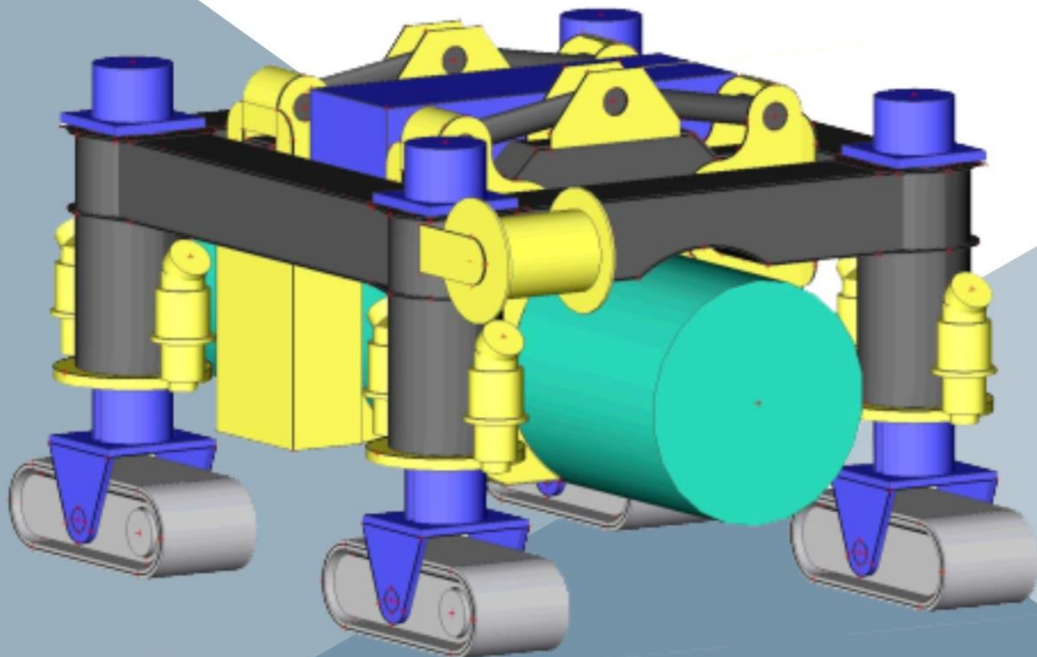


## ERNESTA

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

**BGE TEC 2018-11**





## ERNESTA

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

### **BGE TEC 2018-11**

Autoren	Philipp Herold Sabine Prignitz Eric Simo Wolfgang Filbert Niklas Bertrams
---------	---

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

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

Förderkennzeichen	02 E 11294
-------------------	------------

Dieser Bericht wurde erstellt 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)

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.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

BETREUT VOM



**PTKA**  
**Projektträger Karlsruhe**

Karlsruher Institut für Technologie

# ERNESTA

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

## BGE TEC 2018-11

Autoren  
 Philipp Herold  
 Sabine Prignitz  
 Eric Simo Kuate  
 Wolfgang Filbert  
 Niklas Bertrams

Datum  
 September 2018

Auftraggeber  
 PTKA

Förderkennzeichen  
 02E11294

**Gesamtzahl der Seiten: 80**

Ersteller: P. Herold	Prüfer: A. Wunderlich	Freigabe: T. v. Berlepsch
Datum/Unterschrift	Datum/Unterschrift	Datum/Unterschrift

PROJ	PSP	OBJ	FUNK	KOMP	BAUG	AG	UA	LFNR	RV

DOKID:  
 ULV-Nr.



## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Generelle Rückholungsstrategie	3
3	Rückholbarkeit bei der horizontalen Streckenlagerung im Salzgestein	9
3.1	Einlagerungskonzept	9
3.2	Bestehendes Rückholungskonzept	11
3.3	Vertiefende Untersuchungen zum Rückholungskonzept	12
3.3.1	Aus- und Vorrichtung – Betriebsablauf und Technik	12
3.3.2	Lagebestimmung der Endlagerbehälter	13
3.3.3	Auffahrung der Rückholungsstrecke	13
3.3.4	Entnahme der Endlagerbehälter	14
3.3.5	Transport vom Rückholungsort zum Schacht	17
3.3.6	Automatisierung	18
3.3.7	Betriebsstörungsanalyse	18
3.3.8	Übertragung der mELVIS auf die Einlagerung	19
3.4	Thermomechanische Berechnungen zur Rückholungsstrecke	20
3.5	Bewetterung und Klimavorausberechnung	22
3.5.1	Bewetterung	22
3.5.2	Temperaturentwicklungen und Klimavorausberechnung	23
3.6	Umgang mit den Brennelementstrukturteilen	28
3.7	Verschluss und Umgang mit dem geräumten Endlager	29
3.8	Zeit- und Kostenschätzung	30
4	Rückholbarkeit bei der vertikalen Bohrlochlagerung im Salzgestein	31
4.1	Einlagerungskonzept	31
4.2	Betriebsablauf und Technik der Rückholung	33
4.2.1	Aus- und Vorrichtung am Beispiel Grubengebäude der VSG	33
4.2.2	Vorbereitung der Rückholung	34
4.2.3	Versatzentnahme	35
4.2.4	Rückholungstätigkeit	36
4.2.5	Automatisierungspotenzial während der Rückholung	37
4.3	Bewetterung und Klimavorausberechnung	37
4.3.1	Bewetterung	37

---

4.3.2	Temperaturentwicklungen und Klimavorausberechnung	38
4.4	Verschluss und Umgang mit dem geräumten Endlager	40
4.5	Zeit- und Kostenschätzung	41
5	Rückschlüsse für die direkte Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern	43
6	Rückholbarkeit bei der horizontalen Streckenlagerung im Tongestein	47
6.1	Einlagerungskonzept	47
6.2	Rückholungskonzept	48
6.3	Umgang mit dem Ausbau	51
6.4	Wettertechnik und Klimavorausberechnung	52
6.4.1	Bewetterung	52
6.4.2	Temperaturberechnungen und Klimavorausberechnung	53
6.5	Umgang mit dem geräumten Endlager	54
6.6	Zeit- und Kostenschätzung	55
7	Rückholbarkeit vertikale Bohrlochlagerung im Tongestein	57
7.1	Einlagerungskonzept	57
7.2	Rückholungskonzept	58
7.2.1	Umgang mit dem Ausbau	59
7.2.2	Auswirkungen der Rückholbarkeit auf die Verschlussbauwerke	61
7.2.3	Versatzentnahme und Neuauffahrung	61
7.2.4	Freilegen des Bohrloches	62
7.2.5	Entnahme der Endlagerbehälter	62
7.3	Wettertechnik und Klimavorausberechnung	62
7.3.1	Bewetterung	62
7.3.2	Temperaturberechnungen und Klimavorausberechnung	63
7.4	Umgang mit dem geräumten Grubengebäude	65
7.5	Zeit- und Kostenschätzung	66
8	Zusammenfassung	67
	Quellenverzeichnis	71
	Abbildungsverzeichnis	75
	Tabellenverzeichnis	76



## 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 toxischen Bestandteilen zu schützen. Die Sicherheit soll dabei über ein Multi-Barrieren Konzept gewährleistet werden, bei dem über lange geologische Zeiträume hinweg das Gebirge die wesentliche Sicherheitsfunktion übernimmt. Die Langzeitsicherheit des Endlagersystems stützt sich auf die passive Sicherheit des Wirtsgesteins. Eine aktive Kontroll- und Überwachungsfunktion durch den Mensch ist nicht erforderlich.

Während der Erkundung, Planung, Genehmigung, Errichtung, dem Betrieb und auch dem Verschluss eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen soll der Planungsgrundsatz der Reversibilität von Entscheidungen die Möglichkeit geben, auf veränderte Bedingungen oder Entwicklungen zu reagieren und getroffene Entscheidungen zu korrigieren. Während der Betriebszeit des Endlagers wird die Reversibilität von Entscheidungen durch eine Rückholbarkeit der Abfälle gewährleistet. Rückholbarkeit ist per Definition *"...die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten radioaktiven Abfallbehälter aus dem Endlagerbergwerk..."* (BMU, 2010). Die Anforderung der Rückholbarkeit ist heute Genehmigungsvoraussetzung für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente. Mit der Rückholungsoption besteht die Möglichkeit, die eingelagerten Endlagerbehälter 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 Maßnahmen zur Gewährleistung der Rückholbarkeit die passive Sicherheit und damit die Langzeitsicherheit des Endlagers nicht beeinträchtigen. Rückholbarkeit im Sinne des in (BMU, 2010) festgelegten Sicherheitsverständnisses bedeutet somit nicht, dass ein permanenter Zugriff möglich und eine direkte Überwachung jedes einzelnen Endlagerbehälters gegeben sein müssen. Vielmehr steht die Funktionsfähigkeit des gesamten Endlagersystems im Vordergrund. Aus diesem Verständnis heraus wird für die mögliche Rückholung von Endlagerbehältern aus einem Endlager das sogenannte "Re-Mining"-Konzept favorisiert. Dies bedeutet, dass die Endlagerbehälter entsprechend der Endlagerauslegung eingelagert und verschlossen werden. Im Falle einer Rückholung erfolgen dann die erneute Auffahrung der Zugänge und die Entnahme der Endlagerbehälter. Eine Offenhaltung einzelner Gruben-teile über den aus betrieblichen Zwängen resultierenden Zeitraum hinaus steht nicht im Einklang mit den Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010) und ist daher nicht vorgesehen.

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 Abschlussbericht werden die Arbeiten zur Vertiefung des Planungsstandes der Rückholungskonzepte der horizontalen Streckenlagerung von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern und der vertikalen Bohrlochlagerung von Kokillen in Salz- und Tongesteinsformationen zusammengefasst.



## 2 Generelle Rückholungsstrategie

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

Der beschriebene Entsorgungsansatz wird innerhalb der gesellschaftlichen Debatte zum Umgang mit wärmeentwickelnden hochradioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen immer wieder hinterfragt. Ein Bestandteil dieser Debatte ist die Frage, ob und wie eine Reversibilität von Entscheidungen in die Entsorgungsstrategie implementiert werden kann. Reversibilität wird als *"Möglichkeit der Umkehrung eines oder mehrerer Schritte in allen Phasen des Prozesses der Endlagerentwicklung: Endlagerung und -auslegung, Bau und Betrieb des Endlagers bis hin zur völligen Rückabwicklung"* (ESK 2011) definiert. Mit voranschreitender Projektphase steigt dabei der Aufwand eines Rücksprungs bzw. einer Kurskorrektur. Die Diskussion um die Reversibilität dreht sich innerhalb der breiten gesellschaftlichen Debatte im Wesentlichen um die Frage nach der Notwendigkeit einer Rückholbarkeit. Die *"... Rückholbarkeit wird als die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten Abfallbehälter aus dem Endlagerbergwerk bezeichnet"* (BMU, 2010) und stellt damit einen Teilaspekt der Reversibilität dar.

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

Aus der Diskussion um die Vor- und Nachteile der Rückholbarkeitsoption entwickelt sich in den letzten Jahren mehr und mehr der gesellschaftliche Konsens, dass eine Rückholbarkeit der eingelagerten Endlagerbehälter in die Endlagerkonzeption aufgenommen werden sollte. Diese Meinung wird auch durch die Arbeiten der „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“, gemäß §3 Standortauswahlgesetz (StandAG, 2013), die Neufassung des StandAG (StandAG, 2017) und den „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ (BMU, 2010), herausgegeben vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit am 30. September 2010, untermauert. Die „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ und ebenso (StandAG, 2017) benennen die Endlagerung mit Rückholungsoption als Vorzugsvariante für den Umgang mit wärmeentwickelnden hochradioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen in Deutschland (Komm, 2016).

Die Sicherheitsanforderungen des BMU ersetzen die früheren Sicherheitskriterien aus dem Jahr 1983. Mit den neuen Sicherheitsanforderungen wird festgelegt, welches Sicherheitsniveau für ein solches Endlager nachweislich einzuhalten ist. Über die Festlegung von Auslegungsanforderungen wird in Deutschland erstmals auch die Rückholbarkeit der Endlagerbehälter *„in der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen...“* (BMU, 2010) vorgeschrieben. Die Sicherheitsanforderungen des BMU sind für den Antragsteller bei allen wesentlichen Teilschritten zur Planung, Errichtung, zum Betrieb und zur 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 2010 veröffentlichten Sicherheitsanforderungen des BMU lassen sich rechtlich nicht eindeutig einordnen, entsprechen aber einer das Atomgesetz konkretisierenden Verwaltungsvorschrift zur Feststellung der Genehmigungsfähigkeit. Aus dieser rechtlichen Einordnung folgt, dass alle Maßnahmen zur *„... Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage...“* (§ 7 II Nr. 3 AtG) getroffen werden, dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen müssen. Dementsprechend müssen auch die *„geplanten technischen Maßnahmen“* (BMU, 2010) zur Gewährleistung einer Rückholbarkeit den Stand von Wissenschaft und Technik einhalten. Dies ist nachzuweisen.

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

Für die Überführung der Anforderung einer Rückholbarkeit in konkrete technische Konzepte müssen auch die weiteren Auslegungsanforderungen an das Endlager für wärmeentwickelnde 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 Überlegungen zur Rückholbarkeit eingezogen werden. In Abbildung 2-1 erfolgt die Zuordnung der Rückholbarkeit zu den typischen Entwicklungsstufen eines Endlagers. Mit dieser Zuordnung wird auch der Begriff der Bergung aufgegriffen. Bergung als weitere Sonderform der Reversibilität umfasst die Entnahme der Endlagerbehälter aus dem bereits verschlossenen Endlager und ist nach (BMU, 2010) auf 500 Jahre nach dem Verschluss begrenzt. Alle weiteren zukünftigen Entwicklungen sind von Überlegungen zur Reversibilität ausgenommen.

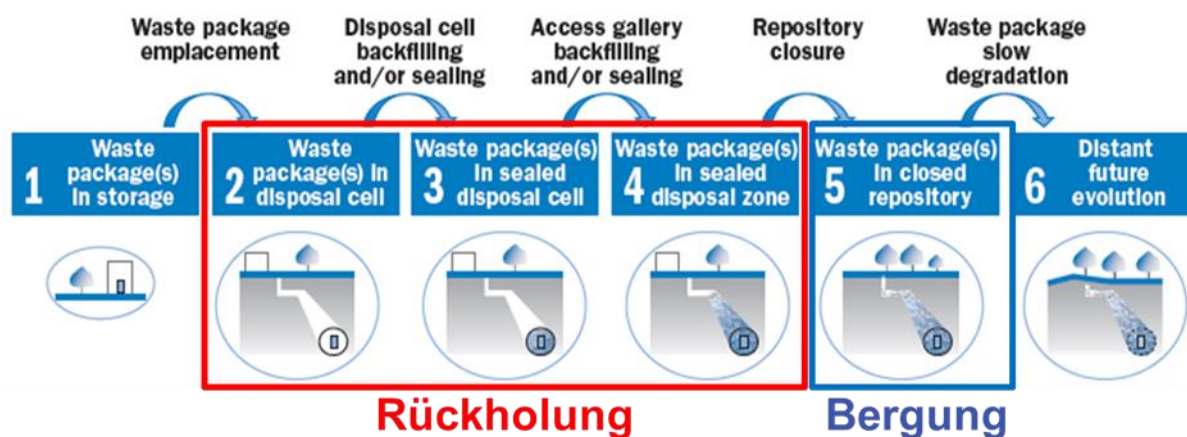


Abbildung 2-1: Typische Entwicklungsstufen eines Endlagers und Zuordnung der Rückholbarkeit und Bergung, nach (NEA, 2011)

Die Betriebsphase eines Endlagers für wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente wird in Deutschland auf mehrere Jahrzehnte abgeschätzt. Die genannten Entwicklungsstufen – Einlagerung, Versatz, Verschluss – finden entsprechend dem Einlagerungsfortschritt parallel statt. Die Endlagerbehälter werden zügig nach der Einlagerung versetzt. Die passive Sicherheit des Endlagers wird schrittweise erhöht. Die Endlagerbehälter befinden sich damit nicht mehr in der aktiven Kontrolle durch den Mensch. Dieses Vorgehen ist konform zu den Sicherheitsanforderungen des BMU. Eine schrittweise Umsetzung der Arbeitsschritte ist denkbar, würde aber nicht den bereits genannten Auslegungsanforderungen entsprechen und damit im Widerspruch zu den Sicherheitsanforderungen des BMU stehen.

Für die Gewährleistung einer Rückholbarkeit der Endlagerbehälter müssen Strategien entwickelt werden, die alle drei Entwicklungsstufen abdecken. Eine Rückholbarkeit ist nicht allein durch eine Offenhaltung der Einlagerungsbereiche gegeben, sondern muss auch die Entnahme der Endlagerbehälter 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 Anforderungen an die Rückholbarkeit wird ein als "Re-Mining"-Strategie bezeichnetes Vorgehen als geeigneter Lösungsansatz für die technische Umsetzung der Rückholung angesehen. Diese Strategie beinhaltet die Einlagerung der Endlagerbehälter, deren zeitnahen Versatz und den Verschluss der Grubenteile entsprechend dem Einlagerungsfortschritt. 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.

Die Re-Mining-Strategie bedingt für die Rückholung der Endlagerbehälter bei der Bohrloch- und Streckenlagerung eine Neuauffahrung aller benötigten Strecken. Die Rückholungstrecken werden bereits während der Auffahrung dem Kontrollbereich (KB) zugeordnet. In diesem Zuge werden auch die nachfolgenden Transport-/Abwetterstrecken dem KB zugeordnet. Querschnitt und Lage der neuen Rückholungstrecken müssen nicht den Strecken des Einlagerungsbetriebes entsprechen. Einzelne Bereiche der versetzten Strecken des KB werden jedoch von den Neuauffahrungen gekreuzt oder angeschnitten. Dabei können auch Neuauffahrungen des Überwachungsbereiches (ÜB) alte Grubengebäudeteile des KB aufschließen. Dies entspricht einem Öffnen der zuvor verschlossenen Teile des KB. Gemäß § 36 (StrISchV, 2017) würden diese Bereiche wieder dem KB zugeordnet werden. Beim Anschnitt ist zu prüfen, ob diese Bereiche durch die dort herrschende Ortsdosisleistung oder durch etwaige vorhandene Kontamination noch immer dem KB zuzuordnen sind. Kann durch Messungen gezeigt werden, dass diese Bereiche die Anforderungen an einen KB nicht erfüllen, gelten diese Bereiche als ÜB. Erfolgt dieser Nachweis nicht, sind die Strecken dem KB zuzuordnen.

Alle Materialien und Personen, die den KB verlassen, müssen freigemessen werden. Haufwerk, das aus dem KB in den ÜB überführt werden soll, muss gemäß § 44 (StrISchV, 2017) auf Kontamination hin geprüft und ggf. freigemessen werden. Ist eine Freimessung des Haufwerkes nicht möglich, so ist das Haufwerk als radioaktiver Abfall gesondert zu behandeln und zu entsorgen. Zur Freimessung des Haufwerkes können sogenannte Freimessanlagen verwendet werden. Diese sind Stand der Technik und werden in den Kernkraftwerken zur Freimessung von z. B. Bauschutt verwendet.

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





### 3 Rückholbarkeit bei der horizontalen Streckenlagerung im Salzgestein

Basierend auf dem Endlagerkonzept "Horizontale Streckenlagerung" und den dafür bestehenden Überlegungen zur Rückholung werden nachfolgend die Ergebnisse vertiefender Untersuchungen zur Rückholung zusammengefasst. Detaillierte Beschreibungen dazu sind im technischen Bericht "Technische Konzepte für die Rückholung der Einlagerungsvariante horizontale Streckenlagerung in Salzformationen" (BGE TEC, 2018a) zu finden. Die Untersuchungen umfassen neben dem Betriebsablauf und dem Rückholungsablauf auch das Automatisierungspotenzial bei der Rückholung und die Durchführung einer Betriebsstörungsanalyse sowie eine Beurteilung der Übertragbarkeit des gleislosen Transportes auf die Einlagerung. Des Weiteren werden die durchgeführten Arbeiten zur Berechnung der Standsicherheit der Rückholungsstrecken, das Bewetterungskonzept sowie die Klimavorausberechnungen und der Umgang mit den Brennelementstrukturteilen beschrieben. Abschließend werden die Arbeiten zum Verschluss und zum Umgang mit dem geräumten Endlager, sowie die Zeit- und Kostenschätzung zusammengefasst.

#### 3.1 Einlagerungskonzept

Das Einlagerungskonzept der Streckenlagerung sieht vor, die Endlagerbehälter direkt auf der Sohle der Einlagerungsstrecken eines Bergwerkes im Salzgestein abzulegen. Als Endlagerbehälter sind POLLUX<sup>®</sup>-10-Behälter für die ausgedienten Brennstäbe der Leistungsreaktoren, POLLUX<sup>®</sup>-9-Behälter für die Wiederaufarbeitungsabfälle, unterschiedliche CASTOR<sup>®</sup>-Behälter Typen für die ausgedienten Brennelemente/Brennstäbe der Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerke und Forschungsreaktoren sowie Gussbehälter Typ II (MOSAIK<sup>®</sup>-Behälter) für die Brennelementstrukturteile vorgesehen.

