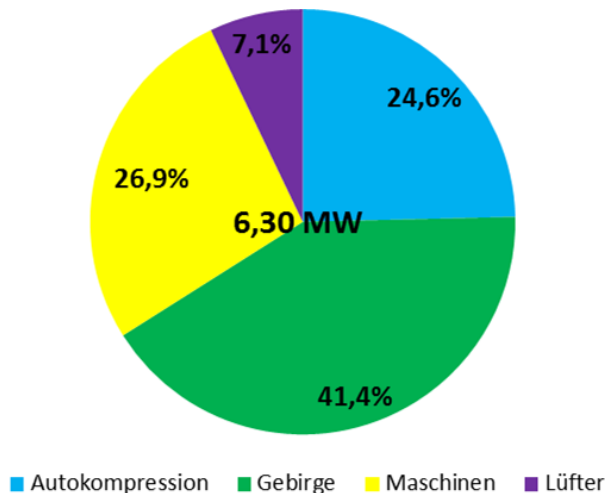


Abbildung 4-26: Anteile am Wärmeeintrag (6,3 MW) im Modell 1 – Auffahrung der Hauptstrecken

Der Frischwetterstrom erwärmt sich vom Füllort des einziehenden Schachtes bis zu den schachtnahen Vortrieben moderat. An den Einlassöffnungen der Sonderbewetterungen ist eine Effektivtemperatur von ca. 16°C zu erwarten. Von der Ortsbrust weg erwärmen sich die Wetter schnell. Ursachen sind die erhöhte Gebirgstemperatur und der Wärmeeintrag der Maschinen. Die Effektivtemperatur steigt im Vortrieb der Gebindetransportstrecke bis auf ca. 26°C bei Trockentemperaturen bis über 40°C (Abbildung 4-27 A). Im Vortrieb des Querschlags (Abbildung 4-27 B1), steigt die Effektivtemperatur bis auf 29°C und liegt damit über der Grenztemperatur von 28°C. Der höhere Temperaturanstieg bei ähnlicher Länge und gleichem Maschineneinsatz resultiert aus der erhöhten Gebirgstemperatur innerhalb der sonderbewetterten Strecke. Bis zum Ende der Sonderbewetterung wird die Grenztemperatur gerade noch eingehalten.

Zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen sollte eine zusätzliche Kühlung erfolgen. Die Zuführung von 200 kW Kühlleistung in den Wetterstrom der Sonderbewetterung reduziert die Effektivtemperatur auch bei ungünstigen Umgebungsbedingungen auf unter 28°C. Die

Trockentemperaturen liegen unter 40°C, siehe auch Abbildung 4-27 B2. Nach KlimaBergV (KlimaBergV, 1983) wäre damit einen Schichtarbeitszeit von 6 h in den Vortrieben möglich.

Für die vergleichsweise schnell voranschreitenden Hauptstreckenvortriebe ist bei einem moderaten Kühlbedarf der Einsatz dezentraler Kältemaschinen sinnvoll. Mit Hilfe kompakter Wetterkühlmaschinen kann ein lokaler Wetterstrom gekühlt werden. Dem vorbeiströmenden Wetterstrom wird an der Oberfläche des Wärmetauschers über das Kältemittel Wärme entzogen. Die Einheiten können in Sonderbewetterungsanlagen eingebaut werden. Die dem Frischwetterstrom lokal entzogene Wärme sowie die benötigte Energie für den Betrieb der Wetterkühlmaschine muss dem Abwetterstrom nahe dem zu kühlenden Arbeitsbereich wieder zugeführt werden. Die lokale Kühlung führt zu einer Erhöhung des Wärmeinhaltes im Gesamtwetterstrom. Für die Kühlung sonderbewetterter Strecken sind aus dem konventionellen Bergbau mehrteilige Maschinen, sogenannte Kühlraupen, bekannt. Diese bestehen aus zwei bis drei Teilsystemen, bei denen Verdampfer- und Maschinenaggregat getrennt werden. Eigene Ventilatoren erzeugen einen Teilwetterstrom um das Kühlaggregat. Über Leitungen können Verdampfer und Kondensator räumlich voneinander getrennt werden und damit die entzogene Wärme an einem geeigneten Ort an die Wetter wieder abgegeben werden. Für die Vortriebe der Hauptstrecken werden Distanzen von bis zu 400 m zwischen Kühlpunkt und Abgabepunkt (Abwetterstrecke) erwartet. Die Abstandsvergrößerung zwischen Verdampfer und Kondensator führt stets zu Leistungsverlusten. Entsprechend dem Stand der Technik sind Kälteleistungen bis ca. 500 kW bei einer Motorleistung bis 130 kW möglich.

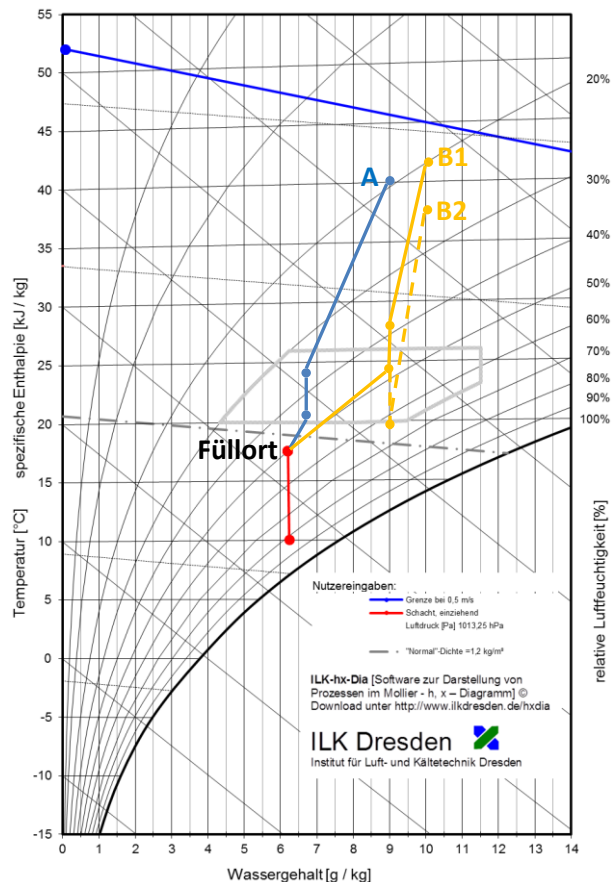


Abbildung 4-27: Zustandsänderungen in den Sonderbewetterungen, bezogen auf Normaldruck

4.7.3.2 Rückholungsbetrieb

Während des Rückholungsbetriebes in den verschiedenen Einlagerungsfeldern sind alle Hauptstrecken und Querschläge bereits errichtet. Alle Strecken werden bewettert. Querschläge die noch nicht genutzt werden, sind bis auf eine Durchlassöffnung verschlossen. Der Durchlass erlaubt eine minimale Bewetterung. Für jeden Querschlag wird eine Wetterbewegung von mindestens 0,1 m/s festgelegt (ca. 4 m³/s). Der Mindestwetterbedarf für alle 36 Querschläge des Einlagerungsbereiches BE beträgt damit 144 m³/s. Für die 16 Querschläge des Einlagerungsbereiches HAW werden wenigstens 64 m³/s benötigt.

Für den Rückholungsbetrieb werden jedem Einlagerungsfeld unterschiedliche Betriebspunkte zugeordnet. Neuauffahrung und Freilegung der Bohrlöcher findet in einem Einlagerungsfeld nicht gleichzeitig statt. Zusätzlich wird im Grubengebäude je ein Betriebspunkt für Versatzarbeiten und Gleisbau berücksichtigt. In den Modellen wird jeder Betriebspunkt als Wärmequelle dargestellt, siehe Abbildung 4-28. Tabelle 4-4 fasst die Verbraucher und den Wetterbedarf der einzelnen Betriebspunkte zusammen.

Tabelle 4-4: Wetterbedarf der Betriebspunkte

Betriebspunkt	Verbraucher	Antrieb	Wärmemenge [kW]	Wetterbedarf [m ³ /s]
Neuauffahrung	Tunnelbagger	Diesel	300	23
	Entstaubung	Elektrisch	30	
	Fahrlader	Elektrisch	50	
Instandhaltung Ausbau	Ankerbohrwagen	Diesel/Elektrisch	50	5
	Spritzgerät	Diesel/Elektrisch	50	
Erkundung	Fahrzeug	Diesel	30	3
Errichtung Bohrloch	Tunnelbagger	Diesel	300	23
	Entstaubung	Elektrisch	30	
	Fahrlader	Elektrisch	50	
Rückholung	ELV	Elektrisch	50	7
	Lok	Elektrisch	50	
Versatz	Versatzfahrzeug	Diesel	350	13
	Entstaubung	Elektrisch	30	
Gleisbau	Transportfahrzeug	Diesel	50	6

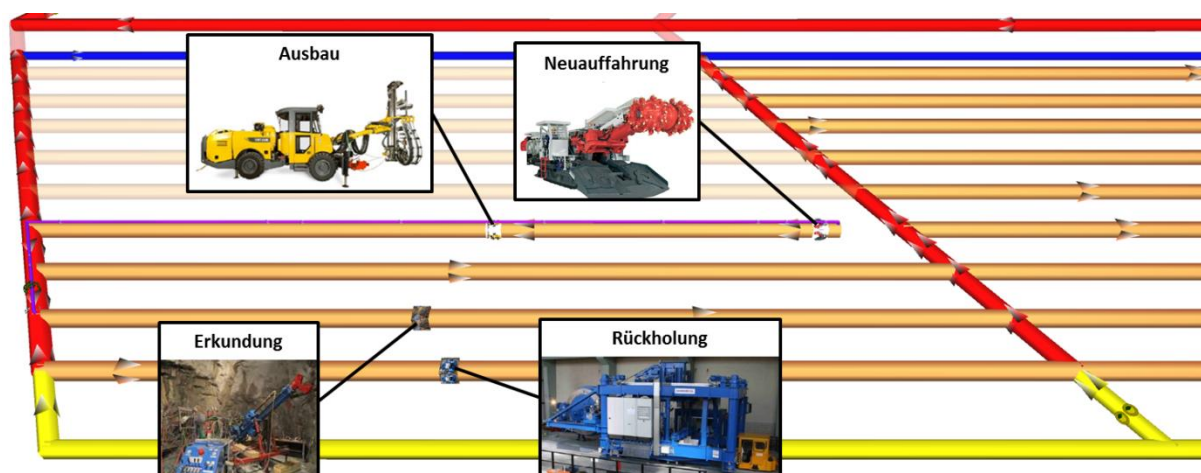


Abbildung 4-28: Darstellung der Betriebspunkte am Beispiel Modell 2, BE 1.1

Für jedes aktive Einlagerungsfeld sind ca. 38 m³/s Frischwetter bereitzustellen. Hinzukommen ca. 20 m³/s für zusätzliche Arbeiten im Grubengebäude. Für den Infrastrukturbereich wird zusätzlich ein Wetterbedarf von 83 m³/s berücksichtigt. Tabelle 4-5 fasst die benötigten Wettermengen der Teilmodelle zusammen. Der größte Wetterbedarf entsteht im Modell 5. In diesem Modell sind die Hauptstrecken beider Einlagerungsbereiche errichtet und eine Rückholung soll gleichzeitig in vier Einlagerungsfeldern stattfinden. Der größte Gesamtwetterstrom beträgt 483 m³/s oder ca. 29.000 m³/min.