Im Rahmen der Vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) (GRS, 2012) wurde für den Standort Gorleben zur Umsetzung des Einlagerungskonzeptes Streckenlagerung das benötigte Grubengebäude zur Unterbringung aller Endlagerbehälter entworfen. Diese Planungen sollen als Referenz für die weiteren Untersuchungen dienen. Die Einlagerungssohle liegt in 870 m Teufe. Von einem zentralen Infrastrukturbereich zwischen Schacht 1 und 2 erschließen zwei Richtstrecken den Einlagerungsbereich in östlicher Richtung. Der Verlauf der Richtstrecken richtet sich, unter der Einhaltung von Sicherheitsabständen, nach den vorhandenen Salzstrukturen. Im Querschnitt der südlichen Richtstrecke sind Fahrwege und eine Bandanlage untergebracht. In der nördlichen Richtstrecke findet der Transport der Endlagerbehälter zwischen Schacht 2 und den Einlagerungsstrecken statt.

Zwischen den am nördlichen und südlichen Rand des Einlagerungsbereichs aufgefahrener Richtstrecken bilden zwölf Querschläge die Zugänge zu den Einlagerungsfeldern. Von jedem Querschlag zweigen mehrere maximal 250 m lange Einlagerungsstrecken als Blindstrecken ab. Innerhalb der Einlagerungsfelder sind die Einlagerungsstrecken für die POLLUX<sup>®</sup>-Behälter parallel in 36 m Abstand angeordnet. Nur in den Einlagerungsfeldern für die Brennelemente von Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie Forschungsreaktoren ist aufgrund der geringeren Wärmeleistung ein kleinerer Streckenabstand (mindestens 15,3 m) möglich.

In den Einlagerungstrecken werden die einzelnen Endlagerbehälter, geordnet nach Abfallarten, eingelagert. Die Einlagerung erfolgt im Rückbau, beginnend im schachtfürnsten Einlagerungsfeld. Die Einlagerung der Brennelementstrukturteile erfolgt in einer separaten Einlagerungskammer im schachtnahen Einlagerungsfeld.

Das Grubengebäude wird während der gesamten Betriebszeit einsöhlig über die vorhandenen Grubenbaue der Einlagerungssohle bewettert. Durch das gewählte Bewetterungskonzept entsteht im Grubengebäude eine rückläufige Wetterführung. Die frischen Wetter ziehen über den einziehenden Schacht (Schacht 1) der Doppelschachtanlage in das Grubengebäude und teilen sich im Infrastrukturbereich und den Einlagerungsfeldern. Aus den Regelungen des betrieblichen Strahlenschutzes ergibt sich für das Bewetterungskonzept die Anforderung, das Grubengebäude in die Strahlenschutzbereiche Überwachungs- (ÜB) und Kontrollbereich (KB) zu gliedern. Der Wetterstrom zieht über die Richtstrecke Süd durch den ÜB zu den Einlagerungsfeldern. Im ÜB werden alle bergbaulichen Tätigkeiten ausgeführt. Vor den aktiven Einlagerungstrecken wechselt der Wetterstrom in den KB. Der Übergang beider Strahlenschutzbereiche liegt im jeweiligen Einlagerungsquerschlag. Eine wetterdichte Trennung ist nicht vorgesehen; der gerichtete Wetterstrom und eine Absperrung ist als Abgrenzung ausreichend. Die Einlagerungstrecken werden mit einer Sonderbewetterung versorgt. Im KB zieht der Wetterstrom über die Richtstrecke Nord zurück zum Infrastrukturbereich und verlässt das Grubengebäude über den Schacht 2. Der beschriebene Wetterzug wird vom übertägig am Schacht 2 installierten Hauptgrubenlüfter erzeugt.

Die Einlagerung der Endlagerbehälter beginnt am Schacht 2 mit dem Transport nach unter Tage. Die Endlagerbehälter werden im Förderkorb auf einem Plateauwagen liegend nach unter Tage transportiert. Der untertägige Transport im Grubengebäude erfolgt gleisgebunden. Eine Batterielokomotive zieht den beladenen Plateauwagen über die Richtstrecke Nord und den jeweiligen Querschlag zur entsprechenden Einlagerungstrecke. Am Einlagerungsort steht die Einlagerungsvorrichtung in Strecken (ELVIS) zum Aufnehmen und Ablegen des Endlagerbehälters bereit. Mit Hilfe der Einlagerungsvorrichtung wird der am Einlagerungsort bereitgestellte POLLUX<sup>®</sup>-Behälter vom Plateauwagen abgehoben und nach Zurückziehen des Plateauwagens auf der Streckensohle abgelegt. Der Prototyp einer solchen Einlagerungsvorrichtung wurde im Rahmen des FuE-Programms zur Direkten Endlagerung ausgegliederter Brennelemente (DBE, 1995) geplant, gefertigt und im Dauereinsatz erfolgreich erprobt.

Direkt im Anschluss an die Einlagerung erfolgt der Versatz des Endlagerbehälters mit Salzgrus. Die Gleisanlagen und weitere Einbauten innerhalb der Einlagerungstrecken werden vor dem Versetzen schrittweise geraubt. Im laufenden Betrieb alterniert Einlagerung und Versatz immer zwischen zwei Einlagerungstrecken in einem Querschlag. Sind alle Einlagerungstrecken eines Querschlages mit Endlagerbehältern belegt und versetzt, wird das Einlagerungsfeld entsprechend dem Verschlusskonzept abgeworfen. Das bedeutet, dass im Rückbau die Einbauten der nicht mehr benötigten Querschläge und Richtstrecken geraubt und mit Salzgrus versetzt werden. In den Richtstrecken wird angefeuchteter Versatz eingebracht, um die Kompaktion des Versatzes zu beschleunigen. Nach Abschluss der Einlagerung aller Endlagerbehälter erfolgt in den Richtstrecken, zwischen Infrastrukturbereich und schachtnächstem Einlagerungsfeld, die Errichtung von Verschlussbauwerken.

### 3.2 Bestehendes Rückholungskonzept

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

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

Die Errichtung der eigentlichen Rückholungsstrecken und die Entnahme der Endlagerbehälter erfolgt in mehreren Teilschritten. Zunächst wird eine Teilstrecke parallel zu den eingelagerten Endlagerbehältern aufgefahren. Die Teilstrecke besitzt nur einen kleinen, für die Vortriebstechnik notwendigen, Querschnitt von rund 13 m<sup>2</sup>. Die Teilstrecke ist so angeordnet, dass zwischen Streckenkontur und den eingelagerten POLLUX<sup>®</sup>-Behältern ein Sicherheitsabstand von ca. 0,5 m verbleibt. Mit dem gewährten Sicherheitsabstand soll ein versehentliches Anschneiden der Endlagerbehälter während der Auffahrung vermieden werden. Im zweiten Schritt erfolgt auf der gegenüberliegenden Behälterseite die Auffahrung einer zweiten parallelen Teilstrecke. Die Auffahrung entspricht einer Spiegelung der ersten Teilstrecke in der Behälterlängsachse. Beide Teilstrecken sollen durchschlägig zu den angrenzenden Querschlägen aufgefahren werden. Damit wird die Kühlung- und Bewetterung der Teilstrecken nach deren Errichtung erleichtert. Das Sohlenniveau beider Teilstrecken liegt planmäßig unterhalb der Behälterauflagefläche. In der endgültigen Rückholungsstrecke liegt der Endlagerbehälter somit auf einem Salzgesteinssockel in leicht erhöhter Position. Dies erleichtert die Aufnahme der Endlagerbehälter durch eine modifizierte Einlagerungsvorrichtung (mELVIS). Durch die Entnahme des verbleibenden Salzes und Salzgruses neben und über dem Endlagerbehälter zwischen beiden Teilstrecken entsteht die endgültige Kontur der Rückholungsstrecke.

### 3.3 Vertiefende Untersuchungen zum Rückholungskonzept

#### 3.3.1 Aus- und Vorrichtung – Betriebsablauf und Technik

Die Anforderungen an eine gebirgsschonende Auffahrung und eine Minimierung der Durchörterung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (ewG) (BMU 2010) sind bei der Rückholung nicht mehr zwingend zu beachten. Das Grubengebäude kann somit an die Erfordernisse des Rückholungsbetriebes angepasst werden. Konkret bedeutet dies die Einführung einer zusätzlichen nördlichen Richtstrecke, vgl. Abbildung 3-1.

Die Auffahrung der beiden nördlichen Richtstrecken erfolgt mittels Teilschnittmaschinen (TSM) parallel zu beiden Seiten der Einlagerungsfelder und orientiert sich an den früheren Richtstrecken des Einlagerungsbetriebes. Die beiden Richtstrecken sind in regelmäßigen Abständen miteinander verbunden. Die südliche Richtstrecke wird parallel zur nördlichen errichtet. Von ihr aus werden Querschläge aufgefahren, die die nördlichen und die südliche Richtstrecke miteinander verbinden. Jedes Einlagerungsfeld wird von zwei Querschlägen eingefasst.

Die beiden nördlichen Richtstrecken und die Querschläge im Einlagerungsbetrieb sind dem KB zugeordnet. Bei einem erneuten Auffahren der Richtstrecken, der Querschläge oder anderen Teile, die dem KB zugeordnet waren, sind diese automatisch wieder KB. Es sei denn, diese Bereiche wurden vor dem Verschluss freigemessen. Bisläng zählt das Freimessen, welches eine rückholungserleichternde Maßnahme darstellt, noch nicht zum Einlagerungskonzept.

Die Auffahrung der eigentlichen Rückholungsstrecken und die Rückholungstätigkeit selbst können beginnen, sobald die ersten Einlagerungsfelder durch die Richtstrecken und Querschläge erschlossen sind. Die Rückholung beginnt anders als bei der Einlagerung in den schachtnahen Einlagerungsfeldern.

Sobald die Rückholungsstrecken aufgefahren werden, wird der untertägige Bereich des Endlagers gemäß § 36 (StrlSchV, 2017) in Überwachungs- und Kontrollbereiche unterteilt. Zur Gewährleistung der Anforderungen des § 44 (StrlSchV, 2017) an eine Kontaminationskontrolle beim Verlassen des KB für Personen und Gegenstände werden in den Übergängen zwischen KB und ÜB zwischen den Querschlägen der Einlagerungsfelder und der südlichen Richtstrecke wetterdurchlässige Absperrungen und Tore eingebaut, die weder für Mensch noch für Sachgüter im Normalfall genutzt werden können. Ein regulärer Übergang zwischen KB und ÜB ist im Infrastrukturbereich vorgesehen. Dort sind entsprechende Schleusen und Monitore aufzustellen.

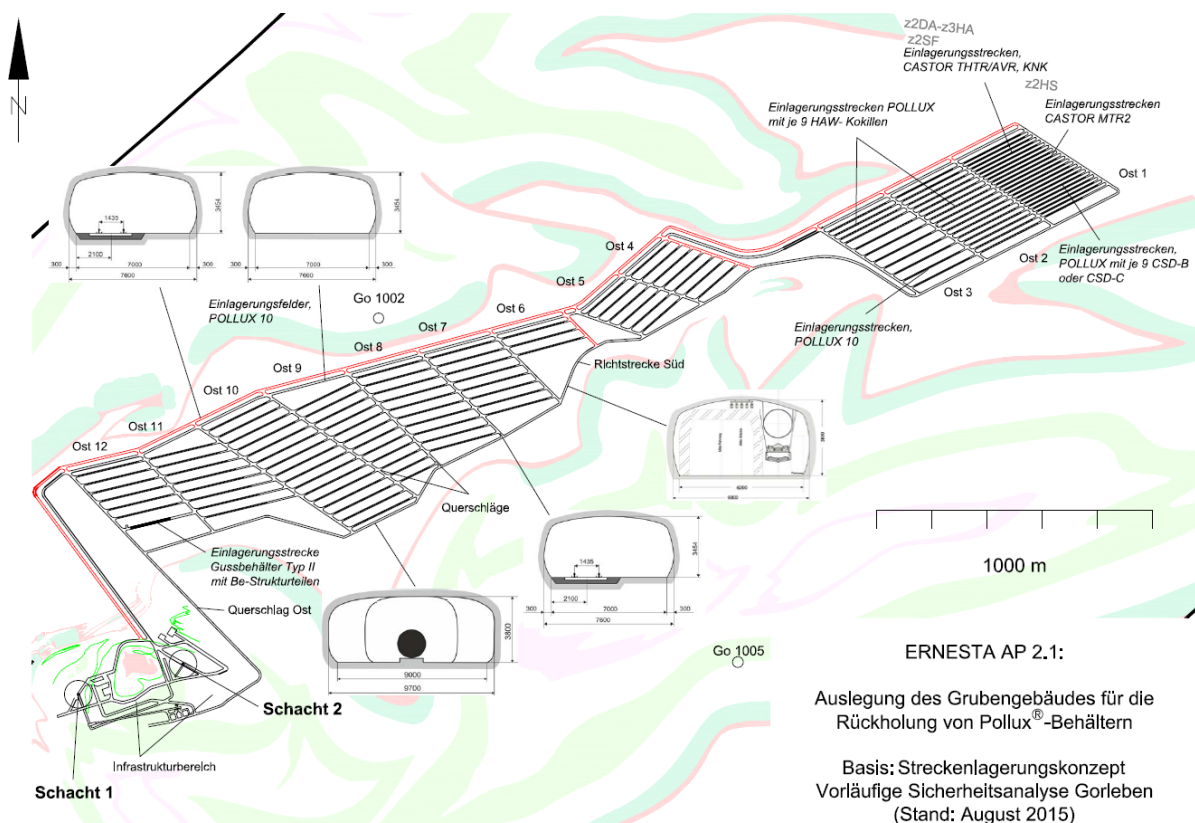


Abbildung 3-1: Grubengebäude nach (GRS, 2012) im möglichen Rückholungsbetrieb

### 3.3.2 Lagebestimmung der Endlagerbehälter

Gemäß den Anforderungen aus dem Bundesberggesetz (BBergG 2015), der "Verordnung über markscheiderische Arbeiten und Beobachtungen der Oberfläche"(MarkSchBergV) und den Sicherheitsanforderungen des BMU (BMU 2010) kann angenommen werden, dass die exakte Lage der Endlagerbehälter bei der Einlagerung bzw. vor dem Versatz bekannt ist. Dennoch sind geringfügige Lageveränderungen der Endlagerbehälter bis zur Rückholung möglich. Deshalb ist vor der Auffahrung der Rückholungsstrecken eine vorausseilende Erkundung der Lagedaten durchzuführen. Zur Detektion der Endlagerbehälter können mehrere geophysikalische Messmethoden verwendet werden. Zu diesen zählen akustische Messverfahren oder elektromagnetische Verfahren (Radarmessung). Aufgrund der zügigen Durchführbarkeit der Messungen und der vorhandenen, ausgereiften Messtechnik empfiehlt sich die Ortung der Endlagerbehälter mittels Radarmessungen.

### 3.3.3 Auffahrung der Rückholungsstrecke

Die Auffahrung der Teilstrecken für die Rückholung erfolgt mittels leichter Teilschnittmaschinen. In einem Querschlag findet immer nur ein Vortrieb statt. Aufgrund der hohen thermischen Belastung ist die Schneidleistung begrenzt und es müssen hinreichende Kühlzeiten beachtet werden. Die für den Vortrieb notwendige Infrastruktur (Kühlanlage und Entstaubung) wird im Querschlag errichtet und kann für die Auffahrung der Teilstrecken und für den Rückbau des Pfeilers genutzt werden. Die Vortriebe der Teilstrecken werden sonderbewertet. Nach dem Durchschlag der Teilstrecke wird diese durchgängig bewettert, um das um-

gebende Gebirge stetig weiter zu kühlen. Nach dem Auffahren der ersten Teilstrecke wird die zweite Strecke in gleicher Vertriebsrichtung aufgefahren. Das Haufwerk wird mittels Fahrer von der Ortsbrust über den Querschlag bis zur Kippstelle der Bandanlage in der Richtstrecke gefördert.

Nachdem die beiden Teilstrecken aufgefahren sind, wird der Pfeiler zwischen den Endlagerbehältern, der zum Teil aus gewachsenem Steinsalz und zum Teil aus Versatz besteht, bis 0,5 m an den Endlagerbehälter heran mittels einer Teilschnittmaschine aufgefahren. Soweit das Schneidprofil der TSM dazu geeignet ist, wird auch der Firstbereich über den Endlagerbehälter frei geschnitten. Die Sohle wird bis auf das Niveau der Teilstrecken geschnitten. Danach wird der verbleibende Pfeiler um den Endlagerbehälter mittels eines fernbedienten Abbruchroboters entfernt. Der Manipulatorarm des Abbruchroboters kann über Schnellwechsellvorrichtungen mit verschiedenen Werkzeugen ausgestattet werden, so dass der Endlagerbehälter komplett frei gelegt und gesäubert werden kann.

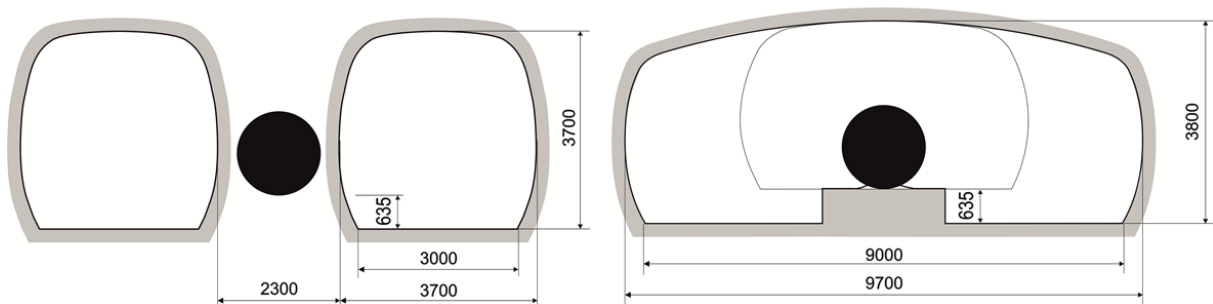


Abbildung 3-2: links: Querschnitte der beiden Teilstrecken, rechts: Endgültiges Profil der Rückholungsstrecke und Querschnitt der Einlagerungsstrecke

### 3.3.4 Entnahme der Endlagerbehälter

Die Neukonstruktion der modifizierten Einlagerungsvorrichtung in Strecken (mELVIS) basiert auf dem existierenden und bereits erprobten Prototyp der Einlagerungsvorrichtung in Strecken (ELVIS). Die elektro-mechanische Vorrichtung wurde an die Erfordernisse der Rückholung von Endlagerbehältern mit radioaktivem Inhalt aus einem Bergwerk im Steinsalz angepasst. Die Hauptkomponenten der Rückholungsvorrichtung sind:

- der starre Grundrahmen mit vier Stempeln als Hubeinrichtung
- eine Rahmenkonstruktion zum Aufnehmen, Halten und Tragen von Endlagerbehältern sowie für deren Übergabe auf einen Transportwagen mit Lasten von bis zu 65 t (keine Nutzung der Tragzapfen)
- ein Steuerstand
- Raupenfahrwerke

Die Rückholungsvorrichtung muss kompakt gebaut sein, um untertage in dem Streckenquerschnitt der Rückholungsstrecken effektiv eingesetzt werden zu können. Sie ist über kurze Distanzen selbstfahrend und kann so den Transport der Endlagerbehälter bis zum Übergabepunkt auf den Transportwagen realisieren. Eine Positionsüberwachung des Endlagerbe-

hälters ist erforderlich. Zudem werden die Antriebe mit Positionsmesseinrichtungen versehen. Beim Lenken ist ein Nachfahren des Spindelhubtriebes erforderlich, um ein Heben oder Senken durch die Drehung der Hubsäule gegenüber der Gewindespindel beim Lenken zu vermeiden. Der Entwurf der Konstruktion erfolgt mit dem Ziel größtmöglicher Zuverlässigkeit der mELVIS. Hierzu wird ein einfacher Aufbau der Struktur mit einer auf das Notwendigste reduzierten Zahl von beweglichen Elementen angestrebt. Dort, wo bewegliche Komponenten erforderlich sind, wird angestrebt, bewährte Serienbauteile zu verwenden. Abbildung 3-3 veranschaulicht die Konstruktion. Die wesentlichen geometrischen Kenndaten sind in Tabelle 3-1, vergleichend zum bestehenden Prototyp ELVIS, zusammengefasst.