Tabelle 4-5: Gesamtwettermengen in den Teilmodellen

Wettermenge [m ³ /s]	Modell 2	Modell 3	Modell 4	Modell 5
Infrastrukturbereich	83			
Querschläge	144			208
Einlagerungsfelder	76	76	152	152
Sonstiges	20	20	20	40
Gesamt	323	323	399	483

Der Wetterstrom wird in allen Modellen saugend durch den Hauptgrubenlüfter am Behältertransportschacht erzeugt. Die Gesamtleistung der Hauptgrubenlüfter wird auf Basis einer einheitlichen Kennlinie nach den Erfordernissen der Teilmodelle angepasst. Für die Modelle 2, 3 und 4 wird eine geeignete Kennlinie durch Anpassung der Lüfterdrehzahl erzeugt. Für die Modelle 4 und 5 mit sehr hohem Wetterbedarf wird die Parallelschaltung zweier Lüfter berücksichtigt, siehe Abbildung 4-29.

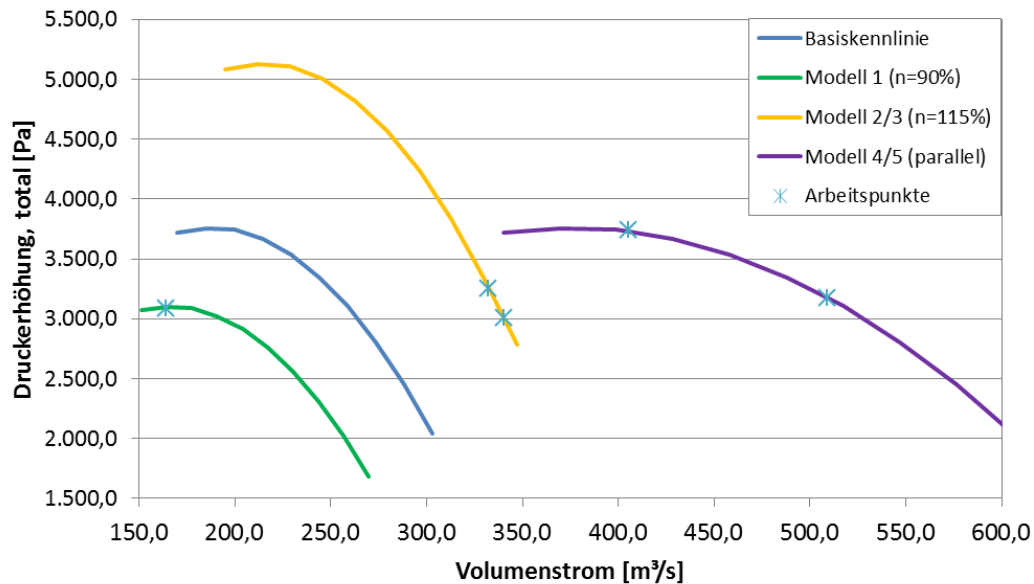


Abbildung 4-29: Kennlinien der Hauptgrubenlüfter in den Teilmodellen

Mit den gewählten Kennlinien ist eine ausreichende Bewetterung aller Teilmodelle möglich. Der Vergleich der Modelle 2/3 und 4/5 verdeutlicht, dass die Wahl eines geeigneten Hauptgrubenlüfters stark vom Gesamtwetterbedarf und damit den Aktivitäten im Grubengebäude abhängt. Dies spiegelt sich auch im Wärmeeintrag ins Grubengebäude wieder, siehe Abbildung 4-30. Der Gesamtwärmeeintrag ist abhängig von der Größe des Grubengebäudes und der Anzahl der aktiven Einlagerungs- bzw. Rückholungsfelder. In den Modellen 2 und 3 mit zwei aktiven Feldern ist eine Gesamtwärmemenge von 9 bis 10 MW zu erwarten. Dies gilt auch für die Rückholung in den wärmsten Feldern. In den Modellen mit vier aktiven Feldern steigt der Wärmeeintrag deutlich an. Der Einfluss der Gesamtausdehnung des Grubengebäudes ist ebenfalls zu erkennen. Der Wärmeeintrag steigt im Modell 5 bis auf ca. 15 MW. Das Modell 5 berücksichtigt Arbeiten in vier Einlagerungsfeldern verteilt auf beide Einlagerungsbereiche.

In allen Modellen bildet der Wärmeeintrag aus dem Gebirge die größte Wärmequelle. Der Wärmeeintrag aus dem Gebirge setzt sich aus der natürlichen Gebirgstemperatur und dem zusätzlichen Wärmeeintrag aus den Behältern zusammen. Der künstliche Wärmeeintrag aus den Maschinen und Lüftern im Grubengebäude steht im direkten Zusammenhang mit der Rückholungstätigkeit. Die Hauptgrubenlüfter sind darin nicht enthalten, da diese saugend Arbeiten und damit keine Wärme ins Grubengebäude eintragen. Im Mittel führen die Arbeiten in einem Feld ca. 0,75 MW Energie zu. Je nach Anzahl der aktiven Felder und Größe des Grubengebäudes liegt der Anteil dieses technischen Wärmeeintrags zwischen 14 % und 30 %. Dritte wesentliche Wärmequelle ist die Autokompression der Wetter. Die Temperaturerhöhung der einziehenden Wetter bleibt stets konstant. Über den variierenden Volumenstrom werden dem System aber unterschiedliche Wärmemengen zugeführt.

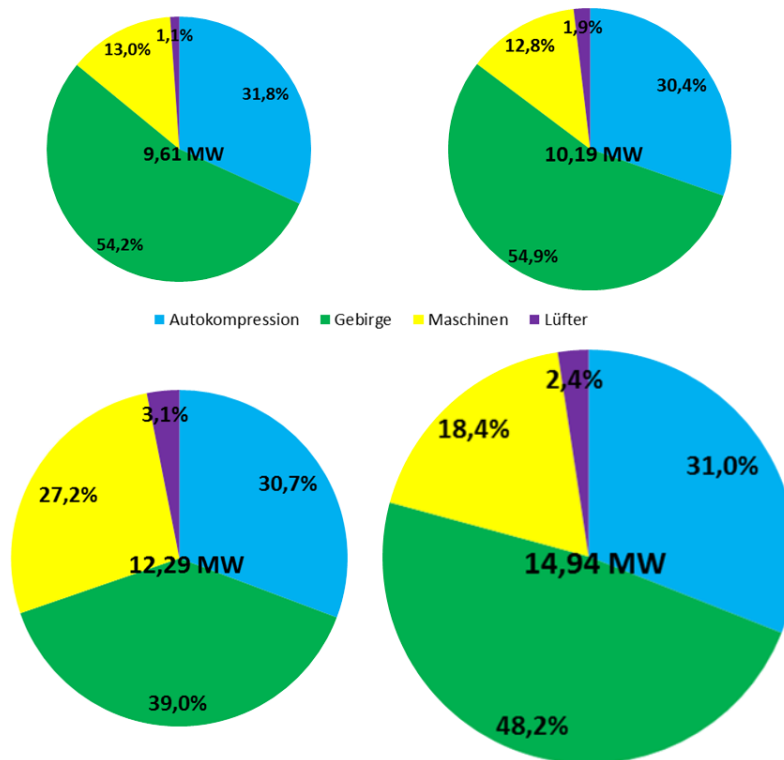


Abbildung 4-30: Energieeintrag getrennt nach Quellen für Modell 2 (links oben), Modell 3 (rechts oben), Modell 4 (links unten) und Modell 5 (rechts unten)

In allen Teilmodellen wird eine Minimierung der offenen Grubenbaue angestrebt. Bohrlochüberfahrungsstrecken werden bedarfsgerecht und parallel zur Rückholung errichtet. Zusätzlich wird angenommen, dass diese in gleicher Weise nach der Rückholung wieder versetzt werden und nicht zu bewettern sind. Für das Bewetterungssystem ist dies mit einer Konzentration der Teilströme auf wenige Strecken verbunden. Hohe Volumenströme in den Einlagerungs- bzw. Rückholungsfeldern begünstigen die Einhaltung der klimatischen Randbedingungen. Die Analyse der Teilmodelle zeigt, dass eine Einhaltung der Grenztemperaturen in allen durchgängig bewettern Strecken möglich ist. Die höchsten Temperaturen treten erwartungsgemäß in den Abwetterstrecken auf.

Die großen Querschnitte der Bohrlochüberfahrungsstrecken erlauben die Installation leistungsstarker Sonderbewetterungen. In den Neuauffahrungen der Bohrlochüberfahrungsstrecken werden Lutten mit einem Nenndurchmesser von 1.200 mm berücksichtigt. Die Sonderbewetterung erfolgt blasend. Eine Entstaubung ist ebenfalls berücksichtigt. In allen simulierten Vortrieben ist die Einhaltung der Grenztemperatur ohne zusätzliche Kühlmaßnahmen möglich. Besonders in den Bohrlochüberfahrungsstrecken der warmen Einlagerungsfelder steigt die Effektivtemperatur aber über 28°C und teilweise bis knapp unter 30°C. In den Vortrieben sollte zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen daher eine reguläre Kühlung berücksichtigt werden.

Die Sonderbewetterung der Versatzstrecken soll saugend erfolgen. Eine Entstaubung wird in die Sonderbewetterung integriert. Der Versatzeinbau soll als Schleuderversatz mit entsprechenden Schleudertrucks erfolgen. Die dieselbetriebenen Schleudertrucks haben die größte

Wärmeleistung (350 kW) aller berücksichtigten Maschinen. Es wird angenommen, dass die Trucks 50% der Zeit an den Versatzorten verbringen. Die Versatz Tätigkeiten finden in bereits geräumten Strecken statt. Diese liegen typischerweise an der Abluftseite der Querschläge. Wetterströme zur Versorgung der Versatzorte sind meist aufgefrischt bzw. sind bereits erwärmt. Durch die saugende Bewetterung erhöht sich die Temperatur bis zum eigentlichen Betriebspunkt am Ende der Versatzstrecke weiter. Der dort stattfindende Wärmeeintrag führt schließlich zu einer Überschreitung der Grenztemperatur am Arbeitsort. Eine Kühlung der Versatzstrecken ist unumgänglich.

Die durchgeführte Klimavorausberechnung verdeutlicht, dass in den sonderbewetterten Strecken eine zusätzliche Kühlung zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen installiert werden muss. Bezogen auf die durchschnittlichen Wetterströme von 27,6 kg/s (ca. 23 m³/s) in den Vortrieben und 16 kg/s (ca. 13 m³/s) in den Versatzstrecken wird eine Kühlleistung von wenigstens 100 kW benötigt. Bezogen auf den Massenstrom entspricht dies 3.620 J/kg für die Vortriebe oder 6.250 J/kg für die Versatzstrecken. Praktisch kann in die blasende Sonderbewetterung der Vortriebe eine Kühlung integriert werden. In den saugend bewetterten Versatzstrecken sollte ein Teilstrom in der Strecke möglichst nah am Versatzort gekühlt werden, siehe Abbildung 4-31.

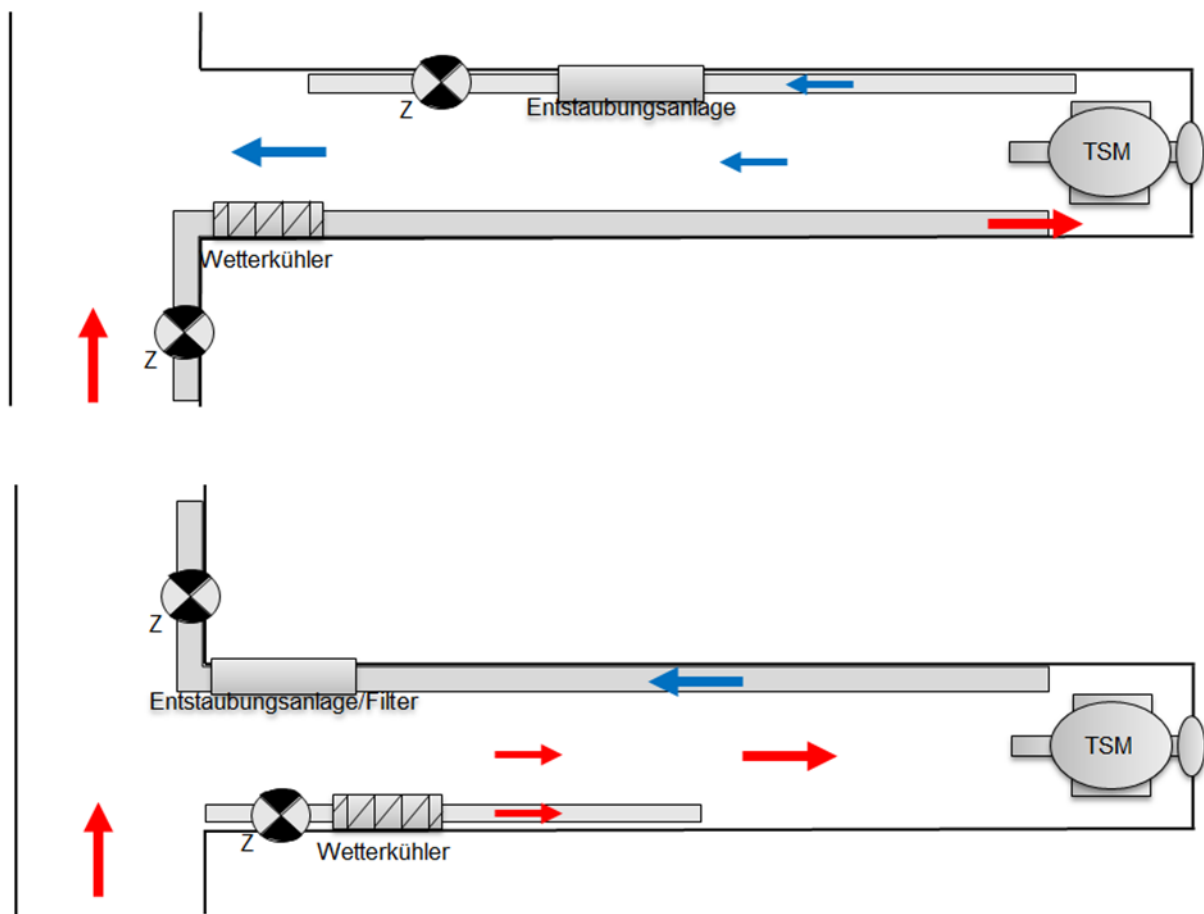


Abbildung 4-31: Schematische Darstellung blasende (oben) und saugende (unten) Sonderbewetterung mit Kühlung

Der Kühlbedarf je sonderbewetterter Strecke ist vergleichsweise gering und kann mit Kühlgeräten entsprechend dem Stand der Technik gewährleistet werden. Wie bei den Hauptstreckenvortrieben, können auch in den Bohrlochüberfahrungsstrecken dezentrale, zweiteilige Kältemaschinen genutzt werden. Eine räumliche Trennung von Verdampfer- und Kondensatoreinheit ist ebenso möglich. Die entzogene Wärme kann direkt in die Abwetterstrecke abgegeben werden. Die maximale Distanz zwischen Abwetterstrecke und Kühlpunkt beträgt ca. 770 m.

4.7.3.3 Bedingungen in einer möglichen Einhausung

Für die Neuerrichtung des Bohrloches erfordert die Installation einer temporären Einhausung am Bohrloch. Die Einhausung ist separat zu bewettern. Diese Bewetterung muss gleichzeitig die stetige Luftzirkulation im bis zu 9 m tiefen Bohrloch und Klimabedingungen im Einklang mit der KlimaBergV garantieren, vgl. Abschnitt 4.5. Der Wärmeeintrag der Maschinen (300 kW) wird innerhalb der Einhausung freigesetzt. Durch die zusätzliche Komplexität der Einhausung und der Arbeiten unter Sohlniveau reicht die vereinfachte Darstellung des Betriebspunktes nicht aus. Am Betriebspunkt "Errichtung Bohrloch" werden die Teilströme in verschiedene Wetterzweige unterteilt, siehe Abbildung 4-32. Der Innenraum der Einhausung umfasst den größten Teil des Querschnitts der Bohrlochüberfahrungsstrecke. Die Wetter innerhalb der Einhausung ziehen parallel zum Wetterstrom der freien Strecke. Auf der Frischwetterseite wird eine Einlassöffnung ($A = 1,1 \text{ m}^2$) in die Einhausung berücksichtigt. Auf der Abwetterseite der Einhausung ist der Querschnitt blockiert. Über eine Lutte ($A = 1,1 \text{ m}^2$) und einen Lüfter soll der Volumenstrom aus der Einhausung gesaugt werden. An die Luttenleitung kann eine geeignete Filteranlage und Raumluftüberwachung angeschlossen werden. Um den Arbeitsbereich des Bohrloches auszuspülen kann ein Freistrahllüfter oder eine zusätzliche Lutte genutzt werden. Im Modell wird an die Luttenleitung eine zweite, kleinere Lutte ($A = 0,3 \text{ m}^2$) angeschlossen. Der Volumenstrom wird damit geteilt. Ein Teilstrom zieht von der Einlassöffnung durch die Einhausung zur Hauptlutte. Ein zweiter Teilstrom zieht in das Bohrloch und wird dort gefasst. Dem Wetterzweig der Einhausung werden die gleichen Temperaturen wie der freien Bohrlochüberfahrungsstrecke zugeordnet. Nur im freigelegten Bohrloch wird, gemäß Abbildung 4-18, eine erhöhte Temperatur berücksichtigt. Am Kopfbereich des Innenliners steigt die Temperatur bis auf 86°C . Dieser Maximalwert wird im Modell berücksichtigt. Der verbleibende freie Querschnitt der Bohrlochüberfahrungsstrecke wird mit ca. 7 m^2 als Wetterweg neben der eigentlichen Streckenachse dargestellt.

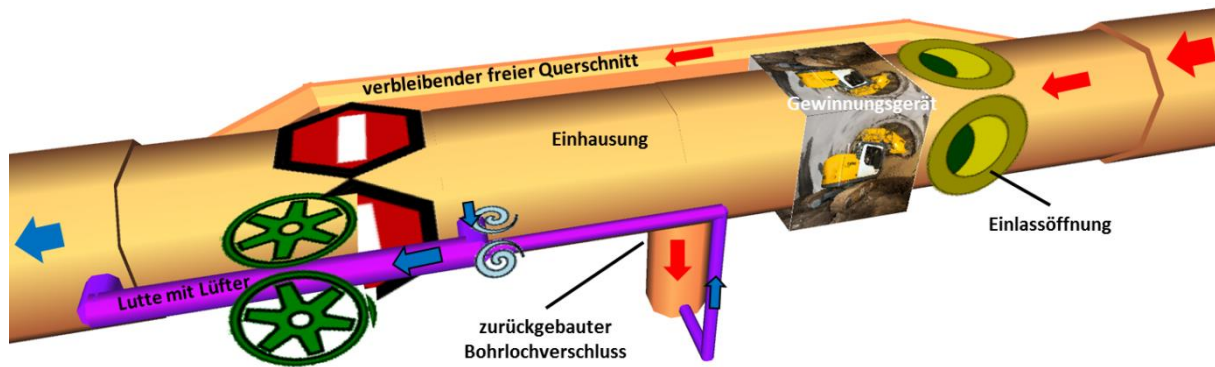


Abbildung 4-32: Umsetzung des geteilten Wetterwegs am Betriebspunkt "Rückbau Bohrloch"

Die Einhaltung der Klimagrenzwerte wird aufgrund des Wärmeeintrags der Geräte und des Bohrloches sowie dem begrenzten Arbeitsraum erschwert. Die Erhöhung des Wetterstromes als erste Kühlmaßnahme ist nicht beliebig umsetzbar. Im engen Querschnitt führen auch kleine Erhöhungen zu einer starken Zunahme der Wettergeschwindigkeit. Die Wettergeschwindigkeit im Bohrloch sollte einen Wert von 1 m/s nicht überschreiten.

Trotz der ungünstigen Bedingungen ist es in allen Modellen möglich den Wetterbedarf der Geräte zu decken und die Vorgaben der Klimabergverordnung (KlimBergV, 1983) einzuhalten. Die Effektivtemperatur steigt nicht über 25°C. Die Bereitstellung eines unbelasteten Frischwetterstromes bildet dafür eine wesentliche Voraussetzung. Gelingt dies nicht, ist eine Überschreitung der Grenztemperatur unvermeidlich und eine zusätzliche Kühlung des Teilstromes wird unerlässlich. Dies wird durch den Vergleich der beiden im Modell 5 repräsentativ untersuchten Betriebspunkte deutlich. Im Feld BE 2.1 wird der Betriebspunkt zur Vorbereitung der Rückholung direkt über den Querschlag mit einem Frischwetterstrom (19°C Effektivtemperatur) versorgt. Die Effektivtemperatur liegt am "Betriebspunkt Bohrloch" unter 28°C. Im Feld BE 4.1 wird zeitgleich der Versatz einer bereits geräumten Bohrlochüberfahrestrecke simuliert. Die Blindstrecke wird saugend bewettert. Durch die warmen Abwetter erreicht den Betriebspunkt Bohrloch nur ein aufgefrischter Wetterstrom, mit einer Eintrittstemperatur von 28°C (effektiv). Die Einhaltung der Grenztemperatur (<30°C Effektivtemperatur) am Betriebspunkt Bohrloch ist dann nur noch mit einer zusätzlichen Kühlung von 20 kW Kühlleistung möglich.

4.7.3.4 Extremwerte, Sommer bzw. Winter

In den zuvor beschriebenen Modellen sind jeweils die Jahresmitteltemperatur und die entsprechende relative Feuchte als Randbedingungen gegeben. Damit sind 50 % eines Jahres durch die Modelle abgedeckt, siehe Abbildung 4-33 und Tabelle 4-6. In der übrigen Hälfte übersteigen die Temperaturen das Jahresmittel. Höhere Außentemperaturen führen zu höheren Wettertemperaturen. Dies kann zu ungünstigen Bedingungen im Grubengebäude führen und zusätzliche Kühlmaßnahmen erfordern. Die Auswirkungen steigender Außentemperaturen werden daher am Modell 4 überprüft. Das Modell beinhaltet vier aktive Rückholungsfelder und ist durch einen hohen Wärmeeintrag gekennzeichnet.

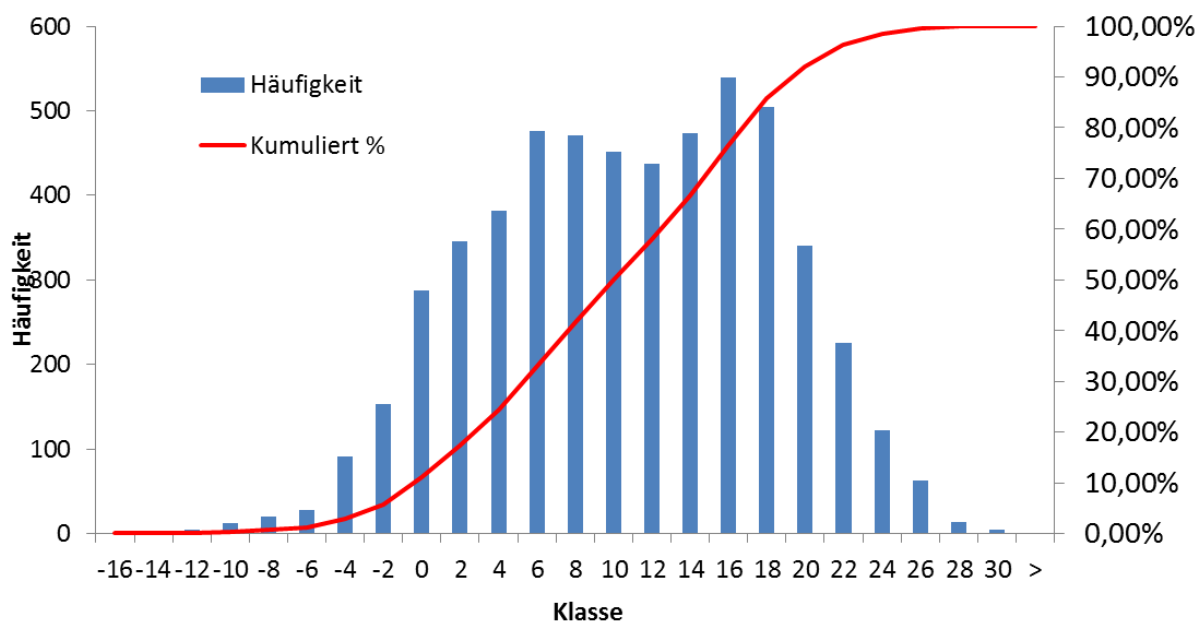


Abbildung 4-33: Verteilung der Tagesmitteltemperatur im Beobachtungszeitraum 2000 bis 2014

Zur Überprüfung der Temperatureffekte werden neben den Standardbedingungen (Tagesmitteltemperatur 10°C, rel. Feuchte 82%) vier zusätzliche Zustände mit erhöhten Temperaturen und vergleichend dazu zwei Zustände mit tiefen Temperaturen (Winterbedingungen) simuliert. Die mittlere Tagestemperatur in den Wintermonaten Dezember, Januar, Februar liegt bei ca. 1,3°C mit einer mittleren relativen Feuchte von ca. 86%. Als Extremwert wurde der Zustand -5°C und 83% rel. Feuchte gewählt. Tagesmitteltemperaturen von -5°C und tiefer treten in 1,6% des Jahres oder ca. 6 Tagen im Jahr auf.