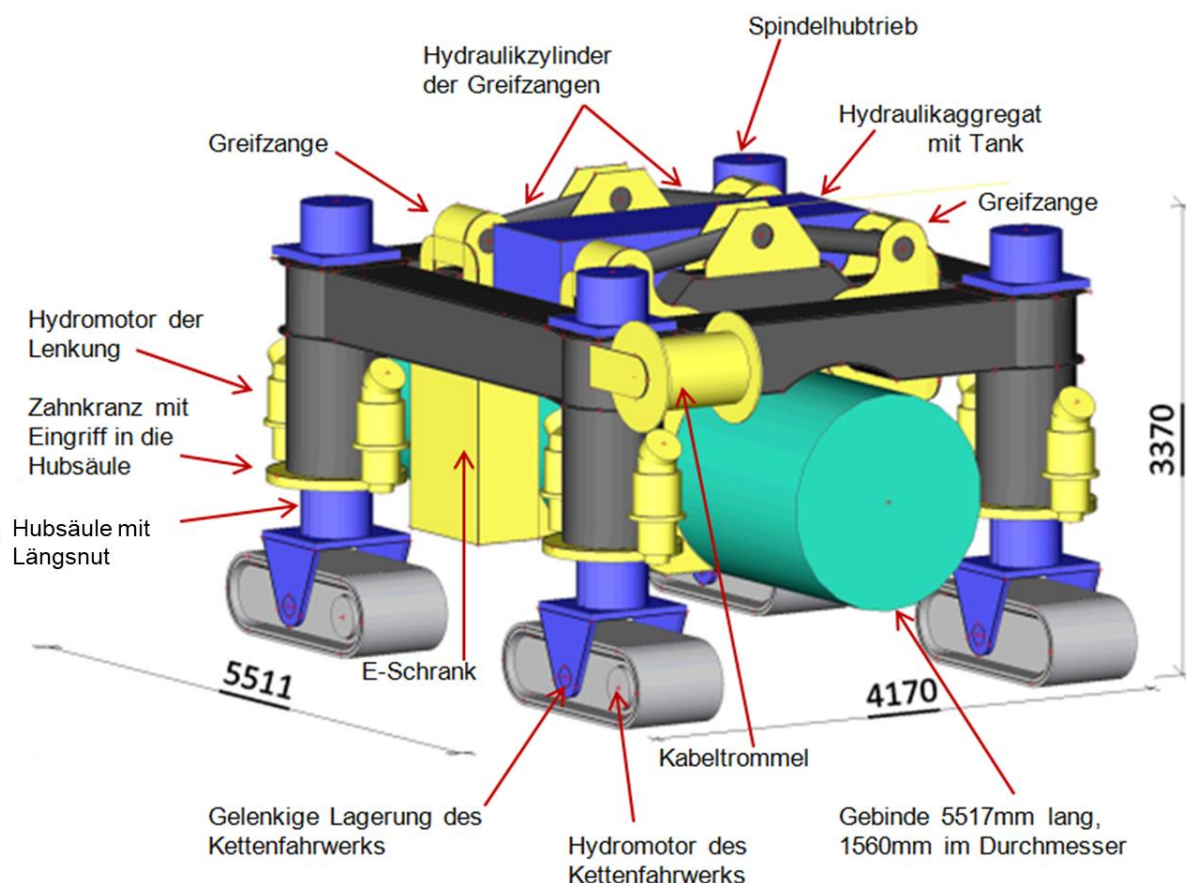


Abbildung 3-3: Darstellung mELVIS im angehobenen Zustand mit Endlagerbehälter

Tabelle 3-1: Abmessungen und Gewicht der modifizierten Einlagerungsvorrichtung in Strecken im Vergleich zum bestehenden Prototyp (ELVIS)

		Einheit	mELVIS	ELVIS (GRS, 2011a)
Länge		mm	5511	6400 (Deichsel angehoben)
Breite		mm	4170	3200
Höhe	maximal	mm	3370	3290
	minimal	mm	3063	2500 (bei Transport)
Hubweg		mm	207	1120
Tiefste Ablageposition über Sohle		mm	400	0
Eigengewicht		t	60	15,2

Jedes der vier Kettenfahrwerke wird separat angetrieben. Die Zielgeschwindigkeit beträgt 0,5 m/s. Die maximal erreichbare Schubkraft der Kettenfahrwerke soll die Vorrichtung in die Lage versetzen, punktuell kleine Hindernisse mit reduzierter Geschwindigkeit überfahren zu können. Im Regelfahrbereich, in dem die Zielgeschwindigkeit erreicht wird, soll die erforderliche Schubkraft deutlich geringer sein als die maximale Schubkraft.

Die mELVIS wird manuell unter Sichtkontrolle mittels Kamera bis ca. 2 m an die Endlagerbehälter herangefahren und die Greifzangen geöffnet. Hier findet ein Umschalten von manueller Steuerung auf automatische Steuerung statt. Sensoren erfassen die Position der mELVIS gegenüber dem Endlagerbehälter und ermöglichen eine Steuerung der Fahrtriebe, der Lenkung und der Spindelhubtriebe. Nachdem die Greifzangen abgesenkt wurden, erfolgt ein Greifen des Endlagerbehälters mittels der Hydraulikzylinder der Zangen. Das Anheben der Endlagerbehälter erfolgt über die vier Spindelhubtriebe in den Eckstützen des Tragrahmens. Jeder Spindelhubtrieb verfügt über einen Elektroantrieb mit mechanischem Getriebe.

Zur Energieversorgung der mELVIS werden in den Querschlägen vorhandene Stromanschlüsse genutzt. Die Stromverbindung soll steckbar sein und ein leichtes Umstecken beim Fahren längerer Wege ermöglichen. Die mELVIS verfügt über eine angetriebene Trommel mit Spulhilfe, mit deren Hilfe die benötigten, beim Fahren variierenden, Kabellängen zur Verfügung gestellt werden. Der maximale Abstand zwischen Querschlag und freigelegtem Endlagerbehälter beträgt ca. 250 m.

Die mELVIS wird manuell unter Sichtkontrolle mittels Kamera von der Rückholungsstrecke zum Querschlag gefahren und in Längsrichtung des Querschlags ausgerichtet. Innerhalb des Querschlags wird eine feste Übergabestelle errichtet, an die alle Endlagerbehälter des angeschlossenen Einlagerungsfeldes übergeben werden. Hier erfolgt wieder eine Umschaltung von manueller Steuerung zu automatischer Steuerung. Die mELVIS kann durch Sensoren die Position des Plateauwagens erfassen und durch Steuerung von Fahrwerken, Lenkung, Spindelhubtrieben und einzelner Ansteuerung der Hydraulikzylinder der Greifzangen die Übergabeposition anfahren. Hier muss sich die mELVIS an dem Plateauwagen bzw. an den Schienen ausrichten. Dabei wird die relative Position des Plateauwagens gegenüber der mELVIS erfasst und kontrolliert. Danach wird durch Senken des Tragrahmens der Endlagerbehälter auf dem Plateauwagen abgelegt. Die mELVIS setzt den Endlagerbehälter in die Schalensegmente des Plateauwagens. Im Anschluss fahren die Greifzangen soweit seitlich zurück, dass der Plateauwagen kollisionsfrei unter der mELVIS herausgezogen bzw. die Vorrichtung von dem Plateauwagen heruntergefahren werden kann.

Die Gleise werden innerhalb des Querschlags nur bis an die Übergabestelle errichtet. Die Übergabestelle befindet sich zwischen dem Streckenkreuz Querschlag/Richtstrecke und der ersten Einlagerungsstrecke. Das Gleisende ist entsprechend mit einem Bremsprellbock oder Gleisschuhen zu sichern.



### 3.3.5 Transport vom Rückholungsort zum Schacht

Der Transport der Endlagerbehälter zum Schacht erfolgt gleisgebunden mittels Batterielokomotive und Plateauwagen. Der für die Einlagerung genutzte Plateauwagen kann nicht genutzt werden, da die Greifzangen der mELVIS ein Ablegen der Endlagerbehälter auf diesen Plateauwagen verhindern. Es wurde aus diesem Grund ein neuer Plateauwagen entworfen. Dieser Plateauwagen besteht im Wesentlichen aus den Baugruppen Oberwagen und Fahrwerken. Der Oberwagen wird zur Aufnahme des Endlagerbehälters mit einer festen Schale ausgestattet, die inklusive einer Toleranz nicht breiter ist als der größte Abstand der Spitzen der Greifzangen der mELVIS. Der Oberwagen bzw. die Auflageschale muss so gestaltet sein, dass die Endlagerbehälter darin geometrisch gehalten werden und nicht verrutschen können. Die feste Schale nimmt die Gewichtskraft des Endlagerbehälters auf. Die Tragzapfen sollen nicht als Anschlagmittel genutzt werden. Der Oberwagen des Plateauwagens ist durch eine geteilte Tragschale gekennzeichnet, siehe Abbildung 3-4.

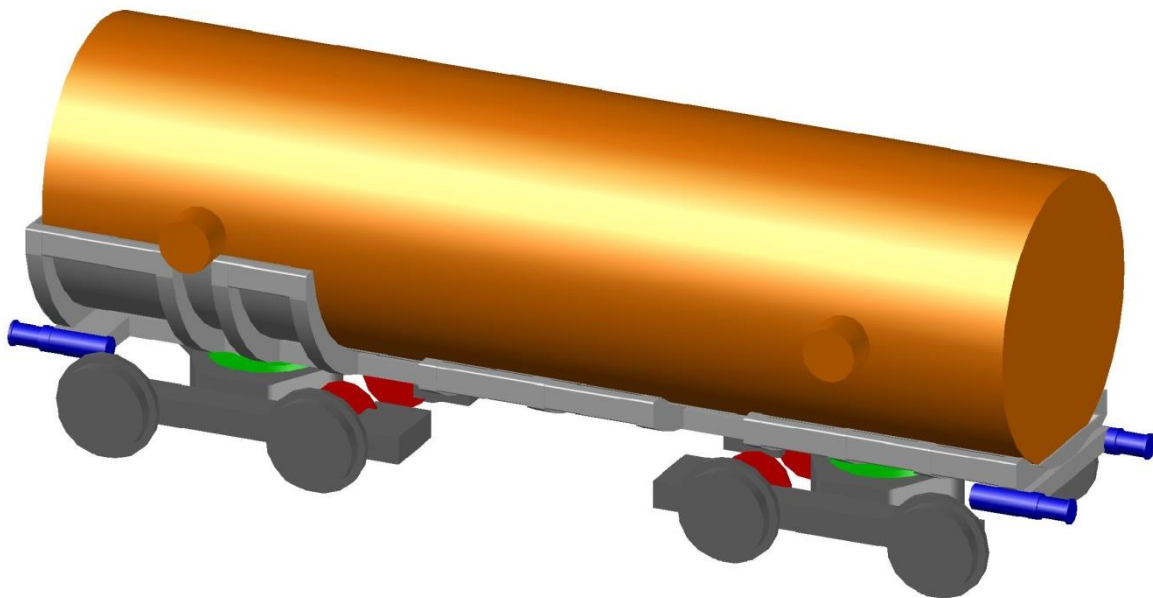


Abbildung 3-4: Konzept Plateauwagen für mELVIS, beladen

Die Fahrwerke basieren auf dem bereits erprobten Prototyp des Plateauwagens für den Transferbehälter für Brennstabkokillen (DBE TEC, 2010a) und sind an die Spurweite 1.435 mm angepasst.

### 3.3.6 Automatisierung

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

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

Im bergtechnischen Bereich ist zu erkennen, dass auch bei Vollautomatisierung der Vortriebsmaschinen dennoch immer wieder manuelle Arbeiten auftreten, die sich nach Stand von Wissenschaft und Technik nicht automatisieren lassen. Beispielhaft sind hier Nebenarbeiten, wie die Installation der Sonderbewetterung, zu nennen. Dies dürfte ein wesentlicher Grund sein, warum Vollautomatisierung einzelner Maschinen nur in wenigen Fällen im Bergbau zum Einsatz kommt, obwohl sie rein technisch für die meisten Maschinen machbar erscheint. Zweck der Automatisierung im Streckenvortrieb muss demnach die Minimierung der Aufenthaltszeit von Personal in den heißen Bereichen sein. Dies gelingt u. a. durch das Bereitstellen von klimatisierten Fahrerkabinen, die der Geräteführer nur für wenige Arbeiten außerhalb seines Fahrzeugs verlassen muss.

Im Umfeld der Endlagerbehälter sind vergleichbare manuelle Arbeiten, die den Wert einer Vollautomatisierung mindern, kaum notwendig. Zusätzlich sind die einzelnen Arbeitsschritte in der Handhabung dieser Endlagerbehälter sehr klar definierbar und damit gut zu automatisieren. Für viele der beteiligten Maschinen existiert nach Stand der Technik die Möglichkeit der Fernsteuerung. Demnach wäre ein nächster sinnvoller Schritt die Weiterentwicklung zur Teleoperation dieser Maschinen von einem Steuerstand über Tage aus. Zusätzlich bedürfen die Schnittstellen zwischen den Handhabungsschritten des Behältertransportes einer besonderen Beachtung. Eine Betriebsüberwachung, die alle wesentlichen Prozesse unter Tage gleichzeitig im Blick behalten kann, dient gleichzeitig der besseren Kontrolle über diese Abläufe und der Betriebssicherheit/ dem Strahlenschutz. Die genannten Aspekte sind auch auf ein Einlagerungsbergwerk und die Tagesanlagen übertragbar.

### 3.3.7 Betriebsstörungsanalyse

Zur Identifizierung möglicher Ereignisse beim Rückholungs- bzw. beim Einlagerungsprozess, die sich aus dem Versagen einzelner Komponenten oder Bauteilen ergeben können und in deren Folge es zu potenziellen Auswirkungen in funktionaler Hinsicht auf das aus POLLUX®-Behälter, Plateauwagen und mELVIS bestehende Gesamtsystem sowie zu radiologischen Konsequenzen für das Betriebspersonal kommen kann, wurde eine Betriebsstörungsanalyse durchgeführt. Diese Betriebsstörungsanalyse wurde in Anlehnung an die FMEA "Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse" durchgeführt. Hierbei wurden die einzelnen Komponenten entsprechend ihrer Funktion auf mögliche Störungen während des Betriebsablaufes hin un-

tersucht. Den einzelnen Komponenten wurden potenzielle Ausfallursachen zugeordnet. Entsprechend der Ursache wurden die möglichen Folgen der Betriebsstörung abgeschätzt. Die gefundenen Betriebsstörungen können entsprechend den zu erwartenden Folgen in charakteristische Gruppen zusammengefasst werden. Den einzelnen Betriebsstörungen konnten außerdem wirksame Gegenmaßnahmen zur Vermeidung, Eingrenzung oder Behebung der Störung zugeordnet werden. Diese Erkenntnisse können für eine weitere Auslegung und Optimierung der mELVIS genutzt werden. Da bei der Betriebsstörungsanalyse die Komponenten untersucht werden, sind hier die Betriebsabläufe der Einlagerung identisch mit denen der Rückholung, nur in umgekehrter Reihenfolge.

Das Ergebnis der Betriebsstörungsanalyse zeigt, dass die Sperrung der Hydraulikzylinder der Greifzangen nicht nur hydraulisch erfolgen sollte. Eine zusätzliche mechanische Verriegelung sollte integriert werden, damit es auf keinen Fall zum unkontrollierten Öffnen der Greifzangen kommt und der Endlagerbehälter abstürzt. Bei der weiteren Auslegung der mELVIS sind die Sensoren und Kameras für die automatische und manuelle Fahrt weiter zu konstruieren. Sie sind wichtig, um Unfälle und damit mechanische Einwirkungen auf den mELVIS und den Endlagerbehälter zu verhindern. Bei Ausfällen von Sensoren bzw. Kameras ist der mELVIS sofort stillzusetzen. Bei einigen Komponenten, z. B. dem Kettenfahrwerk, ist eine einfache und schnelle Reparatur bzw. ein Austausch wichtig, um die Strahlenexposition des Betriebspersonals zu reduzieren. Hier ist eine modulartige Bauweise anzustreben.

Insgesamt wurden bei der Betriebsstörungsanalyse keine Störungen festgestellt, die eine gleislose Rückholung bzw. mögliche gleislose Einlagerung der Endlagerbehälter ausschließen. Es wird davon ausgegangen, dass die Vorschläge zu Gegenmaßnahmen in weiteren konkretisierenden Schritten der Planung umgesetzt werden können. Mit der Umsetzung dieser Vorschläge wird sich auch die Bewertung der Störungen z. T. verändern.

### **3.3.8 Übertragung der mELVIS auf die Einlagerung**

Eine Nutzung der mELVIS im Einlagerungsbetrieb ist grundsätzlich möglich. Aufgrund ihrer Größe müssen die Querschnitte vergrößert werden. Des Weiteren muss entweder ein Sockel zur Ablage der Endlagerbehälter in den Einlagerungsstrecken geschaffen werden oder aber die Konstruktion der mELVIS verändert werden, so dass diese den Endlagerbehälter auf der Sohle ablegt. Beide Möglichkeiten können umgesetzt werden.

### 3.4 Thermomechanische Berechnungen zur Rückholungsstrecke

Die Simulation der Einlagerung von Endlagerbehältern für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente verdeutlicht den Wärmeeintrag ins Gebirge. Die Ergebnisse sind mit den Berechnungen aus (GRS, 2012) vergleichbar. Unterschiede ergeben sich allein aus veränderten Randbedingungen (bspw. längere Zwischenlagerzeit). Im Bereich der geplanten Teilstrecken herrschen zum Rückholungszeitpunkt (ca. 45 Jahre nach Beginn der Einlagerung) Temperaturen von ca. 150 bis 120°C. Aufgrund der thermischen Expansion ist am Endlagerbehälter eine vertikale Verschiebung von bis zu 0,8 m in einem Zeitraum von ca. 40 Jahren zu erwarten. Diese Verschiebung muss durch die Erkundung vor der Wiederauffahrung validiert und bei der Auffahrung der Teilstrecken berücksichtigt werden.

Nach Auffahrung der Teilquerschnitte der Rückholungstrecke zeigt die Auswertung des Bruchkriteriums im Modell eine Auslastung von bis zu 80%. Die maximal beanspruchten Bereiche befinden sich unmittelbar an der Kontur der aufgefahrenen Teilquerschnitte. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Rückholquerschnitt standsicher ist. Aufgrund einer Tragreserve von 20% und des Abbaus von Spannungsspitzen infolge des Kriechens ist keine Verankerung der Strecke vorzusehen.

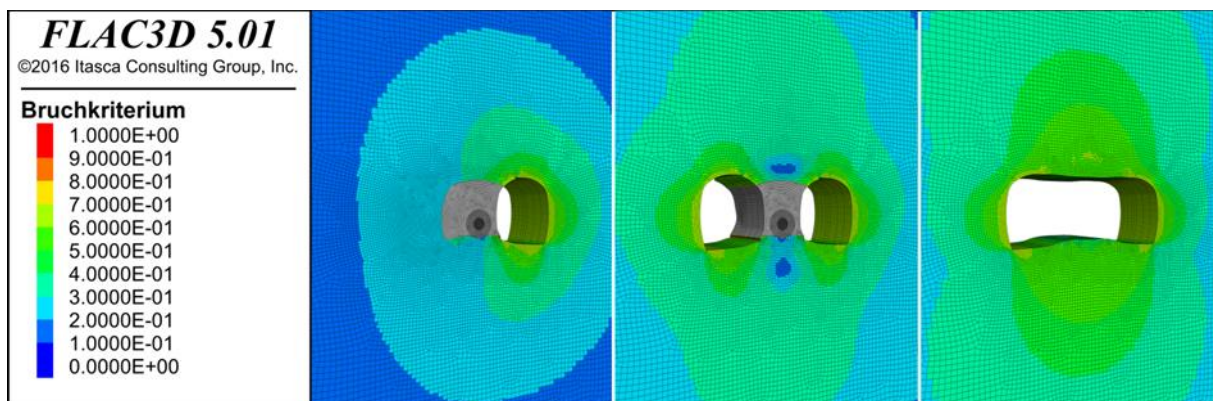


Abbildung 3-5: Auswertung des Kurzzeitfestigkeitskriteriums im Modell

Außerdem sind sehr hohe Konvergenzraten zu erwarten, die einen regelmäßigen Nachschnitt der Teilstrecken erfordern. Die Summe dieser Effekte führt zu einer Reduzierung der Vortriebsleistung auf weniger als 40%, was einer Verdopplung der Vortriebsdauer entspricht. Für die Auffahrung der zweiten Teilstrecke mit noch größeren Konvergenzraten und größeren Schädigungen sinkt die theoretische Vortriebsleistung weiter. Damit wird der Vortrieb der Teilstrecken praktisch nicht umsetzbar. Die zu erwartenden hohen Konvergenzen und die daraus resultierende drastische Minderung der Vortriebsleistung erfordern eine Anpassung der Endlagerkonfiguration, um die technische Machbarkeit einer Rückholung von POLLUX®-Behältern aus den Einlagerungstrecken zu gewährleisten. Dafür wurden thermische und mechanische Optimierungen der Endlagerauslegung durchgeführt.

Bei der thermischen Optimierung wurde die maximal erreichte Temperatur für unterschiedliche Streckenabstände und Beladungen berechnet. Für Streckenabstände größer 40 m steigt

die Temperatur am Auslegungspunkt (am Aufpunkt des Endlagerbehälters) unabhängig von der Beladung nicht mehr an. Unter dieser Grenze steigt die Temperatur überproportional mit dem Streckenabstand an. Dies deutet auf thermische Überlagerungseffekte hin. Am zweiten Auswertepunkt an der Kontur der Rückholungsstrecke ist der Einfluss der Beladung und des Streckenabstandes auf die errechnete Temperatur bemerkbar. Die Beladung bleibt der sensitivste Parameter.

Basierend auf den Ergebnissen der thermischen Optimierung und der Wettersimulation wurden verschiedenen Endlagerkonfigurationen für weitere mechanische Analysen ausgewählt. Endlager mit Streckenabständen 40 m, 44 m und 50 m bei einer fixen Beladung von zehn Brennelementen sowie eine Konfiguration mit 4,5 Brennelementen und 36 m Streckenabstand standen im Fokus der mechanischen Optimierung. Letztere Konfiguration wurde für ein Endlager bei einem thermischen Auslegungskriterium von 100°C gewählt.

Ziel der mechanischen Analyse ist die Bestimmung der zu erwartenden Konvergenzen in der Rückholungsstrecke. Die Konvergenzen nehmen mit größer werdenden Streckenabständen ab. Nach 180 Tagen sind jeweils 90 cm, 65 cm und ca. 50 cm bei Streckenabständen von 40 m, 44 m und 50 m zu erwarten. Im Referenzszenario wurden Konvergenzen von 110 cm nach 140 Tagen ermittelt. Bei der 100°C-Konfiguration liegen die Konvergenzen bei 20 cm. Die Ergebnisse deuten an, dass bei optimierter Endlagerauslegung die Teil- und Rückholungsstrecken mit einem bergmännisch vertretbaren Aufwand errichtet werden können. Dies bedeutet eine Vergrößerung des Streckenabstands oder eine Reduzierung der Beladung.

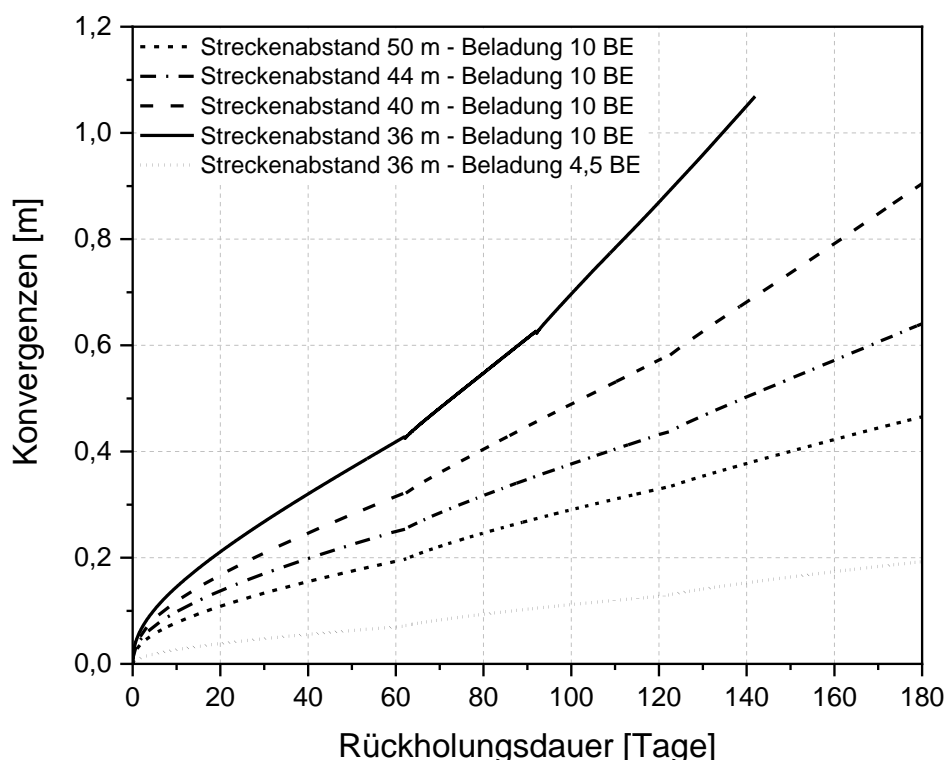


Abbildung 3-6: Konvergenzentwicklung über die Rückholungsdauer für verschiedene Endlagerkonfigurationen

### 3.5 Bewetterung und Klimavorausberechnung

#### 3.5.1 Bewetterung

Das Prinzip einer einsöhligen Bewetterung soll auch während der Rückholung der eingelagerten POLLUX<sup>®</sup>-Behälter angewendet werden. Der Aufbau der Bewetterung unterscheidet sich vom Einlagerungsbetrieb durch ein verändertes Grubengebäude und die deutlich unterschiedlichen Umgebungsbedingungen. Sicherheitsabstände müssen während der Rückholung nicht nach den Gesichtspunkten der Langzeitsicherheit gewählt werden. Einzuhaltende Mindestabstände werden entsprechend den bergbehördlichen Vorgaben durch andere Grubenteile, den Salzflanken oder auch den Schächten bestimmt. Die Auffahrung zusätzlicher Strecken kann den nutzbaren Wetterstrom vergrößern und so zu günstigeren klimatischen Bedingungen unter Tage führen. Dies ist besonders mit Blick auf den zusätzlichen Wärmeintrag aus den eingelagerten wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen wichtig.

Für die Rückholung wird das Grubengebäude deshalb um eine dritte Zugangs- bzw. Hauptstrecke erweitert (siehe Abbildung 3-7). Im Norden des Grubengebäudes entsteht damit eine neue Doppelstrecke. Die neue Hauptstrecke und die südliche Richtstrecke dienen als Frischwetterstrecken. Die Strecken liegen in den kühleren Randbereichen des Grubengebäudes. Alle wesentlichen Transportvorgänge werden über diese beiden Strecken realisiert.

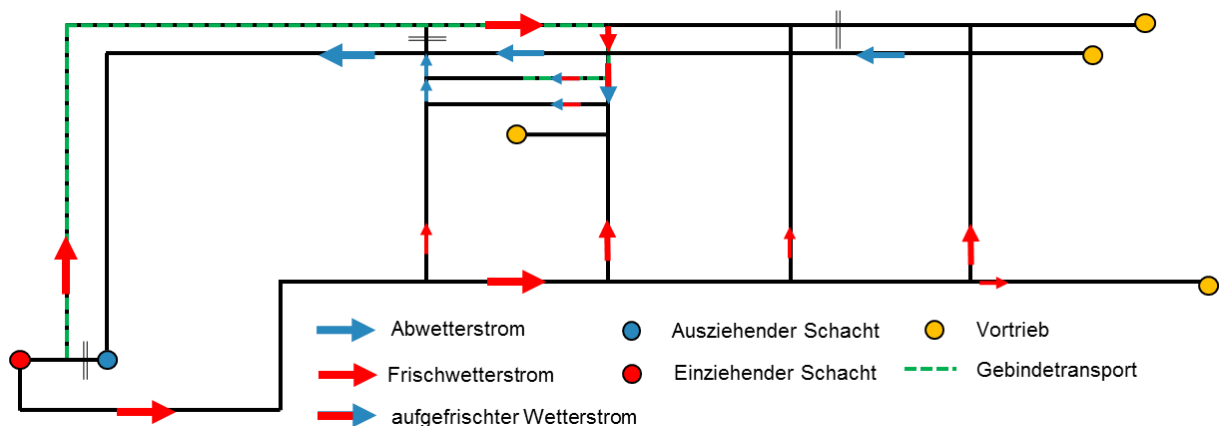


Abbildung 3-7: Bewetterungsschema während der Rückholung

Der Abwetterstrom wird in der zweiten Strecke der nördlichen Doppelstrecke gesammelt. Der nutzbare Volumenstrom wird durch den Streckenquerschnitt und die zulässige Wettergeschwindigkeit von maximal 6 m/s in regelmäßig befahrenen Strecken begrenzt. In der nördlichen Richtstrecke werden die Teilströme der Abwetter gesammelt und zum ausziehenden Schacht geleitet. Zwischen dem schachtnächsten Querschlag und dem ausziehenden Schacht werden so alle Wetter in dieser Strecke gefasst. Dieser Streckenabschnitt ist als reine Abwetterstrecke vorgesehen und dementsprechend können hier auch höhere Wettergeschwindigkeiten realisiert werden. Jedes Einlagerungsfeld ist während der Rückholung von den Hauptstrecken und zwei Querschlägen umfasst. Der Gesamtwetterstrom ist durch entsprechende Wetterbauwerke (Wettertüren, Schleusen etc.) zu steuern. Die Auffah-

lungstätigkeiten und der eigentliche Rückholungsvorgang werden jeweils vom schachtfernen Querschlag aus realisiert. Über diesen Querschlag wird auch die Frischwetterversorgung der Betriebspunkte gewährleistet. Die Sonderbewetterung der Teilstreckenvortriebe erfolgt ebenfalls aus diesem Querschlag heraus. Die gewählte Wetterführung verlängert zwar die Wetterwege, erlaubt aber die Versorgung der Rückholungsstrecken von beiden Zugangsstrecken aus mit frischen bzw. aufgefrischten Wettern. Alle Abwetter der Betriebspunkte werden im schachtnahen Querschlag gesammelt und der Abwetterstrecke zugeführt.

Anders als im Einlagerungsbetrieb werden während der Rückholung über beide Strahlenschutzbereiche Frischwetter ins Grubengebäude geführt, siehe Abbildung 3-8. Die äußere nördliche Zugangsstrecke führt einen Teil der Frischwetter zu den Einlagerungsbereichen und dient gleichzeitig als (Behälter-)Transportstrecke. Der Frischwetterstrom dieser Strecke wird zu großen Teilen in den aktiven Rückholungsquerschlag geleitet. Vom Infrastrukturbereich bis zu diesem Querschlag sind die Doppelstrecken durch Wetterschleusen getrennt. Beim Eintritt in den Querschlag kreuzen die Wetter die innere Zugangsstrecke (Abwetter-sammelstrecke). Dabei vermischen sich die Frischwetter mit dem Abwetterstrom des ÜB. Am Querschlag liegt somit ein aufgefrischter Wetterstrom an.

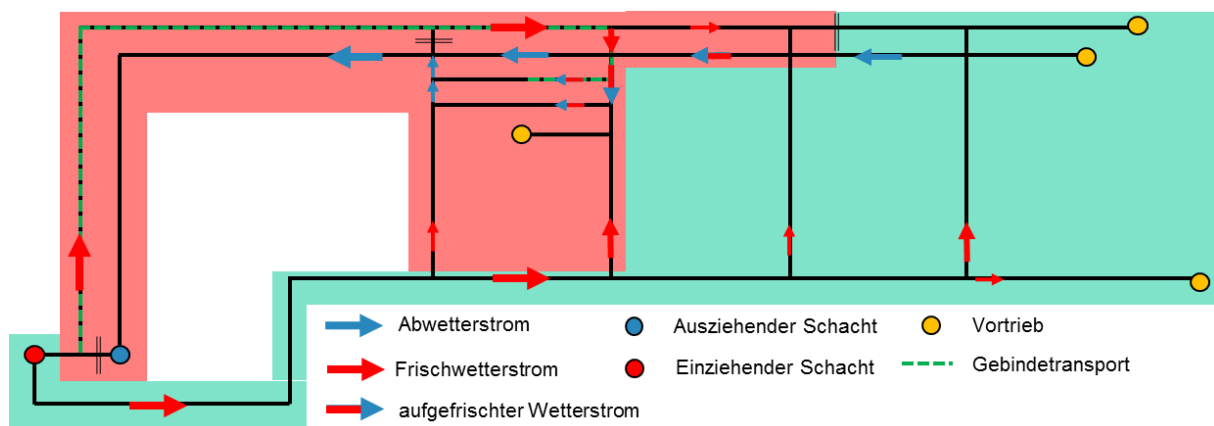


Abbildung 3-8: Schematische Darstellung des Grubengebäudes und dessen Einteilung in Strahlenschutzbereiche

Der benötigte Wetterbedarf richtet sich nach den Verbrauchern und den einzuhaltenden Mindestwettergeschwindigkeiten. Der Mindestwetterbedarf liegt bei 17.600 m<sup>3</sup>/min oder ca. 295 m<sup>3</sup>/s.

### 3.5.2 Temperaturentwicklungen und Klimavorausberechnung

Arbeiten unter hohen Umgebungstemperaturen sind nicht nur im Bergbau eine große Herausforderung für Personal und Technik. Die physiologische Belastung des Personals durch die heißen Umgebungsbedingungen in Verbindung mit der schweren körperlichen Arbeit führen zu einer starken körperlichen Beeinträchtigung, einer sinkenden Konzentrationsfähigkeit und letztlich zu einem erhöhten Unfallrisiko sowie einer verminderten Produktivität. Auch für die eingesetzte Technik steigen mit höheren Temperaturen die gestellten Anforderungen, und es ist mit einem erhöhten Verschleiß bzw. einer erhöhten Beanspruchung zu rechnen.

Mit Blick auf den großen Wärmeeintrag wird die Wetternetzrechnung um eine Klimavorberechnung ergänzt. Ziel ist es zu prüfen, ob die Einhaltung geltender bergbehördlicher Vorgaben und die Schaffung günstiger klimatischer Bedingungen unter den erwarteten Umgebungsbedingungen während der Rückholungsphase möglich sind. Temperaturentwicklungen im Gebirge bis zum Beginn der Rückholung wurden auf Basis der thermo-mechanischen Berechnungen in der VSG (GRS, 2012) durchgeführt. Der Verlauf des Temperaturanstiegs innerhalb der früheren Richtstrecken ist vom Abstand zu den Abfällen und dem Einlagerungsfortschritt abhängig. Über die Länge der Richtstrecken schwankt die Gebirgstemperatur deutlich. Die heißesten Bereiche sind lokal begrenzt und liegen in der Mitte zwischen den Querschlägen. An diesen Stellen sind die Abstände zu den Endlagerbehältern jeweils am kleinsten. Die Temperatur in der nördlichen Richtstrecke steigt bis auf 86°C. Im Bereich der südlichen Richtstrecke liegt die Temperatur im Schnitt unter 70°C. Zum Ende der Betriebszeit liegen die Temperaturen innerhalb der Querschläge bei 40°C bis maximal 85°C. Innerhalb der ersten 100 Jahre nach Beginn der Einlagerung steigt die Temperatur bis auf maximal 120°C. Die Temperaturspitzen liegen jeweils in der Mitte der Querschläge. Die Randbereiche sind kühler.

Bei der Analyse der Temperaturverteilung innerhalb eines Einlagerungsfeldes sind die Positionen der Endlagerbehälter deutlich durch Temperaturspitzen zu erkennen. In den ersten Jahren nach der Einlagerung konzentrieren sich die Temperaturmaxima auf den unmittelbaren Nahbereich der Endlagerbehälter. Abseits der Endlagerbehälter fällt die Temperatur in hohen Gradienten ab. Erst mit voranschreitender Einlagerungsdauer erwärmen sich auch die weiter entfernten Gebirgsbereiche, wie beispielsweise die Standorte der Querschläge. Die Temperaturentwicklung in den einzelnen Einlagerungsfeldern ist von deren Größe und dem Zeitpunkt der Einlagerung abhängig. Mit dem Ende der Einlagerung sind einige der Endlagerbehälter bereits mehrere Jahrzehnte eingelagert. Innerhalb der großen Einlagerungsfelder herrschen zum Ende der Einlagerung bereits Temperaturen nahe der Auslegungsgrenze.

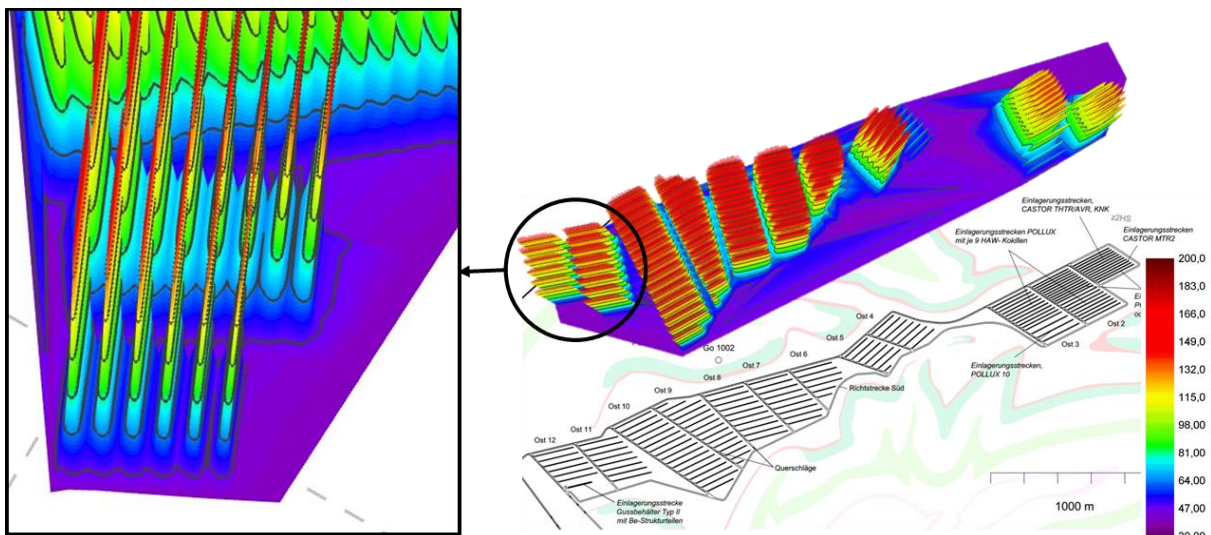


Abbildung 3-9: Temperaturverteilung im Grubengebäude am Ende der Einlagerung bzw. zu Beginn der Rückholung (ca. 40 Jahre nach Beginn der Betriebszeit), links Detailansicht der Einlagerungsfelder Ost 12 und 11



Bei der Berechnung der Temperaturentwicklung im Gebirge nach Entnahme der Endlagerbehälter ist die Entnahme der Wärmequellen (Rückholung der Endlagerbehälter) in der Temperaturentwicklung deutlich durch den unterbrochenen Temperaturanstieg und die einsetzende Abkühlung zu erkennen. Die Dauer des Temperaturanstiegs wird von der Lage der Beobachtungspunkte im Gebirge und ihrer Lage zu den Abfällen bestimmt. Über den für die Rückholung relevanten Zeitraum muss in weiten Teilen des neuen Grubengebäudes auch nach erfolgter Rückholung mit deutlich erhöhten Temperaturen gerechnet werden. Dies ist insofern relevant, als die frischen Wetter an den bereits geräumten aber noch warmen Gebirgsbereichen vorbeigeleitet werden müssen. Bei diesen Berechnungen sind die Kühleffekte der Wetter zunächst nicht berücksichtigt.

Auf Basis der Klimavorausberechnungen wird trotz deutlich erhöhter Temperaturen die Auffahrung der Hauptstrecken und Querschläge als gerade noch technisch möglich eingeschätzt. Für alle Vortriebe sind zusätzliche technische Kühlmaßnahmen vorzuhalten. Über die Offenstandzeiten der Strecken findet eine Kühlung des umgebenden Gebirges statt. Dieser Effekt reicht aber nicht weit genug ins Gebirge, um die Einlagerungsfelder zu kühlen und den anhaltenden Wärmeeintrag der Endlagerbehälter vollständig abzuführen.

Die Auffahrung der Teil- und Rückholungstrecken muss in die heißen Bereiche hinein und nahe an die Endlagerbehälter heran erfolgen. Der anhaltende Wärmeeintrag aus den Endlagerbehältern erschwert den Auffahrungs- und Kühlprozess deutlich. Die zulässigen Vortriebslängen und notwendigen Pausen führen zu nicht praktikablen Vortriebsgeschwindigkeiten.

Zur Erleichterung der Rückholbarkeit erfolgte eine Optimierung der Endlagerauslegung (vgl. Abschnitt 3.4) mit dem Ziel der Schaffung möglichst rückholungsfreundlicher Umgebungsbedingungen. Dies beinhaltet, im Bereich der Teilstrecken vortriebe Temperaturbedingungen zu schaffen, die den bergbaulichen Schutzziele und den Anforderungen eines sicheren Betriebs des Rückholungsbergwerks genügen. Mögliche Maßnahmen der Endlageroptimierung sind die Anpassung der Behälter- und Streckenabstände. Entsprechend der Neuregelung des StandAG ist gegenüber den Randbedingungen in (GRS, 2012) eine spätere Inbetriebnahme eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente zu erwarten. Damit steigt die Zwischenlagerzeit und führt zu einer Verringerung der Wärmeleistung der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und ausgediente Brennelemente. Dies begünstigt ebenfalls eine rückholungsfreundliche Auslegung. Im Referenzfall mit 36 m Streckenabstand sind aufgrund der veränderten Zwischenlagerzeit Maximaltemperaturen von 185°C am Endlagerbehälter zu erwarten. Eine Auslegungsoptimierung hin zur Grenztemperatur 200°C wäre möglich, entspricht aber nicht dem aktuellen Optimierungsziel. Stattdessen wurden drei Varianten mit vergrößertem Streckenabstand untersucht, vgl. Tabelle 3-2.