Zur Darstellung erhöhter Temperaturen (Sommerbedingungen) werden die Zustände 13°C/77%, 17°C/72%, 21°C/68% und 25°C/62% gewählt. In den Sommermonaten Juni, Juli, August liegt die mittlere Tagestemperatur bei 17°C. Tagesmitteltemperaturen von 25°C und höher sind an 1,2% des Jahres oder an ca. 4 Tagen zu erwarten.

Tabelle 4-6: Verteilung der Tagesmitteltemperaturen im Betrachtungszeitraum

Klasse		Häufigkeit	Kumuliert	Anteil Jahresstunden	mittlere rel. Feuchte
-16	-14	3	0,06%	0,06%	76,8%
-14	-12	5	0,15%	0,09%	83,6%
-12	-10	12	0,37%	0,22%	83,1%
-10	-8	20	0,73%	0,37%	81,0%
-8	-6	28	1,25%	0,51%	84,1%
-6	-4	91	2,92%	1,67%	83,1%
-4	-2	153	5,72%	2,81%	84,7%

-2	0	288	11,01%	5,28%	84,7%
0	2	346	17,36%	6,35%	86,8%
2	4	382	24,37%	7,01%	85,9%
4	6	476	33,10%	8,73%	83,8%
6	8	471	41,74%	8,64%	81,9%
8	10	451	50,02%	8,28%	79,3%
10	12	437	58,04%	8,02%	77,4%
12	14	474	66,73%	8,70%	76,9%
14	16	539	76,62%	9,89%	74,1%
16	18	504	85,87%	9,25%	72,1%
18	20	341	92,13%	6,26%	70,1%
20	22	225	96,26%	4,13%	67,8%
22	24	122	98,50%	2,24%	63,4%
24	26	63	99,65%	1,16%	61,6%
26	28	14	99,91%	0,26%	60,2%
28	30	5	100,00%	0,09%	56,6%

Bei steigenden Temperaturen sind die bisherigen Kühlmaßnahmen nicht mehr ausreichend. Bereits ab einem Temperaturlevel von 17°C mittlerer Tagestemperatur sind Überschreitungen der Grenzwerte zu erwarten. Tagesmitteltemperaturen größer als 17°C treten in ca. 9,25% des Kalenderjahres oder 34 Tagen auf. Bezogen auf das Arbeitsjahr (220 Arbeitstage, Annahme Temperaturen im Kalender- und Arbeitsjahr gleich verteilt) sind dies ca. 20 Tage. Mit weiter steigenden Temperaturen treten in mehr Strecken Effektivtemperaturen über 30°C auf. Davon sind besonders die sonderbewetterten Strecken und die Strecken mit nur geringem Volumenstrom in schachtfernen Feldern betroffen. Zur Einhaltung der Grenztemperatur sind zusätzliche Kühlmaßnahmen erforderlich. Diese können eine Erhöhung des Wetterstromes in den betroffenen Strecken oder die Installation zusätzlicher Kühleinheiten sein. Auch die Verlagerung von Arbeiten in schachtnähere Einlagerungsfelder oder die Vermeidung von Betriebspunktkonzentrationen tragen zu verbesserten Umgebungsbedingungen bei. So sollten Arbeiten mit hohem Maschineneinsatz, wie beispielsweise Auffahrungs- und Versatzarbeiten, nicht mehr im gleichen Feld bzw. in hintereinandergeschalteten Wetterwegen stattfinden. Die benötigte Kühlleistung für eine Vortriebsstrecke steigt bis auf 450 kW an. Auch innerhalb der Einhausung wird eine Kühlleistung von bis zu 300 kW benötigt um eine Effektivtemperatur unter 28°C zu gewährleisten.

Die veränderten Umgebungsbedingungen spiegeln sich auch im Wärmeeintrag in den Wetterstrom wieder, siehe Abbildung 4-34. Die kalte Luft in den Wintermonaten erlaubt die Aufnahme wesentlich größerer Wärmemengen, besonders aus dem Gebirge. Der Anteil beträgt dann fast 50%. Mit steigenden Temperaturen reduziert sich der Anteil des Wärmeeintrags aus dem Gebirge. Der Wärmeanteil der Autokompression steigt dagegen mit zunehmender Außentemperatur. Da die Wetter bereits vor dem Eintritt in das Grubengebäude einen hohen Wärmeinhalt haben, sinkt auch die aufgenommene Gesamtwärmemenge. Während der Sommerbedingungen sind die Anteile der drei Hauptwärmequellen annähernd gleich verteilt.

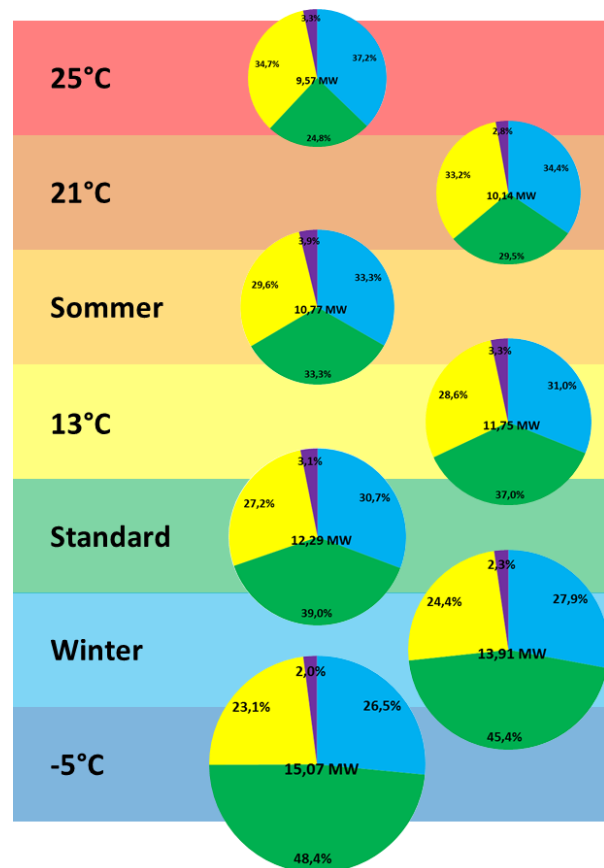


Abbildung 4-34: Wärmeeintrag in den Wetterstrom bei unterschiedlichen Temperaturen

4.7.3.5 Offenhaltung

Im Abschlussbericht der Kommission "Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe" (Komm, 2016) ist der Lebenszyklus des zukünftigen deutschen Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente in einzelnen Etappen unterteilt und beschrieben. Die Etappe der Einlagerung *"...der radioaktiven Abfälle beginnt mit dem Einbringen des ersten beladenen Endlagergebundes in das vorbereitete Bergwerk. Die Endlagergebünde werden in eine Reihe von Kammern, Strecken oder Bohrlöcher (von den Strecken aus) verbracht, abhängig vom jeweiligen Endlagerkonzept. Sobald einer dieser Lagerorte gefüllt ist, wird er verfüllt, damit die sich hinter dem Verschluss befindlichen Abfälle vom Bergwerk, insbesondere von dort arbeitenden Menschen, isoliert werden."* (Komm, 2016) Der Einlagerung soll sich eine "Etappe 4 - Beobachtung vor Verschluss des Endlagerbergwerks" anschließen. Für diese Etappe sieht die Kommission vor, dass in dieser *"...Etappe nach Abschluss der Einlagerung ist das Bergwerk weiterhin voll funktionsfähig und zugänglich"* (Komm, 2016) ist. Diese Beobachtungsphase dient der Reflektion des bisherigen Vorgehens. Während dieser Phase sind alle Behälter bereits eingebracht, die Einlagerungsbereiche sind verfüllt, alle anderen Strecken sind aber noch zugänglich. Die Dauer der Beobachtungsphase ist nicht näher definiert. Für den Endlagerbetrieb bedeutet dies,

dass einige Grubenteile offenzuhalten sind. Dieses Vorgehen weicht von der in Abschnitt 2 und Abschnitt 3 beschriebenen Betriebsweise des Endlagers ab und steht zumindest teils im Widerspruch zu den Sicherheitsanforderungen nach (BMU, 2010).

Für die Einlagerungsvariante der vertikalen Bohrlochlagerung entspricht dies einem Zustand des Endlagers, bei dem die Bohrlöcher befüllt und die Bohrlochverschlüsse errichtet sind. Alle Strecken bleiben offen, siehe Abbildung 4-35. Das entwickelte Rückholungskonzept wird von dieser zeitlichen Trennung von Einlagerung und Verschluss nur gering beeinflusst. Für eine Rückholung der Behälter ist weiterhin der Rückbau der Bohrlochverschlüsse nötig. Zur Umsetzung der Rückholung sind die in den Abschnitten 4.5 und 4.6 beschriebenen Arbeitsschritte notwendig. Alle Arbeiten zur Neuauffahrung der Strecken entfallen.

Die Offenhaltung aller Grubenräume über deren rein aus betrieblichen Aspekten notwendige Nutzungsdauer hinweg, hat einen starken Einfluss auf die betriebliche Sicherheit. So werden beispielsweise die Ausbaudimensionierung und auch die Bewetterung davon beeinflusst. Die Nutzungsdauer aller Strecken wird um die Dauer der Beobachtungsphase erhöht. Während der Beobachtung müssen alle Bohrlochüberfahrungsstrecken bewettert und Umgebungsbedingungen nach den Vorgaben der (KlimaBergV) eingehalten werden.