Tabelle 3-2: Erwartete Temperaturen am Stoß und im Querschnitt der Teilstrecken für unterschiedliche Auslegungskonfigurationen

Konfiguration	Maximale Temp. am Behälter [°C]	Maximale Temp. am Stoß [°C]	Zeitpunkt [a]
Aktuelle Auslegung (36 m Abstand)	185	172	30
40 m Abstand	179	161	30
44 m Abstand	177	150	30
50 m Abstand	175	143	30

Die Forderung einer schnellen Auffahrung ohne Nachschnitt ist für die Konfiguration 36 m Streckenabstand und der vorgesehenen Leistungsklasse der TSM nicht erfüllbar. Die Klimagrenzwerte können theoretisch mit einem hohen Kühlaufwand (ca. 435 kW) und langen Kühlzeiten eingehalten werden, eine zügige Auffahrung ohne Nachschnitt ist aber nicht möglich. Mit größer werdendem Streckenabstand sinken die Temperaturen und Konvergenzraten. Zwar sind im Bereich der Rückholungsstrecke immer noch ungünstige Temperaturen zu erwarten. Eine Auffahrung scheint aber unter sehr hohen technischen Aufwand möglich. Der theoretische Kühlaufwand in den Vortrieben sinkt ebenfalls stetig. Gleichzeitig sinkt die notwendige Vortriebsgeschwindigkeit zur Vermeidung eines Nachschnittes und es stehen ausreichende Kühlzeiten zur Verfügung.

Die Umgebungsbedingungen der gewählten Auslegungskonfigurationen wurden in ein Modell zur Rückholung im Bereich der beiden schachtnahen Einlagerungsfelder übertragen. Um eine Vergleichbarkeit mit dem Referenzmodell (Auslegung nach VSG aus (GRS, 2012)) zu ermöglichen, wurden die Größe und Lage des Infrastrukturbereichs sowie der südlichen Richtstrecke übernommen. In den Einlagerungsfeldern wurden je zehn Einlagerungsstrecken mit je 28 POLLUX<sup>®</sup>-Behältern mit entsprechendem Abstand zueinander angeordnet. Zwischen den vier Vergleichsmodellen variieren die Länge der Querschläge und die Lage der Doppelstrecke. Die Temperaturverteilung zu Beginn der Rückholung ist aus den durchgeführten Vergleichsrechnungen bekannt und wurde als Anfangszustand in die Modelle eingebunden. Die zeitliche Temperaturveränderung wird über das Streckenalter und die Bewetterung simuliert. Jedem Teilmodell sind die gleichen Verbraucher zugeordnet. Ebenso sind das Wetternetz und der verwendete Hauptgrubenlüfter in allen Teilmodellen gleich. Im Gegensatz zum Referenzmodell werden keine Verbraucher mit Verbrennungsmotoren berücksichtigt.

Die Gesamtbilanz des Wärmeeintrages ist in allen Teilmodellen vergleichbar. Mit steigendem Streckenabstand sinkt die Gesamtwärmemenge nur leicht. Größte Wärmequelle ist der Wärmeeintrag aus den Endlagerbehältern. Der Anteil geht mit steigendem Streckenabstand zurück. Relativ dazu steigt der Wärmeeintrag aus den Verbrauchern, obwohl dieser absolut gleich bleibt. In jedem Teilmodell sind die gleiche Abfallmenge bzw. Behälteranzahl und damit auch der gleiche Energieeintrag berücksichtigt. Unterschiede ergeben sich aus der Auslegung und damit dem Gebirgsvolumen, in dem sich der Energieeintrag verteilt. Durch die weiterräumigere Verteilung der Abfälle bzw. Endlagerbehälter ist das Grubengebäude zwar niedrigeren Temperaturen ausgesetzt, da aber auch mehr Streckenmeter aufzufahren sind, sinkt die Gesamtwärmemenge nicht im selben Maß. Zur Einhaltung der Grenztemperaturen

ist in allen Teilmodellen eine zusätzliche Kühlung notwendig. Der Kühlbedarf liegt zwischen 2.700 kW (36 m Streckenabstand) und 1.600 kW (50 m Streckenabstand).

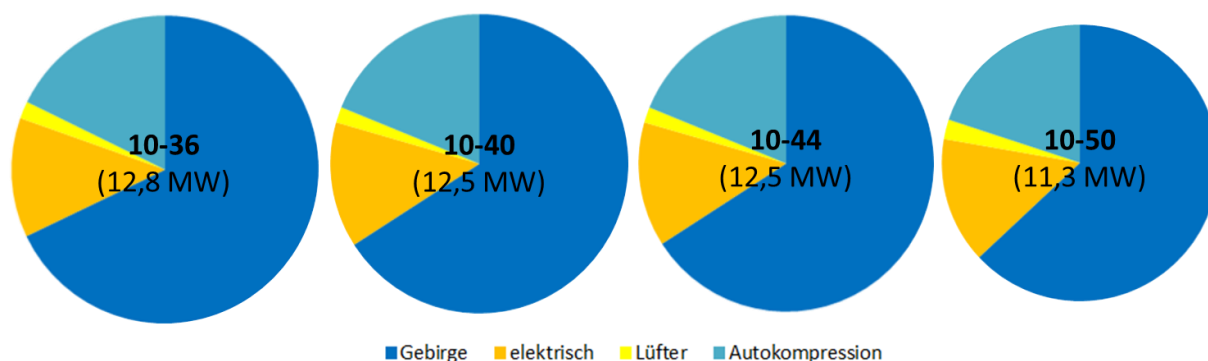


Abbildung 3-10: Gesamtbilanz des Wärmeeintrages ist in allen Teilmodellen im Vergleich

Gemäß dem StandAG § 23 (5) sind in den Flächenbedarf des Endlagers als Mindestanforderung Flächen eingeschlossen, "... die für die Realisierung von Maßnahmen zur Rückholung von Abfallbehältern [...] erforderlich sind und verfügbar gehalten werden müssen". Im vorliegenden Konzept der horizontalen Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern im Steinsalz sind solche Flächen beispielsweise für die neu zu errichtende Doppelstrecke nötig. Auch ein zusätzlicher Flächenbedarf durch eine angepasste Endlagerauslegung abweichend von der dichtesten Lagerung kann unter diesen Flächenbedarf fallen. Entsprechend (BMU, 2010) dürfen "Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung [...] die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen". Die Anpassung der Temperaturfelder beeinflusst neben der Auslegung des Endlagers auch die temperaturabhängigen Prozesse der Gebirgskonvergenz und der Salzgruskompektion. Diese sind für die Funktionsfähigkeit des passiven Sicherheitssystems und damit für die Langzeitsicherheit entscheidend. Die Beeinflussung dieser Prozesse muss aber nicht zwangsläufig zu einer Beeinträchtigung der Langzeitsicherheit im Sinne negativer Effekte führen. Wie (GRS, 2018) zeigt, kann für unterschiedliche Grenztemperaturen ein sicherer Einschluss der Abfälle nachgewiesen werden. Eine verzögerte Salzgruskompektion und damit erhöhte Permeabilität werden teils durch längere Zu- bzw. Austrittswege und größere Speichervolumen in den Porenräumen kompensiert. Die Errichtung eines Endlagers in dichtester Lagerung ist nicht zwingend notwendig für die Einhaltung der Langzeitsicherheit. Die Auslegungsanforderung der Rückholbarkeit ohne Beeinträchtigung des passiven Sicherheitssystems und damit der Langzeitsicherheit kann durch eine gezielte Optimierung der Endlagerkonfiguration erfüllt werden. Dies ist stets durch eine entsprechende Konsequenzenanalyse nachzuweisen.

Im Rahmen der durchgeführten Auslegungsoptimierung wurde gezeigt, dass die Schaffung günstigerer Umgebungsbedingungen zur Gewährleistung der Rückholbarkeit unter Abwägung aller Auslegungsbedingungen und ohne Beeinträchtigung der Langzeitsicherheit möglich ist. Der technische Aufwand zur Beherrschung der Temperaturverhältnisse sinkt, und auch Auffahrungen in den heißesten Bereichen innerhalb der Einlagerungsfelder scheinen damit beherrschbar. Neben günstigeren wetter- und kühltechnischen Aspekten sind auch deutlich günstigere geomechanische Bedingungen zu erwarten. Die Einhaltung der nach § 27 (4) StandAG geforderten vorläufigen Auslegungstemperatur von 100°C ist nur durch

eine reduzierte Behälterbeladung möglich. Unter Beibehaltung des Streckenabstandes der Referenzauslegung dürfen die Brennstäbe von maximal 4,5 BE (DWR) in einen POLLUX®-Behälter verpackt werden. Diese Anpassung würde zu einer signifikanten Vergrößerung des Grubengebäudes führen.

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

### 3.6 Umgang mit den Brennelementstrukturteilen

Die Brennelementstrukturteile werden in einer Einlagerungskammer in Gussbehältern Typ II (MOSAIK®-Behälter) aufeinander gestapelt. Diese Einlagerungskammer befindet sich im schachtnächsten Einlagerungsfeld der POLLUX®-10 mit Brennelementen aus den Leistungsreaktoren. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wird stets unterstellt, dass alle Endlagerbehälter im Einlagerungsbereich der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente entfernt werden. Dies schließt auch Endlagerbehälter für die Brennelementstrukturteile mit ein.

Für die Rückholung der Brennelementstrukturteile wird auch die Re-Mining-Strategie verfolgt. Die Endlagerbehälter müssen vollständig freigelegt werden. Dazu müssen zusätzliche Hohlräume im Firstbereich sowie an den Stößen der verfüllten Einlagerungskammer errichtet werden. In Abhängigkeit des Kammerquerschnitts würde so ein deutlich vergrößerter Querschnitt der Rückholungsstrecke entstehen. Sowohl die resultierende Firsthöhe als auch die Streckenbreite dieser hypothetischen Rückholungsstrecke würde das Schneidprofil einer TSM übersteigen. Die Auffahrung muss somit in mehreren Teilschritten erfolgen. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, sich den Endlagerbehältern von vorne, von Teilsohlen, von der Seite, von oben oder von unten anzunähern.

Zur Vereinheitlichung der Arbeitsabläufe wird allerdings festgelegt, dass die Streckenquerschnitte der Strecken für die Brennelementstrukturteile in etwa die gleichen Streckenquerschnitte wie die Rückholungsstrecken für POLLUX®-Behälter besitzen. Eine technisch einfache und sichere Entnahme der Endlagerbehälter ist wesentlich von der Lagerung der Endlagerbehäl-

ter abhängig. Zur Erleichterung der Rückholbarkeit wird ein verändertes Einlagerungsschema der MOSAIK<sup>®</sup>-Behälter vorgeschlagen. In der Einlagerungsstrecke sollen vier Gussbehälter Typ II stehend nebeneinander und zwei übereinander eingelagert werden. Es werden insgesamt zwei 302 m lange Strecken benötigt. Die Endlagerbehälter werden nach der Einlagerung schrittweise versetzt. Die Rückholung erfolgt in mehreren Teilschritten. Im ersten Schritt wird die Teilstrecke parallel zur Einlagerungsstrecke errichtet. Im zweiten Schritt erfolgt die Neuauffahrung der Einlagerungsstrecke. Dabei wird auch der Pfeiler zur Teilstrecke gewonnen. Das Freilegen der Endlagerbehälter erfolgt mit der Auffahrung. Die einzelnen Behälterreihen werden mit Hilfe der TSM oder aber auch mit einem Abbruchroboter beginnend mit den oberen Endlagerbehältern freigelegt. Das Einlagerungsfahrzeug kann die Endlagerbehälter auch bei der Rückholung wieder aufnehmen und auf dem gleisgebundenen Transportfahrzeug ablegen.

### **3.7 Verschluss und Umgang mit dem geräumten Endlager**

Bei einem Endlager handelt es sich gemäß Anlage 1 Atomgesetz (AtG, 2018) um eine Kernanlage. Das Endlager wird nach § 9 (AtG, 2018) genehmigt. Nach der Rückholung aller in dem Endlager eingelagerten radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente ist es vorgesehen, das Endlager aus dem Atomrecht zu entlassen und es nach Bundesberggesetz (BbergG) zu verwahren. Um das Endlager aus dem Atomrecht entlassen zu können, müssen die Anforderungen an eine Freigabe gemäß § 29 (StrlSchV, 2017) erfüllt sein. Das heißt, alle Gegenstände aus dem KB müssen freigemessen oder als radioaktiver Abfall separat entsorgt werden. Grubengebäude im KB und Haufwerk aus dem Grubengebäude müssen auf eine Kontamination und eine Aktivierung hin geprüft werden. Wird beim Freimessen eine Kontamination bzw. Aktivierung festgestellt, muss diese entfernt und ggf. als radioaktiver Abfall entsorgt werden. Erst wenn alle Bereiche und das Haufwerk freigemessen wurden, kann das Endlager aus dem Atomrecht entlassen werden.

Es ist vorgesehen, das Grubengebäude mit dem bei der Wiederauffahrung gewonnenen Haufwerk erneut zu versetzen. Dies kann entweder direkt nach dem Rückholen der Endlagerbehälter oder nach der kompletten Leerung des Endlagers geschehen. Mit dem vollständigen Versatz des Grubengebäudes sollen die Auswirkungen auf die Oberfläche begrenzt und das verbleibende Haldenvolumen reduziert werden. Nach Abschluss der Rückholungsarbeiten können auch die restlichen Grubenteile versetzt werden. Das Grubengebäude wird trocken verwahrt. Die Schachtverschlüsse der beiden Tagesschächte werden entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik verschlossen. Für den langzeitsicheren Verschluss konventioneller Kali- oder Steinsalzbergwerke existieren dazu hinreichend Anwendungsbeispiele.

### 3.8 Zeit- und Kostenschätzung

Für die Zeit- und Kostenschätzung einer potenziellen Rückholung von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern im Konzept der horizontalen Streckenlagerung wird ein zweigeteilter Ansatz verfolgt. Aufgrund der Einzigartigkeit der Anforderung einer Rückholbarkeit erfolgt die Zeitermittlung für die Rückholung über eine Abschätzung der notwendigen Teilprozesse. Bestehende Unwägbarkeiten finden durch entsprechende Annahmen Berücksichtigung. Ergänzend zu dieser Zeitschätzung soll der Aufwand für den Betrieb des Rückholungsbergwerkes anhand bestehender Planungen anderer Endlagerprojekte und hier besonders der Tagesanlagen erfolgen.

Die Auffahrung der Richtstrecken und Querschläge soll möglichst zügig umgesetzt werden. Die Errichtung aller drei Zugangsstrecken kann mit leistungsstarker Vortriebstechnik an zwei Betriebspunkten und einem Mehrschichtsystem innerhalb von ca. 2,5 Jahren erfolgen. Die Teilstrecken der Doppelstrecke werden dabei in einem Schritt errichtet. Die dritte Richtstrecke und die Querschläge werden von einem anderen Betriebspunkt erstellt. Zeitlich versetzt zum Vortrieb der Doppelstrecke werden in den Strecken, die den Einlagerungsfeldern zugewandt sind, die Gleise verlegt. Die Dauer des Gleisbaus wird auf ca. 1,5 Jahre abgeschätzt. Mit der Einrichtung von zwei unabhängigen Vortrieben kann die Auffahrung aller Teilstrecken innerhalb von ca. 23,5 Jahren erfolgen. Der eigentliche Rückholvorgang besteht aus drei Teilschritten, die jeweils in einer Schicht umgesetzt werden. Zunächst muss der Pfeiler bis zum Endlagerbehälter gewonnen werden. Anschließend ist der Endlagerbehälter vollständig freizulegen. Im dritten Schritt wird der Endlagerbehälter aus der Strecke entnommen und zurück nach Übertrage transportiert. Diese Schritte sind für jeden Endlagerbehälter durchzuführen. Insgesamt ergibt sich damit eine Rückholungsdauer von rund 40 Jahren.

Die Kosten werden für die gesamte Betriebsdauer unter Berücksichtigung der Kosten für die Auffahrungen, für die Erkundung, für die konkrete Durchführung der Rückholung, für den Versatz, für die Kühlung bzw. Bewetterung, für Unterhaltung und den Betrieb der gesamten Anlage zusammen mit den Anschaffungskosten, den Wartungskosten und den Personalkosten auf ca. 51 Mio. € jährlich und 2,0 Mrd. € insgesamt abgeschätzt.

## **4 Rückholbarkeit bei der vertikalen Bohrlochlagerung im Salzgestein**

Basierend auf dem Endlagerkonzept "Vertikale Bohrlochlagerung" und den dafür bestehenden Überlegungen zur Rückholung werden nachfolgend die Ergebnisse vertiefender Untersuchungen zur Rückholung zusammengefasst. Detaillierte Beschreibungen dazu sind im technischen Bericht "Technische Konzepte für die Rückholung der Einlagerungsvariante vertikale Bohrlochlagerung in Salzformationen" (BGE TEC, 2018b) zu finden. Die Untersuchungen umfassen neben dem Betriebsablauf und dem Rückholungsablauf auch das Automatisierungspotenzial bei der Rückholung und die Durchführung einer Betriebsstörungsanalyse und eine Beurteilung der Übertragbarkeit des gleislosen Transportes auf die Einlagerung. Des Weiteren werden die durchgeführten Arbeiten zur Berechnung der Standsicherheit der Rückholungsstrecken, das Bewetterungskonzept sowie die Klimavorausberechnungen und der Umgang mit den Brennelementstrukturteilen beschrieben. Abschließend werden die Arbeiten zum Verschluss und zum Umgang mit dem geräumten Endlager, sowie zur Zeit- und Kostenschätzung zusammengefasst.

### **4.1 Einlagerungskonzept**

Die Bohrlochlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in tiefen vertikalen Bohrlöchern ist ein alternatives Einlagerungskonzept zur Streckenlagerung von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern. Das ursprüngliche Einlagerungskonzept berücksichtigte die Handhabung dreier unterschiedlicher Behältertypen. Durch die Einbindung der Rückholbarkeit innerhalb der Planungen der VSG (GRS, 2012) wurde das Behälterkonzept variiert. Im Zuge des angepassten Behälterkonzeptes wurde die Möglichkeit berücksichtigt, alle radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente in einem einheitlichen Endlagerbehälter einzulagern, den Brennstabkokillen (BSK). Die äußere Form der Endlagerbehälter für radioaktive Abfälle, ausgediente Brennelemente aus Leistungsreaktoren und ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie Forschungsreaktoren bleibt damit immer gleich.

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

Im Rahmen der VSG (GRS, 2012) wurde das Design der BSK an die veränderten Auslegungsanforderungen zur Gewährleistung der Rückholbarkeit angepasst. Zur Erleichterung der Rückholbarkeit aus einem verfüllten Bohrloch kann die BSK mit einer konischen Außenform versehen werden. 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. Die Geometrie der Einlagerungsorte ist an die Anforderungen der Bohr- und Einlagerungstechnik angepasst.

In der VSG (GRS, 2012) wird durch Anpassungen des Einlagerungskonzeptes eine Rückholbarkeit der Endlagerbehälter gemäß den Sicherheitsanforderungen BMU (BMU, 2010)

gewährleistet. Alle Bohrlöcher werden vor der Einlagerung mit einer Verrohrung ausgestattet. Die Verrohrung muss dem erwarteten Gebirgsdruck standhalten. Die Kokillen werden weiterhin wechselweise eingelagert und versetzt. Statt eines arteigenen Materials soll ein möglichst nicht kompaktierender, gering kohäsiver Versatz eingebaut werden. Dies kann beispielsweise Quarzsand sein. Der Sand kann auch nach einer unbestimmten Einlagerungsdauer vergleichsweise einfach aus dem Bohrloch entfernt werden.

Die Auslegung des Grubengebäudes in (GRS, 2012a) umfasst einen zentralen Infrastrukturbereich mit zwei Tageszugängen und insgesamt drei Einlagerungsfeldern östlich der Doppelschachtanlage. Die Einlagerungsfelder werden über zwei Richtstrecken erschlossen. Zwischen den Richtstrecken erschließen die Bohrlochüberfahrungsstrecken querschlägig die Einlagerungsorte. Die Einlagerung erfolgt im Rückbau, beginnend in den schachtfernen Überfahrungsstrecken. Die Bewetterung erfolgt einsöhllich. Über die Richtstrecke Süd ziehen die frischen Wetter in die jeweilige Überfahrungsstrecke und verlassen das Grubengebäude wieder über die Richtstrecke Nord und den Schacht 2 (Transportschacht für Abfallbehälter). Die Übergänge zwischen den Strahlenschutzbereichen liegen entsprechend dem Einlagerungsfortschritt in den Bohrlochüberfahrungsstrecken.

Die Einlagerung der BSK erfolgt mittels einer Einlagerungsvorrichtung (ELV). Während der Einlagerungsphase ist das Bohrloch durch eine Bohrlochschleuse verschlossen. Für die Einlagerung der Kokillen wird zunächst der beladene Transferbehälter unter die ELV gefahren. Die ELV übernimmt den Transferbehälter und hebt diesen vom Transportwagen. Nach dem Ausfahren des Transportwagens beginnt das Schwenken des Transferbehälters. Abschließend dockt dieser an die Bohrlochschleuse an. Nach dem Andocken auf der Bohrlochschleuse setzt eine Abschirmhaube auf den Transferbehälter auf. Ist eine gesicherte Verbindung zwischen beiden hergestellt, kann die obere Schleuse des Transferbehälters geöffnet werden. Der in der Abschirmhaube integrierte Greifer kann die Kokille im Inneren des Endlagerbehälters fassen und zunächst leicht anheben. Danach wird die Bohrlochschleuse parallel mit der unteren Schleuse des Transferbehälters geöffnet, und die Kokille kann in das Bohrloch abgelassen werden.

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

Das Bohrlochinnere ist stets vom restlichen Grubengebäude getrennt. Nach der Befüllung eines Bohrlochs wird die Bohrlochschleuse zurückgebaut und die Verrohrung mit einem Stahldeckel verschlossen. Der Bohrlochkeller wird verfüllt. Nach Abschluss der Einlage-



lungstätigkeit in einer Bohrlochüberfahrungsstrecke, wird diese vollständig mit trockenem Salzgrus versetzt. Die Richtstrecken werden mit angefeuchtetem Salzgrus versetzt. In beiden Richtstrecken werden außerdem Streckenverschlüsse errichtet. Der Infrastrukturbereich wird mit Schotter verfüllt.

## 4.2 Betriebsablauf und Technik der Rückholung

### 4.2.1 Aus- und Vorrichtung am Beispiel Grubengebäude der VSG

Die Anforderungen an eine gebirgsschonende Auffahrung und die Minimierung der Durchörterung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (ewG) (BMU 2010) sind bei der Rückholung nicht mehr zwingend zu beachten. Das Grubengebäude kann somit an die Erfordernisse des Rückholungsbetriebes angepasst werden. Konkret bedeutet dies die Einführung einer zusätzlichen südlichen Richtstrecke.

Die Auffahrung der nördlichen und südlichen Richtstrecke erfolgt zu beiden Seiten der Einlagerungsfelder. Zur Optimierung der Bewetterung und der folgenden Betriebsabläufe werden bei der südlichen Richtstrecke zwei parallele Strecken aufgefahren, die in regelmäßigen Abständen querschlägig verbunden sind. Die Doppelstrecke mündet in eine Umfahrungsstrecke, am schachfernten Punkt des Grubengebäudes. Die Auffahrungen können mit schweren TSM erfolgen. Während der Auffahrung der Hauptstrecken kann von Norden aus bereits eine erste Bohrlochüberfahrungsstrecke zur Verbesserung der Fluchtwegsituation aufgefahren werden.

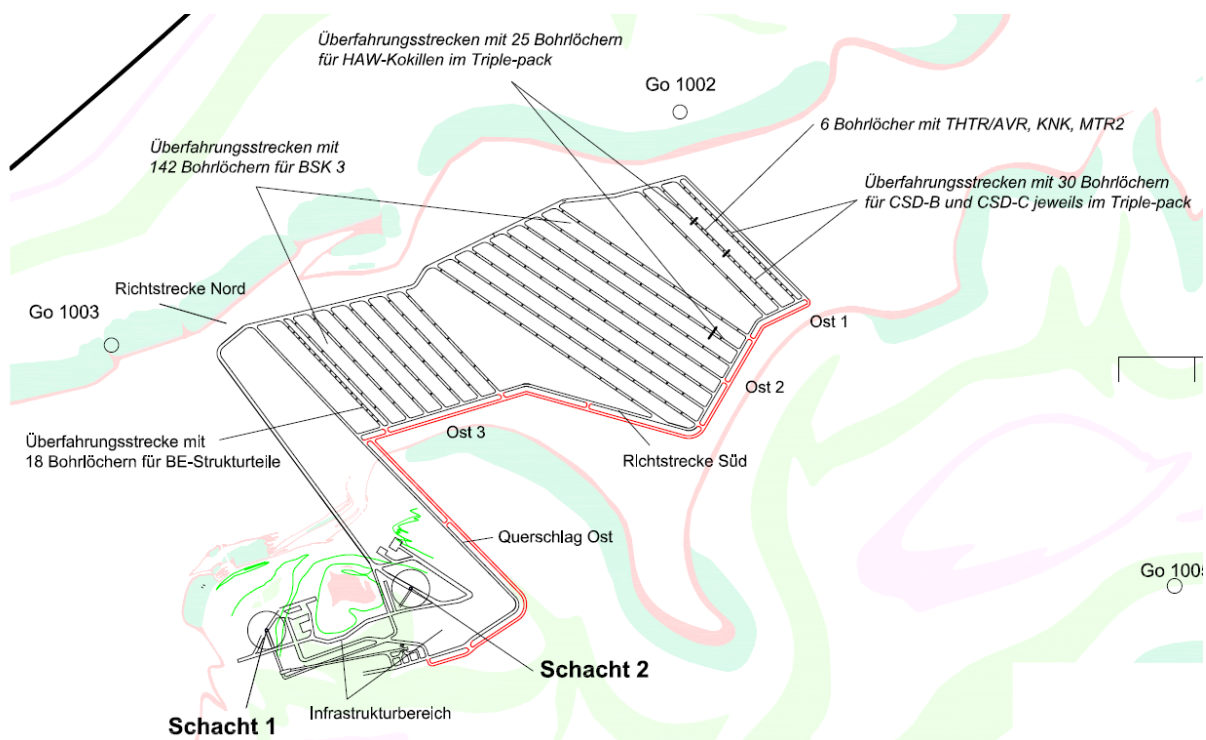


Abbildung 4-1: Grubengebäude Rückholung

Die nördliche Richtstrecke und die Bohrlochüberfahrungsstrecken sind dem KB zugeordnet. Bei einem erneuten Auffahren der Richtstrecke und der Bohrlochüberfahrungsstrecken, die dem KB zugeordnet waren, sind sie automatisch wieder KB. Es sei denn, dass diese Bereiche vor dem Verschluss freigemessen wurden. Bislang zählt das Freimessen, welches eine rückholungserleichternde Maßnahme darstellt, noch nicht zum Einlagerungskonzept.

Nach der Auffahrung der Hauptstrecken werden alle Bohrlochüberfahrungsstrecken aufgeföhren. Ziel ist es, alle Bohrlochüberfahrungsstrecken möglichst frühzeitig zu errichten. Dadurch sollen günstige Temperaturbedingungen in den Vortrieben und anschließend möglichst lange Kühlzeiten erreicht werden.

Spätestens bei Beginn der Rückholung wird der untertägige Bereich des Endlagers gemäß § 36 (StrlSchV, 2017) in Überwachungs- und KB unterteilt. Zur Gewährleistung der Anforderungen des § 44 (StrlSchV, 2017) an eine Kontaminationskontrolle an Personen und Gegenstände beim Verlassen des KBs werden in den Übergängen zwischen KB und ÜB zwischen den Bohrlochüberfahrungsstrecken und der südlichen Richtstrecke wetterdurchlässige Absperrungen und Tore eingebaut, die weder für Mensch noch für Sachgüter im Normalfall genutzt werden können. Der Übergang zwischen KB und ÜB mittels Schleusen und Monitoren ist im Infrastrukturbereich vorgesehen.

#### **4.2.2 Vorbereitung der Rückholung**

Bevor die Rückholung der Endlagerbehälter aus dem Bohrloch stattfinden kann, sind noch einige Teilschritte umzusetzen. Zu diesen Teilschritten gehört der Nachschnitt des Firstbereiches. Dieser dient der Aufweitung des Querschnittes am Bohrloch. Diese Arbeiten können vauseilend zur Rückholung stattfinden. Während der Rückholung der Endlagerbehälter aus einem Bohrloch ist kein weiterer Nachschnitt möglich. Die Konvergenz des Gebirges ist beim Nachschnitt zu berücksichtigen.

Ein anderer Teilschritt ist die Erkundung der exakten Lage der Verrohrung und die Kontaminationsprüfung. Der Bohrlochkeller wurde nach der Einlagerung mit Salzbeton verfüllt. Der verfüllte Bohrlochkeller ist damit bereits während der Auffahrung leicht vom gewachsenen Gebirge bzw. der versetzten Strecke zu unterscheiden. Die Bestimmung der exakten Lage der Verrohrung kann durch zerstörungsfreie geophysikalische Messverfahren aus der Rückholungsstrecke erfolgen. Die Bestimmung der Tiefenlage unter Sohlenniveau kann mit Radarmessungen in einem Radarprofil erfolgen. Ist die horizontale Lage der Abdeckplatten nicht bekannt, sind zwei bis drei Radarprofile zur Bestimmung der dreidimensionalen Lage notwendig. Ein entsprechender Test vor Beginn der eigentlichen Messungen kann über die Notwendigkeit von zwei oder drei Radarprofilen Aufschluss geben.

Nach dem Detektieren des Bohrloches wird der Salzbeton des Bohrlochkellers und der Metalldeckel der Verrohrung auf eine Kontamination hin überprüft, um in einem ersten Schritt festzustellen, ob es innerhalb des Bohrloches einen Defekt der BSK gibt und ob ggf. radioaktive Nuklide freigesetzt wurden. Im Anschluss an alle Erkundungsarbeiten erfolgt die Herrichtung des neuen Bohrlochkellers.

Wurden Kontaminationen außerhalb der Verrohrung festgestellt, müssen alle Arbeiten zum Freilegen der Endlagerbehälter und zur Rückholung selbst in einer Einhausung durchgeführt werden. Unabhängig von einer detektierten Kontamination sollte eine Einhausung an allen Einlagerungsbohrlöchern vorsorglich vor dem Öffnen der Verrohrung und dem Aufsetzen der Bohrlochschleuse installiert werden. Die Arbeitsschritte zum Öffnen der Verrohrung sind von der endgültig gewählten Verschlusstechnik abhängig. Die Verrohrung kann verschraubt oder verschweißt werden. Eine Verschraubung kann grundsätzlich wieder gelöst werden. Verformungen oder Korrosion im Laufe der unbestimmten Einlagerungszeit können dies aber erschweren. In diesem Fall bilden Trennverfahren wie Trennschweißen oder Schneiden eine Alternative. Die Abdeckplatte kann mit Hilfe eines Manipulators fernbedient von der Verrohrung getrennt werden, entsprechende Techniken sind bereits aus dem Rückbau von Kernkraftwerken bekannt. Nach dem Aufsetzen der Bohrlochschleuse kann die Einhausung zurückgebaut werden. Die Gleisanlage für die ELV und den Plateauwagen kann dann bis über das Bohrloch errichtet werden.

### **4.2.3 Versatzentnahme**

Um den geforderten Abstand zwischen den Kokillen einzuhalten, wird nach Einlagerung einer Kokille der entsprechende Bereich des Bohrloches mit einem gering kohäsiven, nicht kompaktierbarem Versatz (z. B. Quarzsand) verfüllt. In gleicher Weise wird auch der verbleibende Ringraum zwischen Endlagerbehälter und Bohrlochverrohrung verfüllt.

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

Aufgrund der sehr beengten Platzverhältnisse und als Ergebnis erster Saugversuche ist eine zweistufige Axialturbine mit zwei Radiallaufrädern und einem feststehenden Leitradsystem zwischen den beiden Laufrädern vorgesehen. Der Lüfter muss zum einen eine hinreichend hohe Strömungsgeschwindigkeit zur Mitnahme der Partikel erzeugen und zum anderen den Druckverlust innerhalb der Saugvorrichtung überwinden.

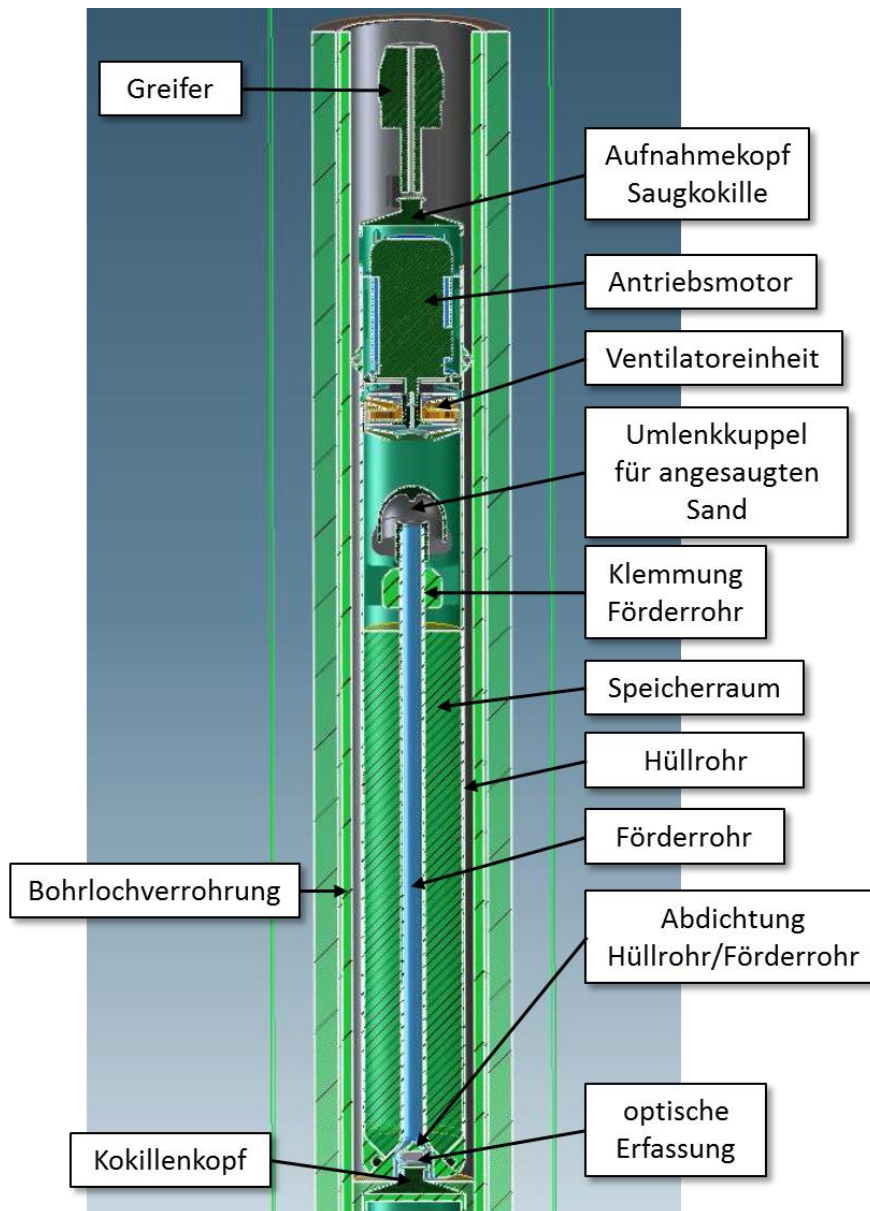


Abbildung 4-2: Schnittbild Saugvorrichtung im Bohrloch (Renger&Dohl, 2015)

#### 4.2.4 Rückholungstätigkeit

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

Die Betriebsabläufe am Bohrloch umfassen die Versatzentnahme und die Entnahme der Kokillen. Nach der Positionierung der ELV über dem Bohrloch muss zunächst der Bohrloch-

versatz bis zur ersten Kokille entfernt werden. Die Entladung der Saugvorrichtung findet an einem geeigneten Ort innerhalb des Endlagers statt. Der Transport des Transferbehälters für die Saugvorrichtung erfolgt analog dem Behältertransport mit dem Zugverband, bestehend aus Lok und Plateauwagen. Im Anschluss an das Entfernen des Versatzes erfolgt der eigentliche Rückholungsvorgang, die Entnahme der Kokille. Anschließend kann mit der erneuten Versatzentnahme ein weiterer Rückholungszyklus beginnen. Der Zyklus wird so oft wiederholt, bis der letzte Endlagerbehälter aus einem Bohrloch rückgeholt ist. Im Anschluss werden die Endlagerbehälter aus dem nächsten Bohrloch rückgeholt.

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

#### **4.2.5 Automatisierungspotenzial während der Rückholung**

Die im Abschnitt 3.3.6 genannten Aspekte zur Automatisierung von Arbeitsprozessen gelten ebenso für die Einlagerung und Rückholung im Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung.

### **4.3 Bewetterung und Klimavorausberechnung**

#### **4.3.1 Bewetterung**

Das bestehende Endlagerkonzept der Bohrlochlagerung in Salzformationen beinhaltet eine einsöhlige Wetterführung. Die Versorgung des Grubengebäudes mit Frischwettern soll allein über die für die Einlagerung notwendigen Strecken erfolgen. Die frischen Wetter ziehen über den einziehenden Schacht der zentralen Doppelschachanlage in das Grubengebäude. Die Wetterströme können innerhalb des Endlagers durch Wetterbauwerke gesteuert und Blindstrecken durch Sonderbewetterung versorgt werden. Alle Abwetterströme werden in der nördlichen Richtstrecke gesammelt und zum ausziehenden Schacht geleitet. Es entsteht eine umläufige Wetterführung.

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

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

Die Doppelstrecke im Süden des Grubengebäudes dient als Frischwetterstrecke (siehe Abbildung 4-3). Teilströme werden bedarfsgerecht in die Bohrlochüberfahrungsstrecken geleitet. Der nutzbare Volumenstrom wird durch den Streckenquerschnitt und die zulässige Wettergeschwindigkeit von maximal 6 m/s in regelmäßig befahrenen Strecken begrenzt. Die Abwetter der einzelnen Teilfelder werden in der nördlichen Richtstrecke gesammelt und zum ausziehenden Schacht geleitet.

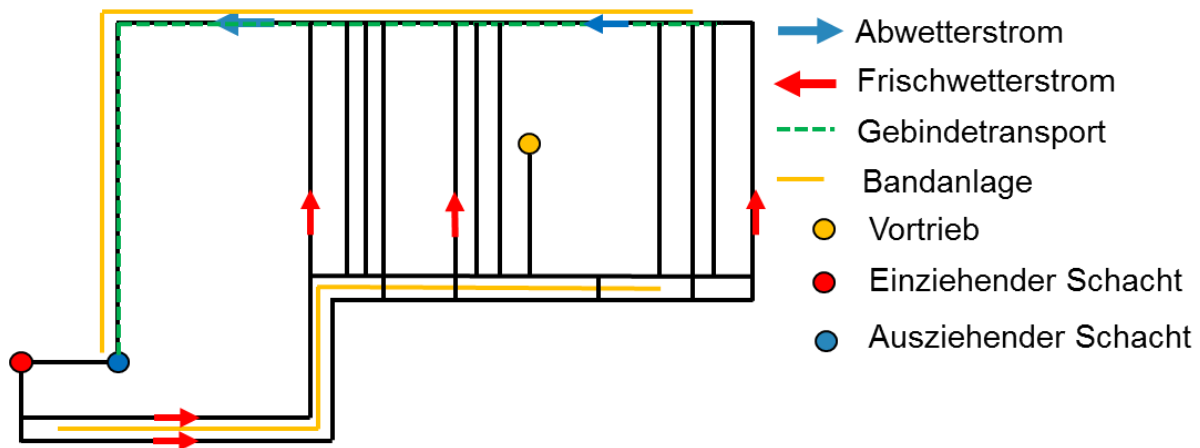


Abbildung 4-3: Bewertungsschema während der Rückholung

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

Der benötigte Wetterbedarf richtet sich nach den Verbrauchern und den einzuhaltenen Wettergeschwindigkeiten. Zusätzlich zu den Rückholungsfeldern ist auch der Infrastrukturbereich zu bewettern. Der Mindestwetterbedarf liegt somit bei 16.600 m<sup>3</sup>/min. Mit weiteren Betriebspunkten steigt auch der Mindestwetterbedarf.

#### 4.3.2 Temperaturentwicklungen und Klimavorausberechnung

Temperaturentwicklungen im Gebirge bis zum Beginn der Rückholung wurden auf Basis der thermo-mechanischen Berechnungen in der VSG (GRS, 2012) durchgeführt. Der Wärmeeintrag der Endlagerbehälter führt zuerst zu einer Erwärmung des Bohrloches und der umliegenden Gebirgsbereiche. Temperaturen nahe der Auslegungsgrenze sind zunächst auf diese Bereiche begrenzt. Die Erwärmung der Einlagerungs- bzw. Rückholungssohle erfolgt deutlich langsamer als die Erwärmung der direkten Umgebung der Endlagerbehälter. Die zu erwartende Gebirgstemperatur in den Grubenbauen hängt von der Position im jeweiligen Einlagerungsfeld und dem zeitlichen Abstand zwischen Einlagerung und Rückholung ab.

Der Temperaturanstieg während des potenziellen Rückholungszeitraumes verläuft im gesamten Grubengebäude annähernd linear. Ohne Rückholung treten 40 Jahre nach Ende der Einlagerung in den Bohrlochüberfahrungsstrecken Temperaturen bis maximal 82°C auf.