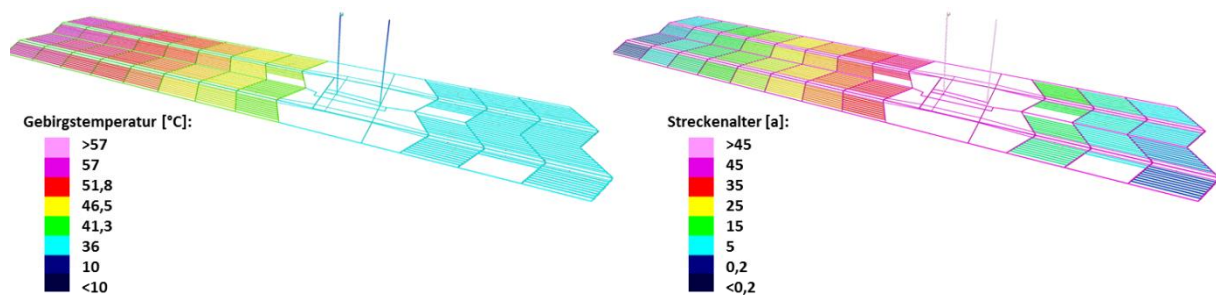


Abbildung 4-35: Gebirgstemperatur (rechts) und Alter der Strecken (links) im Grubengebäude zu Beginn der Rückholung

Der Mindestwetterbedarf entsprechend geltender bergbehördlicher Vorgaben beträgt $2 \text{ m}^3/\text{min}$ je Person und $3,4 \text{ m}^3/\text{min}$ je installiertem kW für Motoren. Der Offenhaltungsbetrieb beschränkt sich auf wenige Kontroll- und Inspektionsarbeiten (Annahme). Unter der Annahme, dass dazu an einem Betriebspunkt je zwei Personen in einem Befahrungsfahrzeug (50 kW Leistung) tätig sind, ergibt sich ein Mindestwetterbedarf von $174 \text{ m}^3/\text{min}$ oder $2,9 \text{ m}^3/\text{s}$. Bei einem Streckenquerschnitt von 40 m^2 resultiert daraus eine Wettergeschwindigkeit $< 0,1 \text{ m/s}$ (genau $0,0725 \text{ m/s}$). Es wird angenommen, dass jede Bohrlochüberfahrungsstrecke und auch die Gebindetransport- und Frischwetterstrecken mit $0,1 \text{ m/s}$ bewettert werden. Jedes Einlagerungsfeld umfasst neun Einlagerungsstrecken. Aus den vier Einlagerungsreihen des Einlagerungsbereiches BE resultieren damit 36 parallele Wetterwege, an denen je acht Einlagerungsfelder in Reihe verknüpft sind. Im Einlagerungsbereich HAW entstehen 36 parallele Wetterwege, an denen je vier Einlagerungsfelder in Reihe geschaltet sind. Hinzukommen je zwei Gebindetransportstrecken und drei Frischwetterstrecken. Der Gesamtwetterbedarf für jeden Einlagerungsbereich liegt damit bei $152 \text{ m}^3/\text{s}$ und beträgt in

Summe 304 m³/s. Ein Infrastrukturbereich wird nicht berücksichtigt. Der Wetterbedarf ist mit dem in den Teilmodellen 2 und 3 vergleichbar (vgl. vorangegangenen Abschnitt).

Die Wetter ziehen durch die Gebindetransport- und Frischwetterstrecken ans Ende des Grubengebäudes und dann über die Bohrlochüberfahrungs- und Abwetterstrecken wieder zum ausziehenden Schacht zurück.

Der Gesamtwärmeeintrag liegt bei ca. 14 MW und ist damit mit dem prognostizierten Eintrag aufgrund des Rückholungsbetriebes vergleichbar. Ein Wärmeeintrag aus den Maschinen und Sonderbewetterungen findet nicht statt, siehe Abbildung 4-36. Der größte Wärmeanteil stammt direkt aus dem Gebirge. In den Bohrlochüberfahrungsstrecken erwärmen sich die Teilströme stetig. Dies wird durch die geringe Wettergeschwindigkeit begünstigt. Mit den angenommenen Gebirgstemperaturen (vgl. Abschnitt 4.7.2.2) kommt es in ca. 50 % aller Bohrlochüberfahrungsstrecken des Einlagerungsbereiches BE zu einer Überschreitung der zulässigen Grenztemperatur, siehe Abbildung 4-37.

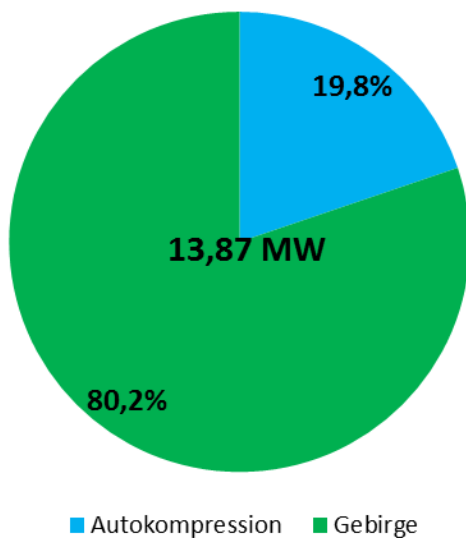


Abbildung 4-36: Wärmeeintrag im Modell der Offenhaltung aller Strecken

Auch eine Erhöhung des Volumenstromes je Bohrlochüberfahrungsstrecke und eine angepasste Wetterführung würde nicht zu einer Einhaltung der Grenztemperatur in allen Strecken führen. Regelmäßige Befahrungen oder Arbeiten in den Strecken sind damit nicht möglich.

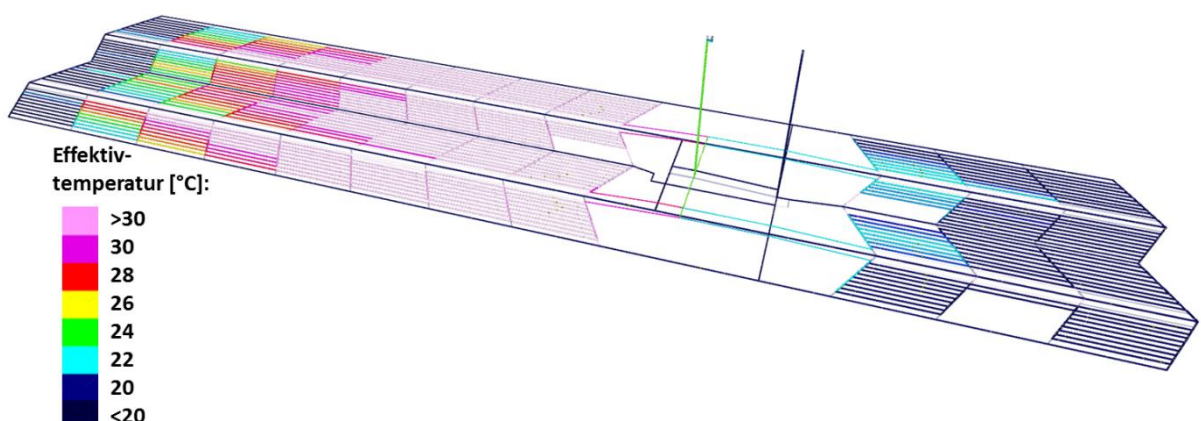


Abbildung 4-37: Effektivtemperatur in den Bohrlochüberfahrungsstrecken bei 0,1 m/s

Die Überschreitung der Grenztemperatur liegt in dem Wärmeeintrag aus den eingelagerten Abfällen begründet. Dies verdeutlicht auch der Vergleich mit dem HAW-Bereich. Dort findet kein zusätzlicher Wärmeeintrag statt. Ein geeignetes Bewetterungskonzept für eine Beobachtungsphase ist noch zu entwickeln.

4.7.4 Zwischenfazit

Die durchgeführten Wetternetz- und Klimavorausberechnungen basieren auf dem Einlagerungskonzept (DBE TEC, 2015) und den dazugehörigen thermomechanischen Berechnungen zur Temperatúrausbreitung im Gebirge. Die Wärmeverteilung im Grubengebäude wurde aus den Berechnungen abgeleitet. Aus den erstellten Modellen wird deutlich, dass zur Einhaltung der vorgeschriebenen Grenztemperaturen besonders in sonderbewetterten Strecken und Betriebspunkten mit einem großen Geräteeinsatz zusätzliche Kühlmaßnahmen unumgänglich sind. Abweichend von der Jahresdurchschnittstemperatur steigt der Kühlbedarf auch im Sommer an. Der Kühlaufwand bleibt in Summe aber moderat und kann durch lokale Kühleinheiten gedeckt werden. Die Errichtung großer, zentraler Kühlanlagen und eines entsprechenden Kühlleitungsnetzes ist nicht notwendig.

4.8 Umgang mit dem geräumten Grubengebäude

Nach der erfolgreichen Rückholung der Kokillen steht der Innenliner des früheren Einlagerungsbohrloches leer. Im Bohrloch selbst verbleiben nach der Rückholung noch der Innenliner, große Teile des Bentonitbuffers, der Außenliner und zunächst auch die Bohrlochschleuse. Mit fortschreitender Rückholung stehen mehr und mehr Einlagerungsbohrlöcher, Überfahrungsstrecken und schließlich ganze Einlagerungsfelder leer. Diese Teilbereiche des Grubengebäudes werden für den Rückholungsbetrieb nicht zwingend benötigt. Für den weiteren Umgang mit den offenen Grubenteilen ist spätestens während des Verschlusses des Endlagers bzw. im Rückholungsbetrieb eine geeignete Strategie festzulegen. Dabei sind besonders bergtechnische und strahlenschutztechnische Aspekte zu beachten.

Das geräumte Endlager muss verschlossen und entsprechend den geltenden gesetzlichen Regelungen verwahrt werden. Aus bergtechnischer Sicht steht bei der Verwahrung der freien Grubenteile der Schutz der Tagesoberfläche und umliegender, noch genutzter Grubenteile im Vordergrund. Das Abwerfen der nicht mehr genutzten Grubenteile ohne jede weitere Maßnahme stellt die technisch und ökonomisch einfachste Lösung dar. Die offenbleibenden Grubenteile entziehen sich damit aber der weiteren Kontrolle. Unkontrollierte Gebirgsschläge können sowohl die Tagesoberfläche als auch die aktiven Grubenteile beeinflussen. Ein einfaches Offenlassen und Abwerfen der Grubenteile stellt daher keine akzeptable Verwahrung dar.

Durch Versetzen der offenen Grubenteile kann das umliegende Gebirge stabilisiert und damit mögliche Setzungen reduziert werden. Als Versatzmaterial steht das Haufwerk aus der Wiederauffahrung zur Verfügung. Grundsätzlich stehen verschiedene Versatztechniken zur Verfügung. Gegenwärtig werden keine gesonderten Anforderungen an das Versatzmaterial gestellt. Für das Rückholungskonzept wird daher angenommen, dass das Haufwerk direkt nach dem Lösen an geeigneter Stelle wieder versetzt werden kann. Eine gesonderte Nachbehandlung bzw. Aufbereitung ist nicht vorgesehen.

Eine Verwahrung des Grubengebäudes entsprechend der bergbehördlichen Vorgaben im Sinne eines konventionellen Bergwerkes ist nur möglich, wenn das Endlager vollständig geräumt und gemäß § 29 (StrlSchV 17) freigegeben werden kann. Ähnlich dem Rückbau eines Kraftwerkes müssen dazu alle Reststoffe aus dem Endlager entfernt und schadlos entsorgt werden. Das Rauben von Einbauten nach erfolgter Rückholung kann durch technische oder geomechanische Bedingungen schwer zu realisieren sein. Unerkannte Behälterdefekte könnten zu einer Kontamination der Einbauten im Nahfeld der Behälter geführt haben. Hier von kann besonders der Innenliner der Einlagerungsbohrlöcher betroffen sein. Durch die Lage in unmittelbarer Nähe der Endlagerbehälter kann dann eine Aktivierung einzelner Bestandteile nicht ausgeschlossen werden. Dieses möglicherweise vorhandene radioaktive Inventar außerhalb der Behälter ist während der Rückholung mit zu beachten. Ist der restlose Rückbau aller Einbauten bzw. des noch enthaltenen radioaktiven Inventars nicht möglich, muss das geräumte Endlager entsprechend den Vorgaben des Atomrechts langzeitsicher verwahrt werden.