Bei der Berechnung der Temperaturentwicklung im Gebirge nach Entnahme der Endlagerbehälter wird von einem Beginn der Rückholung 40 Jahre nach Einlagerungsbeginn ausgegangen. Die Rückholung der Endlagerbehälter entspricht im Modell einer Entnahme der Wärmequellen aus den Einlagerungsbereichen. Die weitere Erwärmung des Gebirges wird unterbrochen. Der bis dahin erfolgte Wärmeeintrag verteilt sich weiter im Gebirge und wird teilweise über die Wetter abgeführt. Um die Gebirgstemperaturen möglichst exakt abzubilden wurde eine zusätzliche Berechnung durchgeführt, in der die Wärmequellen in Abhängigkeit des Einlagerungsfortschrittes aktiviert und anschließend entsprechend dem angenommenen Rückholungsfortschritt schrittweise wieder deaktiviert wurden. Die Modellrechnung unterliegt der Annahme, dass die Rückholung in umgekehrter Reihenfolge zur Einlagerung erfolgt. Die Entnahme der Wärmequellen (Rückholung der Endlagerbehälter) ist in der Temperaturentwicklung deutlich durch den unterbrochenen Temperaturanstieg und die einsetzende Abkühlung zu erkennen. In allen Bohrlochüberfahrungsstrecken kann der stetige Anstieg der Gebirgstemperatur unterbrochen werden. Die Berechnung zeigt auch, dass durch eine schnelle Auffahrung und Rückholung im Feld mit den Maximaltemperaturen die Temperaturentwicklung in diesem heißesten Gebirgsbereich deutlich eingeschränkt werden kann. Über den Rückholungszeitraum muss trotzdem in allen Teilen des neuen Grubengebäudes auch nach erfolgter Rückholung mit erhöhten Temperaturen gerechnet werden. Die Temperatur sinkt nur langsam auf das natürliche Niveau ab. Die Kühlwirkung der Wetter wird diesen Prozess beschleunigen.

Die Klimavorausberechnungen zeigen, dass die Gebirgstemperatur über dem Einlagerungsbereich im potenziellen Rückholungszeitraum stetig ansteigt. Durch eine zügige Auffahrung aller Rückholungsstrecken können diese Vortriebstätigkeiten unter vergleichsweise moderaten Gebirgstemperaturen erfolgen. Während der ersten 5 Jahre nach der Einlagerung des letzten Endlagerbehälters steigen die Temperaturen in den Bohrlochüberfahrungsstrecken nicht über 60°C. Dies entspricht auch im konventionellen Bergbau technisch und auch wirtschaftlich beherrschbaren Bedingungen.

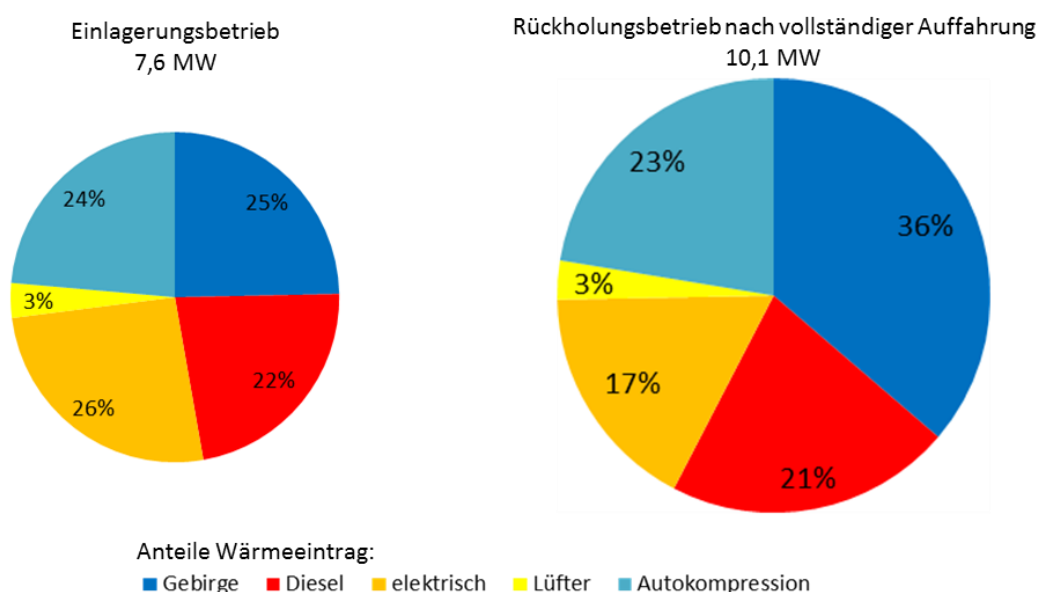


Abbildung 4-4: Vergleich erwarteter Wärmeeinträge während des Einlagerungsbetriebes und der Rückholung (46 Jahre nach Einlagerungsbeginn)

Aus den Kenndaten der schweren TSM ergibt sich eine Vortriebsleistung von 5,5 m pro Schicht. Die Firsterhöhung an den Bohrlöchern wird gesondert geschnitten. Die erhöhte Gebirgstemperatur machte eine zusätzliche Kühlung aller sonderbewetterten Grubenbaue und besonders der Vortriebe unerlässlich, um die Vorgaben gemäß (KlimaBergV 1983) einhalten zu können. Ungünstig wirkt sich hier auch die Länge der Sonderbewetterung in den Querschnitten von bis zu 700 m aus. Im gesamten Rückholungsbergwerk müssen bis zu 1,3 MW Kühlleistung installiert werden. Die Kühlleistung muss bedarfsgerecht an die einzelnen Betriebspunkte verteilt werden. Die benötigte Kühlleistung kann zentral an einem Punkt über oder unter Tage erzeugt werden. Zur Verteilung der Kühlleistung muss ein entsprechendes Leitungsnetz errichtet werden. Kühlbedarf kann ebenso in Blindstrecken während des Versatzvorgangs oder in den Einhausungen der Bohrlochkeller entstehen. Die Wärmetauscher der dezentralen Anlagen müssen dann im Hauptwetterstrom aufgestellt werden.

Die durchschlägige Bewetterung führt nach Auffahrung der Strecken zu einer Verzögerung des Temperaturanstieges. Der Anstieg kann aber nur durch die Rückholung ganz gestoppt werden. Zur Begrenzung des Temperaturanstieges wird daher empfohlen, die Bohrlöcher in den wärmsten Teilen des Endlagers als erstes zu räumen.

#### **4.4 Verschluss und Umgang mit dem geräumten Endlager**

Die im Abschnitt 3.6 genannten Aspekte zum Umgang mit dem geräumten Endlager gelten ebenso für die Einlagerung und Rückholung im Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung.

Bei einem Endlager handelt es sich gemäß Anlage 1 Atomgesetz (AtG, 2018) um eine Kernanlage. Das Endlager wird nach § 9 (AtG, 2018) genehmigt. Nach der Rückholung aller in das Endlager eingelagerten radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente ist es vorgesehen, das Endlager aus dem Atomrecht zu entlassen und es nach Bundesberggesetz (BbergG, 2015) zu verwahren. Um das Endlager aus dem Atomrecht entlassen zu können, müssen die Anforderungen an eine Freigabe gemäß § 29 StrlSchV (StrlSchV, 2017) erfüllt sein. Das heißt, alle Gegenstände aus dem KB müssen freigemessen oder als radioaktiver Abfall separat entsorgt werden. Grubengebäude im KB müssen auf eine Kontamination und eine Aktivierung hin geprüft werden. Dies betrifft auch die im Gebirge verbleibende Verrohrung. Die Verrohrungen der Bohrlöcher kann in Teilen eine Aktivierung erfahren haben oder kontaminiert sein. Eine Kontamination setzt einen Defekt einer oder mehrerer Kokillen voraus. Wird beim Freimessen eine Aktivierung oder Kontamination festgestellt, muss die Verrohrung in geeigneter Weise dekontaminiert werden. Nach der vollständigen Freimessung kann die Entscheidung zur Verfüllung und zum Verschluss gemäß geltender bergbehördlicher Vorgaben, wie (LBEG, 2007), getroffen werden. Dabei ist jedes Bohrloch einzeln zu bewerten.

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



## 4.5 Zeit- und Kostenschätzung

Für die Zeit- und Kostenschätzung einer potenziellen Rückholung von BSK im Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung wird ein zweigeteilter Ansatz verfolgt. Aufgrund der Einzigartigkeit der Anforderung einer Rückholbarkeit erfolgt die Zeitermittlung für die Rückholung über eine Abschätzung der notwendigen Teilprozesse. Bestehende Unwägbarkeiten finden durch entsprechende Annahmen Berücksichtigung. Ergänzend zu dieser Zeitschätzung soll der Aufwand für den Betrieb des Rückholungsbergwerkes anhand bestehender Planungen anderer Endlagerprojekte, und hier besonders der Tagesanlagen, erfolgen.

Die Auffahrung der Richtstrecken soll möglichst zügig umgesetzt werden. Die Auffahrung aller drei Hauptstrecken kann mit leistungsstarker Vortriebstechnik an zwei Betriebspunkten und in einem Mehrschichtsystem innerhalb eines Jahres erfolgen. Die Vortriebstechnik ist auch für die Auffahrung der Rückholungsstrecken einsetzbar. Unter Berücksichtigung der Vortriebsleistung sowie notwendiger Umbau- und Wartungszeiten wird die Auffahrung dieser Grubenteile ca. 9 Jahre dauern. Sobald die ersten Rückholungstrecken errichtet sind, können parallel dazu die Erkundung der exakten Bohrlochlage und die Vorbereitung der eigentlichen Rückholungstätigkeit erfolgen. Zu dieser Vorbereitung soll auch die Einhausung des Bereiches um das jeweilige Bohrloch dienen. Die aktive Rückholung der BSK kann nach der Errichtung aller benötigten Komponenten (Bohrlochkeller und Bohrlochschleuse) erfolgen. Die vorläufige Zeitschätzung unterliegt der Annahme, dass alle Tätigkeiten außer der Auffahrung der Hauptstrecken im Einschichtbetrieb durchgeführt werden. Es wird zunächst nur ein Betriebspunkt je Teilprozess berücksichtigt. Unter dieser Annahme wurde der Einbau der Bohrlochschleuse inkl. Auf- und Abbau der Einhausung als zeitaufwendigster Teilprozess identifiziert. Die Umsetzung dieser Tätigkeiten an allen Bohrlöchern dauert in Summe 27,5 Jahre. Die Freilegung und Vorbereitung aller Bohrkeller (1 Jahr) und auch der Gleisbau in den Rückholungsstrecken (ca. 4 Jahre) kann in Abhängigkeit des Rückholungsfortschrittes umgesetzt werden. Die Versatzentnahme und die Rückholung der BSK dauern ca. 25 Jahre. Alle Teilprozesse der Herrichtung der Bohrlochkeller und der eigentlichen Rückholungstätigkeit können parallel an verschiedenen Betriebspunkten umgesetzt werden. Auch der Versatz der bereits geräumten Bohrlöcher und Strecken kann parallel zur Rückholung erfolgen. Ohne Berücksichtigung einer Planungs- und Genehmigungsphase sowie einem möglichen Verschluss des Rückholungsbergwerkes wird so für die Umsetzung der Rückholung ein Zeitraum von mindestens 32 Jahren erwartet.

Die Kosten werden für die gesamte Betriebsdauer unter Berücksichtigung der Kosten für die Auffahrungen, für die Erkundung, für die Herrichtung der Bohrlöcher, für die konkrete Durchführung der Rückholung, für den Versatz, für die Kühlung bzw. Bewetterung, für die Unterhaltung und den Betrieb der gesamten Anlage zusammen mit den Anschaffungskosten, den Wartungskosten und den Personalkosten auf ca. 42 Mio. € jährlich und 1,7 Mrd. € insgesamt abgeschätzt.



## 5 Rückschlüsse für die direkte Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern

Die Einlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen und ausgedienten Brennelementen in Transport- und Lagerbehältern (TLB) wurde seitens der DBE TECHNOLOGY GmbH zwischen 2006 und 2014 in einer mehrstufigen Machbarkeitsstudie untersucht (DBE TEC, 2014b). Ziel der Studie war, durch eine vertiefende Planung dieses Einlagerungskonzeptes einen zur Streckenlagerung von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern oder zur Bohrlochlagerung von BSK vergleichbaren Kenntnisstand zu erreichen. Die Studie beinhaltet eine Grundlagenermittlung, thermische Berechnungen und die Planung des technischen Endlagerkonzeptes. Das Konzept der Endlagerung von TLB wurde außerdem im Rahmen der VSG als Differenzbetrachtung zur Streckenlagerung von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern berücksichtigt. (GRS, 2012)

Die Einlagerung der TLB berücksichtigt eine Vielzahl verschiedener Behältertypen. Alle sind durch deutlich größere Abmessungen als der POLLUX<sup>®</sup>-10-Behälter gekennzeichnet. Die ebenfalls zylindrischen TLB besitzen einen Außendurchmesser von bis zu 2,7 m und sind bis zu 6 m lang. Das enthaltene Inventar übersteigt ebenfalls die Beladung der POLLUX<sup>®</sup>-10-Behälter. In Summe besitzen die beladenen TLB eine Gesamtmasse von bis zu 160 t.

Mit Hilfe thermischer Berechnungen konnte gezeigt werden, dass auch bei dem erhöhten Wärmeeintrag der TLB durch einen großflächigen Kontakt der Endlagerbehälter mit dem Gebirge die Einhaltung der 200°C Auslegungstemperatur möglich ist. Um diesen Kontakt herzustellen, sollen die TLB in kurzen horizontalen Bohrlöchern senkrecht zum Streckenstoß eingelagert werden. Der verbleibende Ringraum wird mit Salzgrus versetzt. Infolge der Gebirgskonvergenz kompaktiert der Versatz und der TLB wird damit vollständig vom Gebirge umschlossen. Somit wird ein direkter Einschluss der Endlagerbehälter im Salzgestein erreicht. Die benötigte Technik für den Transport und die Einlagerung selbst wurde im Rahmen der Machbarkeitsstudie an die veränderten Anforderungen angepasst.

Die bisherigen Untersuchungen zur Endlagerung von TLB konzentrierten sich auf die technische Machbarkeit des Transport- und Einlagerungskonzeptes. Mit den veränderten Sicherheitsanforderungen ist auch für diese Einlagerungsvariante die Einbindung der Rückholungsanforderung notwendig. Im Rahmen der VSG (GRS, 2012) wurde dafür erstmals ein mögliches Rückholungskonzept skizziert. Nach diesem Konzept sollen die TLB mit Hilfe der Re-Mining-Strategie zurückgeholt werden. Die Entnahme der Endlagerbehälter aus dem Gebirge ist im vorläufigen Konzept über Rückholungstrecken parallel zur Behälterachse vorgesehen. Im Gegensatz zur Einlagerung liegen die Rückholungstrecken dann nicht mehr querschlägig zwischen den Zugangstrecken, sondern parallel zu diesen. Für die Aus- und Vorrückung der Einlagerungsfelder sind dann zusätzliche Querschläge nötig, von denen aus die Rückholungstrecken die Endlagerbehälter erschließen. Die DBE TECHNOLOGY GmbH formulierte entsprechend den Erkenntnissen aus dem FuE-Vorhaben "ASteRix" (DBE TEC, 2014a) zusätzliche Anforderungen an das Rückholungskonzept und mögliche Anpassungen des Einlagerungskonzeptes sowie der entsprechenden Technik.

Die wesentlichen technischen Herausforderungen im Umgang mit den TLB sind die Handhabung der bis zu 160 t schweren Endlagerbehälter sowohl bei der Einlagerung als auch der Rückholung und der Umgang mit dem Wärmeeintrag ins Gebirge. Wie auch die Streckenla-

gerung von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern, ist die TLB-Einlagerung durch die Einlagerung der Endlagerbehälter im Niveau der Einlagerungssohle gekennzeichnet. Der Wärmeeintrag der Endlagerbehälter führt nach der Einlagerung zunächst im Nahfeld und später auch im weiteren Umfeld der Behälter zu einer deutlichen Erhöhung der Gebirgstemperatur. Die gegenwärtige Endlagerauslegung berücksichtigt dabei eine maximale Auslegungstemperatur von 200°C.

Wie bereits in Abschnitt 3 für die Streckenlagerung von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern beschrieben wurde, können infolge der Auslegungstemperatur von 200°C nicht während des gesamten Rückholungszeitraums geomechanisch und klimatisch/wettertechnisch beherrschbare Bedingungen innerhalb der Einlagerungsfelder garantiert werden. Für die Streckenlagerung von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern scheint daher eine Optimierung der thermischen Endlagerauslegung notwendig. Diese könnte sich auf die Maßnahme der Vergrößerung der Abstände der Endlagerbehälter zueinander stützen oder die Beladung der Endlagerbehälter und damit ihren Wärmeeintrag ins Gebirge verringern. In beiden Fällen würde sich die Endlagerfläche vergrößern, im ersten Fall aufgrund der Abstände, im zweiten aufgrund einer höheren Anzahl an Endlagerbehältern.

Da bei der Einlagerung der TLB ähnliche Bedingungen zu erwarten sind, sollte zur Erleichterung der Rückholbarkeit auch für diese Einlagerungsvariante eine Optimierung der thermischen Auslegung erfolgen. Dabei können grundsätzlich die gleichen Lösungsstrategien wie für den POLLUX<sup>®</sup>-Behälter verfolgt werden.

Für eine zukünftige Weiterentwicklung des Rückholungskonzeptes erscheinen folgende Ansätze plausibel:

- A) Der direkte Einschluss der TLB verhindert während der Rückholung ein Herausziehen dieser aus dem früheren Bohrloch. Im Zuge der Rückholung müssen die TLB somit möglichst vollständig freigelegt und mit einer geeigneten technischen Vorrichtung aus den Strecken entfernt werden. Die vollständige Freilegung entspricht dem Rückholungskonzept der Streckenlagerung von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern. Die große Behältergeometrie erfordert entsprechend große Streckenquerschnitte zur Handhabung der TLB. Eine Adaption des dreiteiligen Auffahrungsschemas der Streckenlagerung ist stets mit deutlich größeren Querschnitten der Teil- und Rückholungsstrecken (vgl. Abbildung 5-1) sowie der Neuentwicklung einer Rückholungsvorrichtung verbunden. Das Sohlniveau der Rückholungstrecke kann dabei über dem Einlagerungsniveau liegen. Nach der erfolgten Rückholung könnten alle Einbauten des früheren Einlagerungsbohrloches zurückgebaut werden. Es würden somit keine Einbauten im geräumten Endlager verbleiben.

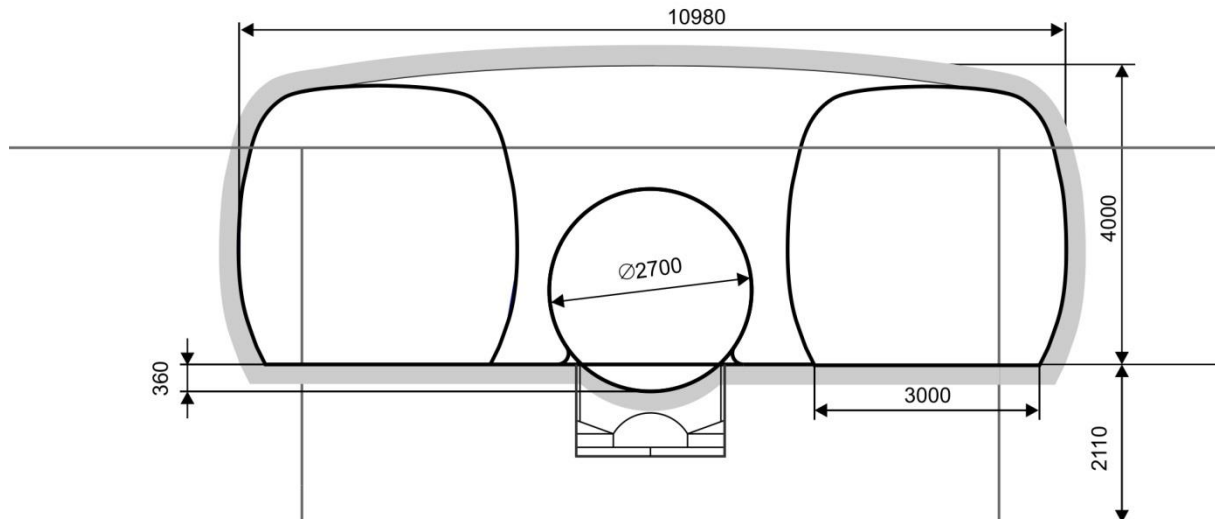


Abbildung 5-1: Skizze Rückholungsstrecke senkrecht zur Einlagerungsstrecke

- B) Eine andere denkbare Rückholungsvariante bildet die weitgehende Umkehrung des Einlagerungsvorganges. Dies entspricht dem Rückholungskonzept der vertikalen Bohrlochlagerung. Die Neuauffahrung der alten Einlagerungsstrecken ist grundsätzlich möglich. Um das Herausziehen der Endlagerbehälter aus den früheren Bohrlöchern zu ermöglichen, muss ähnlich der Bohrlochlagerung eine konzeptionelle Anpassung der kurzen horizontalen Bohrlöcher erfolgen. Der direkte Einschluss der Endlagerbehälter muss durch eine Verrohrung unterbrochen werden. Ebenso denkbar wäre ein zusätzlicher Overpack um den Endlagerbehälter. Dieser müsste über Tage an die TLB angebracht werden und würde die Gesamtmasse weiter erhöhen. Die zusätzlichen Komponenten würden nach der Rückholung im Endlager verbleiben.