Im Sinne einer vollständigen Rückholung des radioaktiven Inventars müsste eine Freimesung beim Verbleib der Verrohrung dieser erfolgen. Gemäß §29 (StrlSchV, 2017) kann eine Aufhebung der Strahlenschutzbereiche nur dann erfolgen, wenn die Freigrenzen unterschritten werden. Bei der Einlagerungsvariante der Bohrlochlagerung wird der Bohrlochinnenliner dem Sperrbereich zugeordnet. Die Bohrlochüberfahrungsstrecken sind dem KB zugeordnet. Da die BSK nicht selbstabschirmend sind, kann die ausgehende Neutronenstrahlung zu einer Aktivierung der Verrohrung führen. Bei der Dimensionierung der Verrohrung ist darauf zu achten, dass die im Werkstoff enthaltenen Elemente ein geringes Aktivierungspotential bieten. Im Rahmen der VSG wurde für die Verrohrung ein Gusseisen mit Kugelgrafit berücksichtigt /GRS 12/. Der Werkstoff besitzt nur geringe Anteile zusätzlicher Elemente, wie etwa Mangan, Kupfer oder Silizium. Diese Spuren resultieren aus dem Herstellungsprozess. Zusätzlich kann durch einen Kokillendefekt eine Kontamination im Bohrlochversatz oder an der Verrohrung auftreten. Für die Freigabe der Verrohrung wird es zweckmäßig sein, an vorher festgelegten Punkten der Verrohrung Proben zu entnehmen und diese messtechnisch zu untersuchen. Weisen diese Proben eine Kontamination und eine Aktivierung unterhalb der Freigrenzen auf, wird eine Freigabe der Verrohrung möglich sein. Sollte allerdings eine Aktivierung oder Kontamination festgestellt werden die oberhalb der Freimessgrenzen liegt, sind Maßnahmen zu treffen, um die aktivierten bzw. kontaminierten Stellen der Verrohrung zu entfernen und als radioaktiven Abfall gesondert zu entsorgen. Gelingt die Dekontamination nicht, müssten die Komponenten zurückgebaut werden und entsprechend des enthaltenen Inventars als radioaktiver Abfall entsorgt werden.

Das beschriebene Verfahren zur Freigabe aus den Strahlenschutzbereichen ist ebenso für alle Strecken und für das Versatzmaterial durchzuführen.

5 Zeit- und Kostenschätzung

Der Lebenszyklus eines Endlagers reicht von der Standortsuche über die Planung, Errichtung, Betrieb eventueller Offenhaltung 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. Ein Deutsches Endlager für insbesondere wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente steht nach dem Neustart der Endlagersuche am Anfang dieses Lebenszyklus, vgl. Abbildung 5-1.

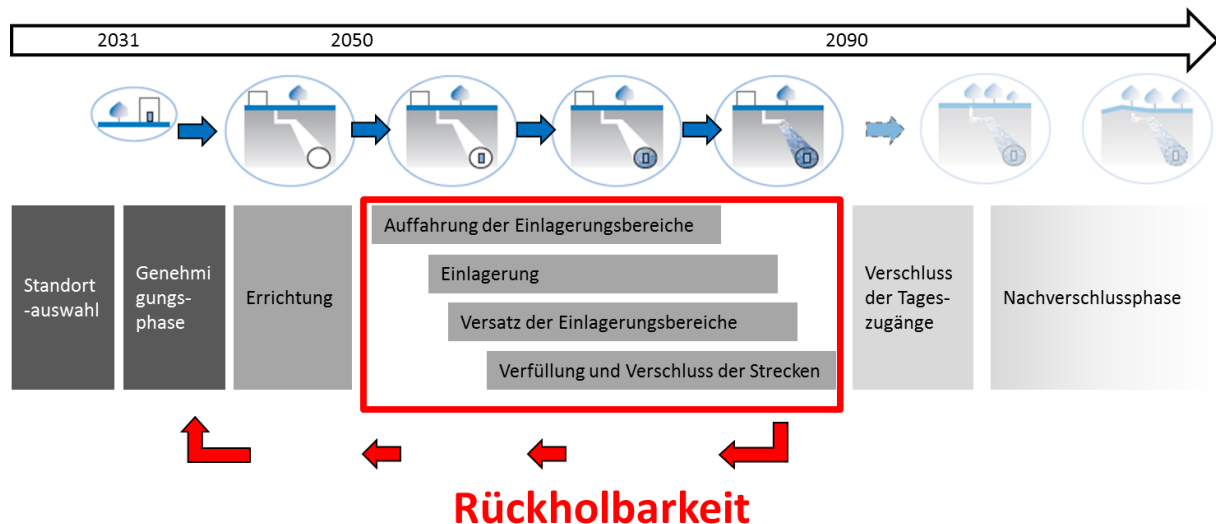


Abbildung 5-1: Lebenszyklus eines Endlagers und möglicher Rückholungszeitraum

Für Überlegungen zur technischen Umsetzung der Rückholbarkeit gilt ebenso, dass diese Planungen heute mit erheblichen Ungewissheiten behaftet sind. Die Rückholung stellt ein von der Normalentwicklung abweichendes Szenario dar. 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 2 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 üblichen Schätzfaktoren scheint nicht geeignet, um diese Unsicherheiten in geeigneter Weise zu berücksichtigen. In (DBE TEC, 2017d) 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 im 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 (DBE TEC, 2014) beschrieben. Gegenwärtig sind in keinem der weiterentwickelten Endlagerprojekte vergleichbare Planungsansätze zu finden, die eine Zeit- und Kostenschätzung über einen Analogieschluss vereinfachen würden. Der in (BMU, 2010) definierte Begriff 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 aufgefahren und gesichert werden. Vertiefende Arbeiten zur technischen Umsetzung wurden bisher nicht durchgeführt. Es existieren bisher auch dort keine Untersuchungen die einen Analogieschluss zur Zeit- und Kostenschätzung zulassen.

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

Für die Zeit- und Kostenschätzung einer potenziellen Rückholung von POLLUX®-Behälter im Konzept der horizontalen Streckenlagerung wird ein zweigeteilter Ansatz verfolgt. Auf Grund der Einzigartigkeit der Rückholungsforderung erfolgt die Zeitermittlung für die Rückholung über eine Abschätzung der notwendigen Teilprozesse. 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.

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 Einlage-

rungsfortschritt. Im Rahmen der Zeitschätzung soll eine Rückholung zum spätestmöglichen Zeitpunkt berücksichtigt werden. Weiterhin wird angenommen, dass der Rückholungsablauf allein durch die untertägigen Arbeiten bestimmt wird. Alle dafür benötigten Planungen, Genehmigungen, Einrichtungen und Ausrüstungen stehen zur Verfügung. Die Rückholung wird nach dem in Abschnitt 4 beschriebenen Konzept durchgeführt.

5.1 Zeitschätzung

Alle durchgeführten Untersuchungen zur Rückholbarkeit der eingelagerten ausgedienten Brennelemente und wärmentwickelnden hochradioaktiven Abfälle liegt die Annahme der spätestmöglichen Rückholung und die Anwendung der Re-Mining-Strategie zugrunde. Die Rückholung als aktive Maßnahme der Behälterentnahme bildet den Hauptprozess der Rückholungstätigkeit. Dieser ist in verschiedene vorausseilende und unterstützende Tätigkeiten eingebettet. Zwischen den verschiedenen Prozessen existieren Abhängigkeiten. Eine Parallelisierung der Tätigkeiten ist nicht immer möglich. Für eine vorläufige Zeit- und Kostenschätzung der Rückholung müssen folgende Haupt- und Nebenprozesse berücksichtigt werden:

- Neuauffahrung
 - Neuauffahrung Gebindettransportstrecken
 - Neuauffahrung Frischwetterstrecken
 - Neuauffahrung Abwetterstrecken
 - Neuauffahrung Querschläge
 - Neuauffahrung Bohrlochüberfahrungsstrecken
 - Gleisbau
- Errichtung Zugang zum Einlagerungsort
 - Erkundung
 - Rückbau Bohrlochverschlüsse
 - Auf- und Abbau Einhausung
 - Neuerrichtung Bohrlochverrohrung
 - Auf- und Abbau Bohrlochscheule
 - Gleisbau
- Rückholung
 - Versatzentnahme
 - Rückholung
 - Transport
- Versatz
- Verschluss

Die Auffahrung der insgesamt 55 km Gebindettransport-, Abwetter und Frischwetterstrecken sowie ca. 18 km Querschläge soll möglichst zügig erfolgen. Für die Errichtung werden bis zu vier Betriebspunkte im Mehrschichtsystem berücksichtigt. Aus der Abschätzung der Vortriebsleistung wird erwartet, dass diese Arbeiten nach ca. 10 Jahren abgeschlossen sind. Die Vortriebstechnik ist auch für die Errichtung der in Summe 156 km Bohrlochüberfahrungsstrecken einsetzbar. Die große Anzahl und die Gesamtlänge der Bohrlochüberfahrungsstrecken erfordern den gleichzeitigen Betrieb mehrerer Betriebspunkte. Unter Berücksichtigung der Vortriebsleistung sowie notwendiger Umbau und Wartungszeiten wird erwartet, dass die Auf-

fahrung ca. 32 Jahre dauert und parallel zur Rückholung umgesetzt wird. Die Errichtung der Bohrlochüberfahrungsstrecken kann beginnen, sobald die Aus- und Vorrichtung¹ an einem Einlagerungsfeld abgeschlossen ist, siehe Abbildung 5-2. Die genaue Auffahrungsreihenfolge der Einlagerungsfelder kann nach unterschiedlichen Gesichtspunkten festgelegt werden. Sobald die ersten Rückholungstrecken errichtet sind, können parallel dazu die Erkundung der Bohrlöcher und die Vorbereitung (Errichtung Bohrlochkeller und Bohrlochsleuse) der eigentlichen Rückholungstätigkeit erfolgen.

Die Arbeiten am Bohrloch sollen mit mehreren Betriebspunkten realisiert werden. Der Versatz und die Verfüllung können frühestens nach der Räumung aller Bohrlöcher einer Rückholungsstrecke beginnen. Während des Rückholungsbetriebes laufen die Arbeiten zur Neuauffahrung der Rückholungstrecken, die Rückholung selbst und später auch der Versatz parallel. Eine mögliche Verschlussphase am Ende des Rückholungsbetriebes wird nicht in die Zeitschätzung eingebunden.

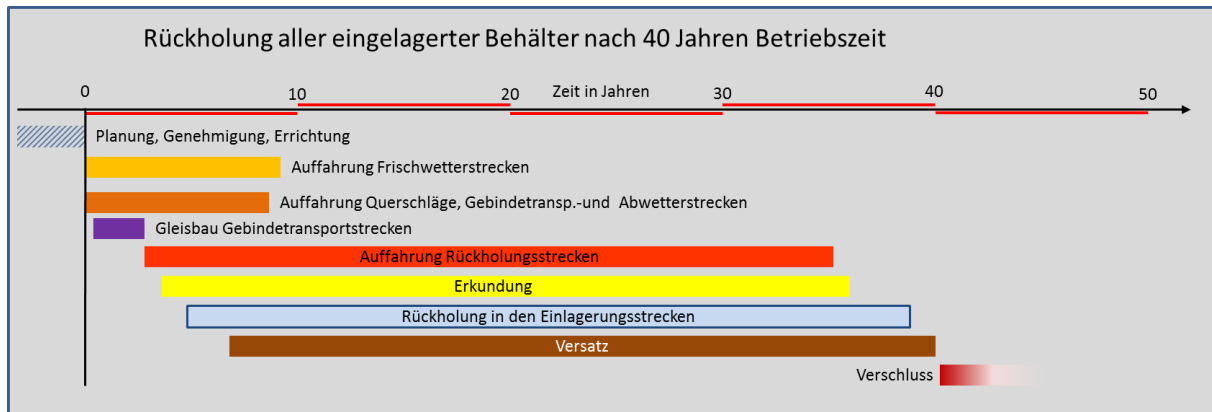


Abbildung 5-2: Übersicht Gesamtablauf

Die Rückholungstätigkeiten an den einzelnen Bohrlöchern sind durch einen hohen Aufwand für die vorbereitenden Arbeiten zur eigentlichen Rückholung gekennzeichnet. Das Öffnen der Bohrlöcher sowie die Neuerrichtung der Bohrlochverrohrung und Bohrlochsleuse erfordern einen hohen zeitlichen Aufwand. Der Aufwand für die Vorbereitung wird auf ca. 25 Schichten je Bohrloch geschätzt, vgl. Abbildung 5-3. Dem gegenüber steht eine deutlich zügigere Entnahme der Kokillen. Für die eigentliche Rückholung wird eine Schichtleistung von einer Kokille inkl. der Versatzentnahme erwartet. Um eine kontinuierliche Rückholung zu gewährleisten müssten an sechs unabhängigen Betriebspunkten gleichzeitig die vorbereitenden Arbeiten umgesetzt werden. Die Entnahme der Behälter würde immer nur an einem Betriebspunkt stattfinden.

¹ Unter Ausrichtung wird im bergbaulichen Sinn das Herstellen von Grubenbauen bzw. deren Vortrieb verstanden, durch die eine Lagerstätte zugänglich gemacht wird. Die Vorrichtung ist die Auffahrung von Grubenbauen zur Vorbereitung und Einteilung des Abbaus einer Lagerstätte. (Reuther, 1982)

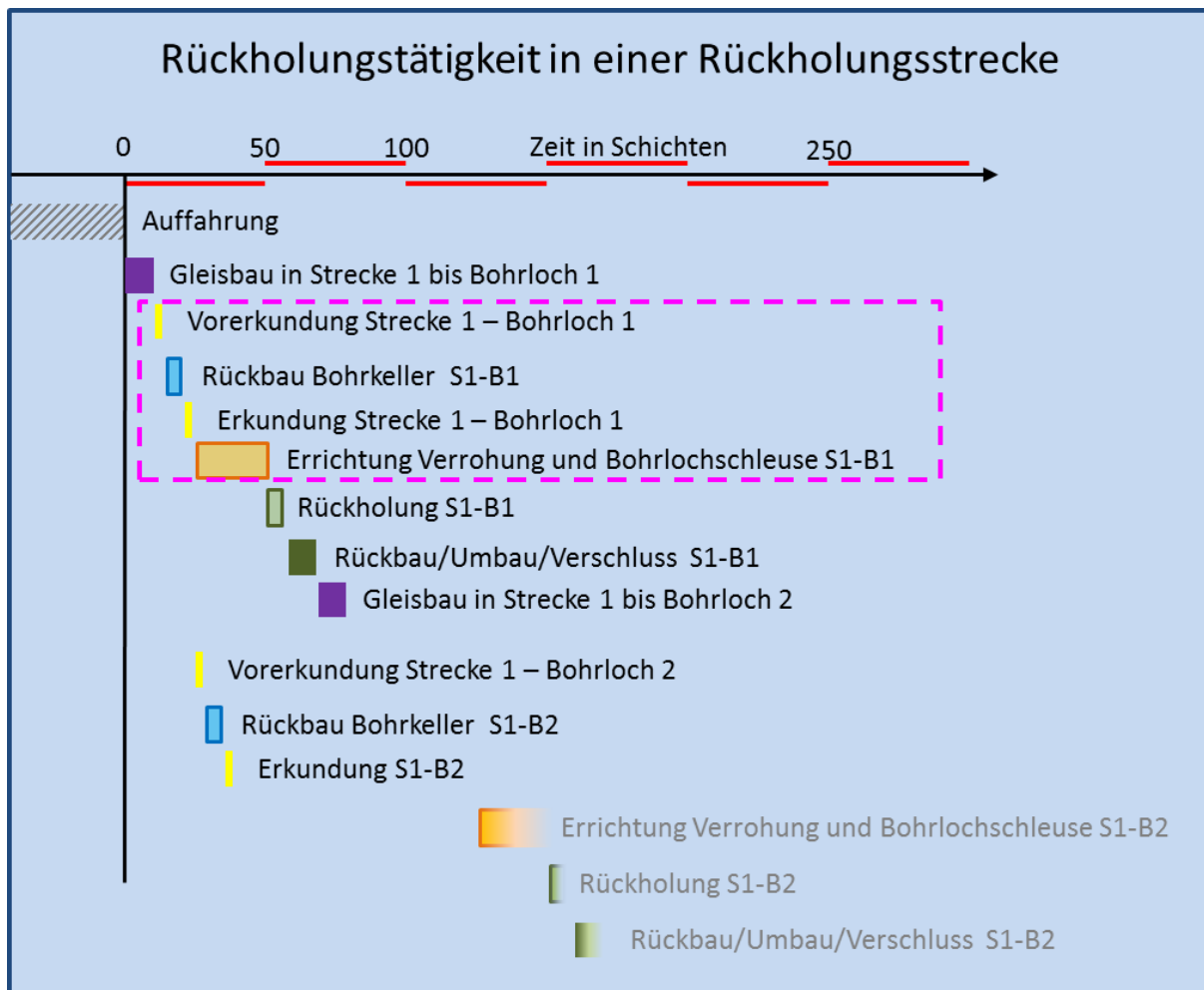


Abbildung 5-3: Übersicht Ablauf in einer Strecke

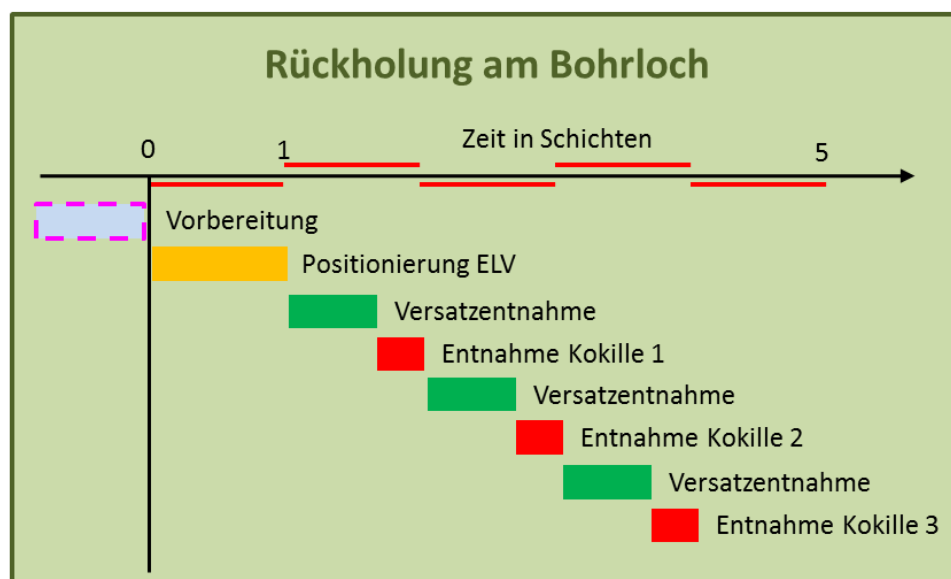


Abbildung 5-4: Übersicht Ablauf bei der eigentlichen Rückholung

Die vorläufige Zeitschätzung unterliegt der Annahme, dass alle Tätigkeiten im Zweischichtbetrieb durchgeführt werden. Unter dieser Annahme wurde die Neuerrichtung der Bohrlochschleuse inkl. Auf- und Abbau der Einhausung als zeitaufwendigster Teilprozess identifiziert. Die Durchführung an allen Bohrlöchern dauert insgesamt 34,4 Jahre. Die Errichtung aller Bohrkeller (in Summe 16,3 Jahre) und auch der Gleisbau in den Bohrlochüberfahrungsstrecken (ca. 5,5 Jahre) kann in Abhängigkeit des Rückholungsfortschrittes umgesetzt werden. Die Versatzentnahme und eigentliche Rückholung der BSK dauert ca. 24,5 Jahre. Alle Teilprozesse der Vorbereitung der Bohrlöcher und der eigentlichen Rückholungstätigkeit sollten parallel an verschiedenen Betriebspunkten umgesetzt werden. Auch der Versatz der bereits geräumten Bohrlöcher und Strecken kann parallel zur Rückholung erfolgen. Ohne Berücksichtigung einer Planungs- und Genehmigungsphase wird so für die Umsetzung der Rückholung ein Zeitraum von ca. 40 Jahren erwartet. Eine mögliche Verschlussphase ist 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 (DBE TEC, 2017d) 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 Bohrlochlagerung im Tongestein

Position	Kosten	Einheit
Kosten Auffahrung Kontrollbereich	148.000.000	€
Gleisbau	132.500.000	€
Kosten Auffahrung Überwachungsbereich	22.800.000	€
Kosten Auffahrung Bohrlochüberfahrungsstrecken	957.700.000	€
Kosten Rückholung	438.600.000	€
Kosten Versatz	151.100.000	€
Kosten Erkundung	43.700.000	€
Kosten Bewetterung/Kühlung	70.000.000	€
Zwischensumme	1.974.600.000	€
Betriebsdauer	40	a
Unterhaltung/Betrieb allgemein	41.900.000	€/a
jährliche Kosten	91.300.000	€/a

Ohne die Berücksichtigung einer Preissteigerung ergeben sich aus den erwarteten ca. 91,3 Mio. € jährlicher Kosten über die geplante Rückholungsdauer Kosten von insgesamt 3,65 Mrd. € ("Overnight"). Als Kostentreiber kann die Vorbereitung der Bohrlöcher für die Rückholung identifiziert werden. Da je Bohrloch nur drei Kokillen eingelagert sind bzw. zurückgeholt werden steigt der spezifische Arbeitsaufwand (und damit die Kosten) pro Kokille deutlich an.

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 vertikalen Bohrlochlagerung im Tongestein zusammengefasst.

Das Rückholungskonzept der vertikalen Bohrlochlagerung von BSK umfasst eine vertiefende Planung der Betriebsabläufe im Endlager, eine Konkretisierung der benötigten Technik, eine Neuentwicklung der Versatzentnahmetechnik, eine Klimavorausberechnung zur Vorhersage der zu erwartenden Bedingungen im Grubengebäude und eine erste Schätzung des zu erwartenden Zeit- und Kostenaufwands für die Rückholungstätigkeit.

Das Rückholungskonzept basiert im Wesentlichen auf einer Umkehrung des Einlagerungsvorganges. Aus den veränderten Randbedingungen während der Rückholung erwachsen neue Anforderungen an die Einlagerungstechnik. Dies führt zu einzelnen Änderungen am bestehenden Prototyp der Einlagerungsvorrichtung.

Die Entnahme des Versatzes im Einlagerungsbohrloch stellt die wesentliche technische Herausforderung während der Rückholung dar. Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurde ein technisches Konzept zur Umsetzung der Versatzentnahme erarbeitet. Mit Hilfe einer speziellen Saugkokille kann der Sandversatz abschnittsweise aus dem Bohrloch entfernt werden.

Mit der Analyse der Temperaturentwicklung nach der Einlagerung und einer Klimavorausberechnung konnten die Bedingungen im Grubengebäude während der Rückholung ermittelt werden. Der große räumliche Abstand zwischen den eingelagerten BSK und dem Grubengebäude führt zu einem zeitlich verzögerten aber stetigen Temperaturanstieg in den Einlagerungsfeldern. Im potenziellen Rückholungszeitraum liegen die Gebirgstemperaturen deutlich unter der Auslegungsgrenze. Die Bedingungen im Grubengebäude sind mit Hilfe zusätzlicher technischer Kühlmaßnahmen beherrschbar.

Das beschriebene Rückholungskonzept scheint unter den getroffenen Annahmen für die Entnahme aller eingelagerten Behälter aus dem Endlager geeignet. Durch die Beschreibung der einzelnen Betriebsabläufe und deren Abhängigkeiten, wird deutlich, dass für eine vollständige Rückholung aller eingelagerter Behälter eine Betriebszeit vergleichbar mit der vorherigen Einlagerungsbetriebszeit zu erwarten ist. Der technische Nachweis der Machbarkeit steht noch aus.

Quellenverzeichnis

- (AtG, 2018) Atomgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 10. Juli 2018 (BGBl. I S. 1122) geändert worden ist
- (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
- (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 2010b) DBE TECHNOLOGY GmbH: Optimization of the Direct Disposal Concept by Emplacing SF Canisters in Boreholes (ES-DRED/DENKMAL) - Final Report, Peine, 2010
- (DBE TEC, 2014) DBE TECHNOLOGY GmbH: Auswirkungen der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte, Abschlussbericht, Peine, 2014
- (DBE TEC, 2015) DBE TECHNOLOGY GmbH: Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell NORD. Technischer Bericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2015
- (DBE TEC, 2017a) M. Jobmann, A. Bebiolka, S. Jahn, A. Lommerzheim, J. Maßmann, A. Meleshyn, S. Mrugalla, K. Reinhold, A. Rübel, L. Stark, G. Ziefle: Projekt ANSICHT Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager im Tongestein in Deutschland - Synthesebericht , Peine, 2017
- (DBE TEC, 2017b) M. Jobmann, V. Burlaka, P. Herold, E. Kuate Simo, J. Maßmann, A. Meleshyn, A. Rübel, G. Ziefle: Projekt ANSICHT Systemanalyse für die Endlagerstandortmodelle - Methode und exemplarische Berechnungen zum Sicherheitsnachweis, Peine, 2017

- (DBE TEC, 2017c) M. Jobmann, V. Burlaka, A. Meleshyn, A. Rübel: Projekt AN-SICHT Spezifische Prozessanalysen, Arbeitsbericht, Peine, 2017
- (DBE TEC, 2017d) DBE TECHNOLOGY GmbH: Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland, Abschlussbericht, Peine, 2017
- (DWD, 2015) Deutscher Wetterdienst: Weste-Datenbank, Wetterdaten und -statistiken express, <http://www.dwd.de/DE/leistungen/witterungsreportexpress/witterungsreport-express.html>
- (EPIROC, 2017) <https://www.epiroc.com/de-de/products/loaders-and-trucks/continuous-loaders/haggloader-7-7-hr>
- (ESK, 2011) Entsorgungskommission: Rückholung / Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle aus einem Endlager – ein Diskussionspapier, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, 2011
- (ESK, 2015) Entsorgungskommission: Leitlinie zum sicheren Betrieb eines Endlagers für insbesondere Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle, 10.12.2015
- (Fantini, 2016) Product Broschüre: <http://www.fantinispa.it/wp-content/uploads/2015/05/brochure-gu.pdf>, gelesen am 31.05.2016
- (Gerotto, 2017) <http://www.gerotto.it/MiniExcavators/Gatto.aspx>, gelesen am 31.05.2016
- (GRS, 2012) Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS): Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Arbeitspaket 6 - Abschlussbericht, GRS-Bericht GRS-281, Köln, 2012
- (IAEA, 2009) International Atomic Energy Agency (IAEA): Geological Disposal of Radioactive Waste: Technological Implications for Retrievability NW-T-1.19, Wien, 2009
- (KlimaBergV, 1983) Klima-Bergverordnung vom 9. Juni 1983 (BGBl. I S. 685)
- (Komm, 2016) Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe: Abschlussbericht, Drucksache 268, Hrsg. Geschäftsstelle Nationales Begeleitgremium, Berlin, 2016
- (Krieger et al., 2017) J.-M. Krieger, G. Armand, O. Ozanam, P. Landais (Andra): Design of Underground and Closure Structures for the CigÃ©o Project, Charlotte 2017

- (Liebherr, 2016) <https://www.liebherr.com/de/deu/produkte/baumaschinen/erdbewegung/raupenbagger/details/69410.html>, gelesen am 31.05.2016
- (NEA, 2011) Nuclear Energy Agency (NEA): Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel - Final Report, Paris, 2011
- (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:	Einordnung der Begriffsdefinitionen Rückholbarkeit und Bergung gemäß (BMU, 2010) in typische Entwicklungsstufen eines Endlagers und Vergleich mit dem internationalen Verständnis zur Reversibilität, nach (NEA, 2011)	5
Abbildung 3-1:	Konzept des Grubengebäudes für die Einlagerung ausgedienter Brennelemente und wärmeentwickelnder Abfälle durch Bohrlochlagerung (DBE TEC, 2015)	10
Abbildung 3-2:	Schema eines doppelten Streckenverschlusses zur Abdichtung der Hauptstrecken im Einlagerungskonzept der Bohrlochlagerung nach (DBE TEC, 2015)	10
Abbildung 3-3:	Schematische Darstellung des Einlagerungsortes der Bohrlochlagerung (DBE TEC, 2015)	11
Abbildung 3-4:	BSK-3 (links), Triple Pack für HAW-Kokillen (Mitte) nach (GRS, 2011) und BSK-R (rechts) nach (GRS, 2012)	12
Abbildung 3-5:	Batterie Lokomotive mit Führerhaus und Energieteil (links) und Plateauwagen mit Transferbehälter (rechts), (DBE TEC 2010b)	13
Abbildung 3-6:	Prototyp der Einlagerungsvorrichtung (ELV) am Versuchsstand, (DBE TEC, 2010b)	13
Abbildung 3-7:	Bohrlochsleuse, (DBE TEC, 2010b)	14
Abbildung 3-8:	Schematische Darstellung der Rückbauprozesse zur Errichtung des Bohrlochverschlusses im Einlagerungsbohrloch	15
Abbildung 3-9:	Schematische Darstellung der Errichtung des Bohrlochverschlusses	15
Abbildung 4-1:	Schematische Darstellung der Hauptprozesse im Rückholungsbetrieb	19
Abbildung 4-2:	Lage der Streckenverschlüsse im Grubengebäude NORD, nach (DBE TEC, 2015)	27
Abbildung 4-3:	Teilschnittmaschine zur Neuauffahrung (links), Tunnelbagger (Liebherr, 2016) (mitte) oder alternativ Häggloader (EPIROC, 2017) (rechts) zur Versatzentnahme	30
Abbildung 4-4:	Schematische Darstellung der Teilschritte zum Rückbau des Bohrlochverschlusses	31
Abbildung 4-5:	Anwendungsbeispiele Kettenschrämmaschine, links: Natursteingewinnung (Fantini, 2016), mitte: Erkundungsbergwerk Gorleben (DBE TEC, 2010a), rechts: Schlitzsäge im URL Bure (Bock et al. 2010)	32
Abbildung 4-6:	Beispiele für den Einsatz von Saugbaggern im Tiefbau (Gerotto, 2017)	33
Abbildung 4-8:	Querschnitt Bohrloch-überfahrungsstrecken mit neuem Bohrlochkeller und potenziellen Bereich für die Einhausung	33
Abbildung 4-8:	Schematische Darstellung der Teilschritte zur Neuerrichtung der Innenverrohrung und der Bohrlochsleuse	34

Abbildung 4-9:	Schematische Darstellung des Aufbaus des Bohrloches während der Entnahme der Behälter	35
Abbildung 4-10:	Schematische Darstellung: Entnahme Versatz und Entnahme BSK	36
Abbildung 4-12:	Schnittbild Saugvorrichtung im Bohrloch	40
Abbildung 4-12:	Schnitt durch Hüllrohr mit Förderrohr (blau) in geschlossener Stellung, zu sehen in der Position über dem Kopf des Endlagerbehälters zum Ende des Saugvorgangs vor der Behälterrückholung	41
Abbildung 4-13:	Schematische Darstellung der Bewetterung während des Einlagerungsbetriebes (DBE TEC, 2010b)	42
Abbildung 4-14:	Grubengebäude gesamt mit Draufsicht Zentralbereich und Detailansicht Überführung der Hauptstrecken	43
Abbildung 4-15:	Temperatur und relative Feuchte im Jahresmittel für Deutschland (DWD, 2015)	44
Abbildung 4-16:	Mittlere Tagestemperaturen und rel. Feuchte im Betrachtungszeitraum 2000 bis 2014, (DWD, 2015)	45
Abbildung 4-17:	Temperaturentwicklung in Richtung der Streckenachse in den ersten 100 Jahren nach Einlagerung (DBE TEC, 2017b)	46
Abbildung 4-18:	Temperaturentwicklung im Kopfbereich eines Einlagerungsbohrloches in den ersten 100 Jahren nach Einlagerung (DBE TEC, 2017b)	47
Abbildung 4-19:	Angenommene Temperaturverteilung in den Einlagerungsfeldern zu Beginn der Rückholung	48
Abbildung 4-20:	Zutrittsraten und relative Luftfeuchte während der 2. Phase des "Ventilation Experiments" im Untertagelabor Mont Terri (Mayor & Velasco, 2008)	48
Abbildung 4-21:	Zuordnung der Zutrittsraten im Vortrieb und im übrigen Grubengebäude, Orange= Kurzzeitrage, Gelb=Langzeitrage	49
Abbildung 4-22:	Skizze vorläufige Querschnitte der Hauptstrecken	50
Abbildung 4-23:	Grenzen der Beschäftigung in Abhängigkeit von der Normal-Effektivtemperatur	52
Abbildung 4-24:	Übersicht Modelle	53
Abbildung 4-25:	Übersicht Modell 1 und Detailansicht der simulierten Vortriebe um BE 4.154	
Abbildung 4-26:	Anteile am Wärme-eintrag (6,3 MW) im Modell 1 – Auffahrung der Hauptstrecken	55
Abbildung 4-28:	Zustandsänderungen in den Sonderbewetterungen, bezogen auf Normaldruck	56
Abbildung 4-28:	Darstellung der Betriebspunkte am Beispiel Modell 2, BE 1.1	58
Abbildung 4-29:	Kennlinien der Hauptgrubenlüfter in den Teilmodellen	59

Abbildung 4-30: Energieeintrag getrennt nach Quellen für Modell 2 (links oben), Modell 3 (rechts oben), Modell 4 (links unten) und Modell 5 (rechts unten)	60
Abbildung 4-31: Schematische Darstellung blasende (oben) und saugende (unten) Sonderbewetterung mit Kühlung	61
Abbildung 4-32: Umsetzung des geteilten Wetterwegs am Betriebspunkt "Rückbau Bohrloch"	63
Abbildung 4-33: Verteilung der Tagesmitteltemperatur im Beobachtungszeitraum 2000 bis 2014	64
Abbildung 4-35: Wärmeeintrag in den Wetterstrom bei unterschiedlichen Temperaturen	66
Abbildung 4-35: Gebirgstemperatur (rechts) und Alter der Strecken (links) im Grubengebäude zu Beginn der Rückholung	67
Abbildung 4-36: Wärmeeintrag im Modell der Offenhaltung aller Strecken	68
Abbildung 4-37: Effektivtemperatur in den Bohrlochüberfahungstrecken bei 0,1 m/s	68
Abbildung 5-1: Lebenszyklus eines Endlagers und möglicher Rückholungszeitraum	72
Abbildung 5-2: Übersicht Gesamtablauf	75
Abbildung 5-3: Übersicht Ablauf in einer Strecke	76
Abbildung 5-4: Übersicht Ablauf bei der eigentlichen Rückholung	76

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Übersicht Auslegungsanforderungen für die Einlagerung	17
Tabelle 4-2:	Übersicht Zutrittsmengen in den Hauptstrecken	50
Tabelle 4-3:	Geometrie der Streckenquerschnitte	51
Tabelle 4-4:	Wetterbedarf der Bertiebspunkte	57
Tabelle 4-5:	Gesamtwettermengen in den Teilmodellen	58
Tabelle 4-6:	Verteilung der Tagesmitteltemperaturen im Betrachtungszeitraum	64
Tabelle 5-1:	Kostenschätzung zur Rückholung der Bohrlochlagerung im Tongestein	79

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