Das vollständige Freilegen der TLB und auch der Einbau einer Verrohrung scheinen grundsätzlich technisch machbar. Unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse zur Rückholbarkeit der Einlagerungsvarianten der Strecken- und Bohrlochlagerung sind aber auch verschiedene Vor- und Nachteile erkennbar.



## 6 Rückholbarkeit bei der horizontalen Streckenlagerung im Tongestein

Basierend auf dem Endlagerkonzept "Horizontale Streckenlagerung" und den dafür bestehenden Überlegungen zur Rückholung werden nachfolgend die Ergebnisse vertiefender Untersuchungen zur Rückholung zusammengefasst. Detaillierte Beschreibungen dazu sind im technischen Bericht "Technische Konzepte für die Rückholung der Einlagerungsvariante horizontale Streckenlagerung in Tongesteinsformationen" (BGE TEC, 2018c) zu finden. Die Untersuchungen umfassen neben dem Betriebsablauf und dem Rückholungsablauf auch das Automatisierungspotenzial bei der Rückholung und die Durchführung einer Betriebsstörungsanalyse und eine Beurteilung der Übertragbarkeit des gleislosen Transportes auf die Einlagerung. Des Weiteren werden die durchgeführten Arbeiten zur Berechnung der Standicherheit der Rückholungsstrecken, das Bewitterungskonzept sowie die Klimavorausberechnungen und der Umgang mit dem Ausbau beschrieben. Abschließend werden die Arbeiten zum Verschluss und zum Umgang mit dem geräumten Endlager, sowie die Zeit- und Kostenschätzung zusammengefasst.

### 6.1 Einlagerungskonzept

Bei der Streckenlagerung im Tongestein ist es vorgesehen, die ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren und die CSD-V in POLLUX<sup>®</sup>-3 Behälter einzulagern. Die CSD-B und CSD-C sollen in POLLUX<sup>®</sup>-9 Behälter und die Brennelementstrukturteile in Gussbehälter Typ II (MOSAIK<sup>®</sup>) eingelagert werden. Die ausgedienten Brennelemente aus den Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren wurden bislang bei den Einlagerungsvarianten im Tongestein nicht berücksichtigt.

Das Einlagerungskonzept der horizontalen Streckenlagerung wurde im FuE-Projekt ANSICHT (DBE TEC, 2016) für die Konzeption eines Endlagers innerhalb des Referenzmodells SÜD genutzt. Das Wirtgestein in der Referenzregion SÜD ist der Opalinuston, der eine Mächtigkeit von 100 m bis 130 m aufweist. Das Endlagerkonzept sieht als Zugang zwei Schächte vor; ein Schacht für den Behältertransport und als ausziehender Wetterschacht sowie ein Schacht für die konventionelle Förderung und als einziehender Wetterschacht. Das Grubengebäude besteht aus einem schachtnahen Infrastrukturbereich und zwei Einlagerungsbereichen (einer für ausgediente Brennelemente und einer für Wiederaufarbeitungsabfälle), die durch Richtstrecken mit den Schächten verbunden sind. Der Zugang von den Richtstrecken zu den Einlagerungsfeldern erfolgt über Querschläge. Die Einlagerungsstrecken für Brennelemente und Wiederaufarbeitungsabfälle zweigen von den Querschlägen ab, sind als Blindstrecken ausgeführt und haben eine Streckenlänge von 400 m (DBE TEC, 2016). In den Einlagerungsstrecken werden die Endlagerbehälter entsprechend einer hexagonalen Anordnung versetzt positioniert, so dass die Strecken abwechselnd 17 und 16 POLLUX<sup>®</sup>-Behälter enthalten. Alle POLLUX<sup>®</sup>-Behälter werden auf einem Sockel aus vorgefertigtem, kompaktierten Ton abgelegt. Die Einlagerung erfolgt gleisgebunden. Der verbleibende freie Streckenquerschnitt wird im Anschluss an die Einlagerung mit einem Granulat aus aufbereitetem Tongestein aus der Auffahrung versetzt. Einlagerung und Versatz erfolgen dabei stets im Wechsel.

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

Die vollständig versetzten Einlagerungsstrecken werden nicht gesondert verschlossen. Erst in den Zugangstrecken/Querschlägen werden zwischen den Hauptstrecken und den Einlagerungsstrecken sogenannte Migrationssperren errichtet. Die Querschläge werden, wie auch die Einlagerungs- und Hauptstrecken, mit einem arteigenen, aufbereiteten Tongesteinsgranulat versetzt. Zum Infrastrukturbereich hin werden zusätzliche Streckenverschlüsse errichtet.

## 6.2 Rückholungskonzept

Die Rückholung beginnt nach der Einlagerung aller Endlagerbehälter und dem Versatz bzw. der Verfüllung der Strecken. In Anlehnung an die drei Hauptprozesse des Einlagerungsbetriebes – Einlagerung, Versatz, Verfüllung – wird der Rückholungsprozess in die drei wesentlichen Teilschritte Neuauffahrung, Freilegen des Behälters und Entnahme der Endlagerbehälter unterteilt.

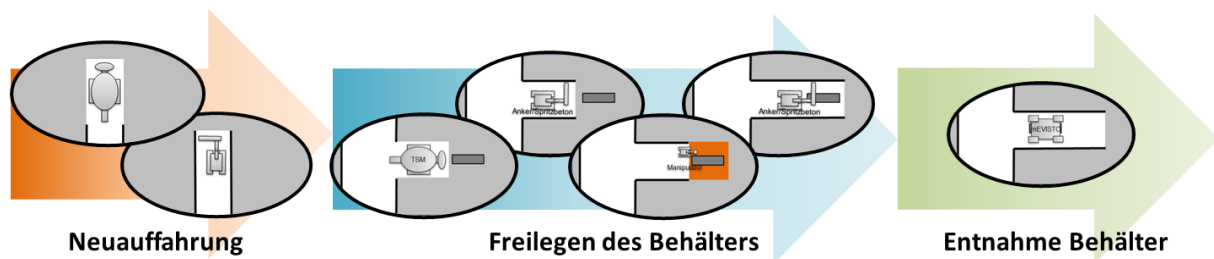


Abbildung 6-1: Schematische Darstellung des Rückholungsablaufes

Die Neuauffahrung soll entlang des alten Streckenverlaufs erfolgen. Die erneute Auffahrung unterscheidet sich deutlich von den Tätigkeiten während des Einlagerungsbetriebes. Die Neuauffahrung hat zum Ziel, den Versatz aus dem Streckenquerschnitt zu entfernen und parallel dazu die Stabilität des Hohlraums wieder herzustellen. Neben den Gebirgseigenschaften sind auch die geomechanischen Eigenschaften des Versatzes und des Ausbaus zu beachten. Die Auffahrung der Strecken erfolgt gebirgsschonend mit TSM. Ein regelmäßiger Ausbau der Strecken ist unerlässlich. Für die Neuauffahrung von Grubenräumen kann die Vortriebstechnik (TSM) analog zum Einlagerungsbetrieb genutzt werden. Für die Aufwältigung verfüllter Strecken scheinen TSM dagegen deutlich ungeeigneter. Für die Aufwältigung der verfüllten Strecken wird der Einsatz von Tunnelbaggern als Vorzugsvariante definiert.



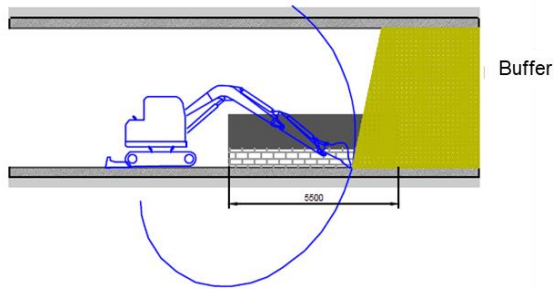
Für die Dimensionierung des Ausbaus ist zu evaluieren, welche zusätzlichen Anforderungen aus der Rückholbarkeit an diesen gestellt werden. Der Ausbau eines Grubenbaus wird für die Betriebszeit der Einlagerung ausgelegt. Bei einer spätesten möglichen Entscheidung zur Rückholung, also gegen Ende der Betriebszeit, ist nicht davon auszugehen, dass der Ausbau noch ausreichend tragfähig ist. Gleichwohl ist eine Resttragfähigkeit zu erwarten. Die Neuauffahrung entspricht im Wesentlichen der Entnahme des Versatzes. Parallel dazu ist der Zustand des Ausbaus zu prüfen und dieser instand zu setzen bzw. zu ertüchtigen.

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

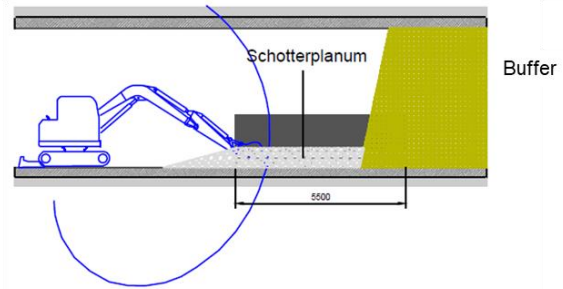
Im Zuge der Neuauffahrung der Hauptstrecken sollen die insgesamt acht Streckenverschlüsse am Übergang vom Infrastrukturbereich zu den Einlagerungsbereichen umfahren werden. Für die Umfahrung steht an den Verschlussstandorten ausreichend Platz zur Verfügung. Im Fall der Migrationssperren ist die Umfahrung aufgrund der limitierten Platzverhältnisse nicht möglich. Mit einer Anpassung der Vortriebstechnologie wäre eine Durchörterung der Verschlussbauwerke prinzipiell möglich. Eine weitere Möglichkeit wäre der Rückbau der Migrationssperren.

Es ist vorgesehen, den Endlagerbehälter bei der Rückholung komplett freizulegen, was ggf. mit einer deutlichen Vergrößerung des Streckenquerschnittes einhergeht. Bei der Gestaltung der Rückholungstrecken müssen neben betrieblichen auch geomechanische Aspekte beachtet werden, um die Hohlraumstabilität zu gewährleisten. Eine unzureichende Dimensionierung kann zum Verlust der Hohlraumstabilität bis hin zu einer Beeinträchtigung der Gebirgsintegrität führen.

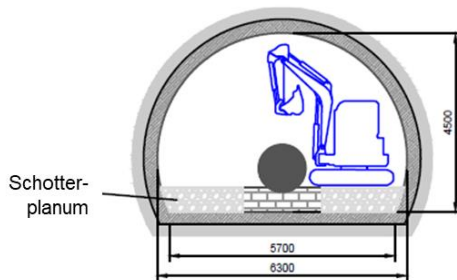
Schritt 1: Lösen und Fördern des Buffers durch einen Bagger, Seitenansicht der Einlagerungsstrecke



Schritt 2: Aufschütten eines Schotterplanums durch den Bagger, Seitenansicht der Einlagerungsstrecke



Schritt 3: Bagger auf Schotterplanum, Querschnitt der Einlagerungsstrecke



Querschnitt der Einlagerungsstrecke mit lichtem Querschnitt der modifizierten Einlagerungsvorrichtung

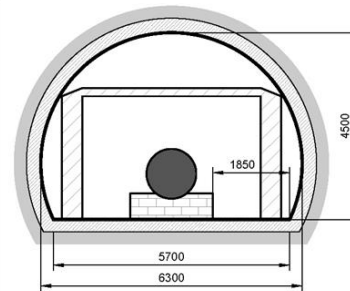


Abbildung 6-2: Teilschritte zur Freilegung der Endlagerbehälter und Querschnitt der Rückholungsstrecke

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

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

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

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

Die Neuauffahrung findet vom Querschlag aus bis an den ersten Endlagerbehälter heran und zwischen den Endlagerbehältern statt. Da Neuauffahrung und Rückholung im steten Wechsel stattfinden, sollte keine kontinuierliche Fördereinrichtung in der Rückholungsstrecke errichtet werden. Das Haufwerk (der gelöste Versatz) kann mit Fahrladern aufgenommen, bis zu einer Übergabestation transportiert und in den Hauptstrecken über eine Bandanlage gefördert werden.

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

Das Freilegen des Endlagerbehälters geschieht in vier Schritten mittels eines Hydraulikbaggers. Im ersten Schritt entfernt ein Hydraulikbagger, der mit einem möglichst langen Ausleger ausgestattet ist, von einer Position vor dem Endlagerbehälter so viel von dem Buffer wie möglich. Dabei schafft es die Grabkurve des Baggers nicht, den gesamten Endlagerbehälter freizulegen. Aus diesem Grund wird im zweiten Schritt im freigelegten Teil der Strecken und seitlich neben dem Endlagerbehälter ein temporäres Arbeitsplanum aus Schotter errichtet, höhengleich mit der Oberkante des Sockels, auf dem der Endlagerbehälter liegt. Im dritten Schritt fährt der Bagger aus der Strecke heraus auf das Planum und kann von dieser Position aus den übrigen Buffer auf der Rückseite des Endlagerbehälters entfernen. Im vierten Schritt entfernt der Hydraulikbagger das erstellte Schotterplanum. Nach Abschluss der vier Schritte liegt der Endlagerbehälter frei auf seinem Sockel. Die Detektion des Endlagerbehälters kann wie im Abschnitt 3.3.2 beschrieben erfolgen.

Die Aufnahme des Endlagerbehälters erfolgt mit einer modifizierten Einlagerungsvorrichtung (mELVIS), vgl. dazu Abschnitt 3.3.4. Für eine Rückholung im Tongestein ist die modifizierte Einlagerungsvorrichtung an die Geometrie und Masse der POLLUX<sup>®</sup>-3 Behälter anzupassen.

### **6.3 Umgang mit dem Ausbau**

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

auch Tunnelbagger sind geeignet. Dies kann zu deutlich variierenden Vortriebleistungen führen.

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

Parallel zur Wiederauffahrung der Strecken ist die Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit des Ausbaus zu bewerten und dieser entsprechend zu ertüchtigen. Die Entnahme geschädigter Bereiche kann für kleine Flächen mit dem Tunnelbagger erfolgen. Größere Areale können mit der TSM gewonnen werden. Für das Einbringen 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.

## **6.4 Wettertechnik und Klimavorausberechnung**

### **6.4.1 Bewetterung**

Das Grubengebäude ist durch zwei Schächte mit der Tagesoberfläche verbunden. Der Haufwerkstransportschacht ist einziehender Frischwetterschacht und der Behältertransport-schacht ist ausziehender Abwetterschacht. Die Wetterbewegung wird durch einen Grubenlüfter am ausziehenden Schacht erzeugt. Sämtliche Einlagerungsfelder des Endlagers sind an jeweils 3 Hauptstrecken angeschlossen. Während des Einlagerungsbetriebes dienen die Hauptstrecken für den Haufwerkstransport (ÜB) und für den Behältertransport (KB) als Frischwetterzubringer für die aktiven Betriebspunkte. Die Abwetter aller Betriebspunkte gelangen über die Querschläge in die gemeinsamen Abwetterstrecken (KB) und werden dort dem Behältertransport-schacht zugeführt. Schachtseitige Querschläge sind zur Vermeidung von Wetterkurzschlüssen mit entsprechenden Wetterbauwerken verschlossen (Dämme, Wettertore oder Wetterschleusen). Um die Offenstandszeiten der Einlagerungsstrecken gering zu halten, werden die Einlagerungsstrecken nach Bedarf, d. h. in Spätestlage zu ihrer Nutzung, aufgefahren. Auch während der Rückholung wird das Bewetterungskonzept des Einlagerungsbetriebes umgesetzt, und es erfolgt eine bedarfsgerechte Auffahrung der Rückholungsstrecken.

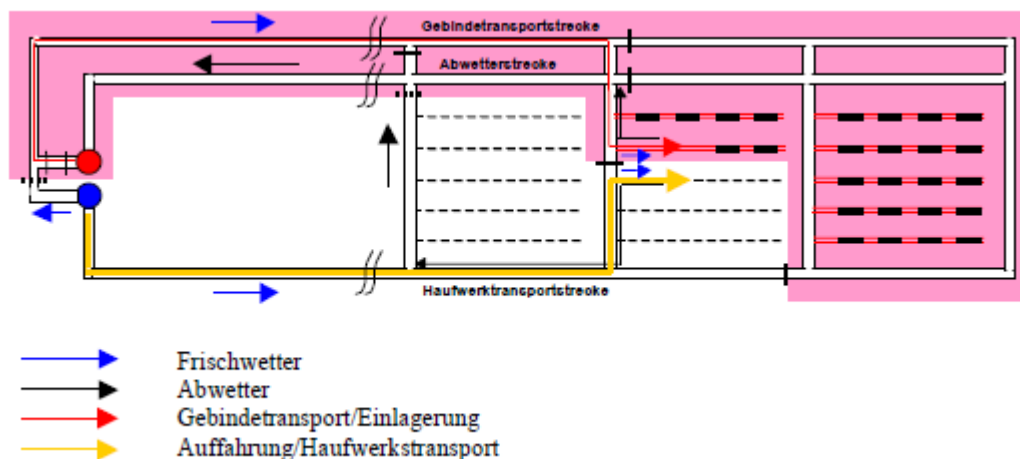


Abbildung 6-3: Schematische Darstellung des Bewetterungskonzeptes für die Streckenlagerung während der Einlagerung (DBE TEC, 2010b)

#### 6.4.2 Temperaturberechnungen und Klimavorausberechnung

Für die Abschätzung der Temperaturentwicklung im Grubengebäude des Endlagerkonzeptes der Streckenlagerung im Tongestein kann auf Modellrechnungen aus dem FuE-Projekt AN-SICHT (DBE TEC, 2015) zurückgegriffen werden. Das Endlagerkonzept berücksichtigt eine Auslegungstemperatur von 150°C.

Nach der Einlagerung steigt die Temperatur am Endlagerbehälter sehr schnell an. Die maximale Auslegungstemperatur am Endlagerbehälter wird innerhalb der Betriebszeit erreicht und sinkt danach langsam ab. Innerhalb des Querschnitts der Einlagerungsstrecken ist das Temperaturprofil durch steile Gradienten geprägt. Am Stoß werden im Rückholungszeitraum Temperaturen bis 105°C erwartet. Das Temperaturmaximum tritt hier aber erst am Ende des möglichen Rückholungszeitraums auf. Die Gebirgsbereiche zwischen den Einlagerungsstrecken werden im Zeitraum bis 80 Jahre nach der Einlagerung auf ca. 95°C erwärmt. Zu den Endlagerbehältern hin steigt die Temperatur stetig an. In den Versatzbereichen zwischen zwei Endlagerbehältern steigt die Temperatur innerhalb von 80 Jahren ebenfalls bis auf ca. 100°C. Mit Hilfe der durchgeführten Berechnungen lassen sich die Temperaturen im gesamten Endlager ermitteln.

In einem Endlager im Tongestein ist mit Zutritt von Porenwasser aus dem Gebirge zu rechnen, das als Feuchtequelle die Eigenschaften der Wetter und damit die klimatischen Bedingungen im Grubengebäude beeinflusst. Im Zuge der Auffahrungen wird das Wirtsgestein entsättigt. Der Wetterstrom nimmt Teile des Porenwassers auf. 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 Langzeitate des Zutritts unterschieden. Zeitlich findet die kurzzeitige Zutrittsrate nur im Zeitraum zwischen der Auffahrung und dem Einbringen des Ausbaus Anwendung. Räumlich wird die kurzzeitige Zutrittsrate auf den Bereich zwischen der Ortsbrust und dem Austritt der Sonderbewetterung

berücksichtigt. Innerhalb aller ausgebauten Strecken wird die Langzeittrittsrate berücksichtigt.

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.

Für die Einlagerungsvariante der horizontalen Streckenlagerung im Ton sind aus dem FuE-Projekt ANSICHT (DBE TEC, 2016) das generische Endlagerlayout, Einlagerungskonzept und erste vorläufige Auslegungsberechnungen zur Temperaturverteilung im Grubengebäude bekannt. Aufbauend auf diesem Kenntnisstand wurden erste vereinfachte Modelle zur Klimavorausberechnung erstellt. Ziel war es, die Umgebungsbedingungen während des Rückholungsbetriebes abzuschätzen. Dazu wurden vorläufige Streckenquerschnitte erstellt und ein Bewetterungssystem angepasst an die Betriebspunkte simuliert.

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

## **6.5 Umgang mit dem geräumten Endlager**

Die im Abschnitt 3.7 genannten Aspekte zum Umgang mit dem geräumten Endlager gelten ebenso für die Einlagerung und Rückholung für die horizontale Streckenlagerung im Tongestein.

## 6.6 Zeit- und Kostenschätzung

Für die Zeit- und Kostenschätzung einer potenziellen Rückholung von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern im Konzept der horizontalen Streckenlagerung wird ein zweigeteilter Ansatz verfolgt. Aufgrund der Einzigartigkeit der Anforderung einer Rückholbarkeit erfolgt die Zeitermittlung für die Rückholung über eine Abschätzung der notwendigen Teilprozesse. Bestehende Unwägbarkeiten finden durch entsprechende Annahmen Berücksichtigung. Ergänzend zu dieser Zeitschätzung soll der Aufwand für den Betrieb des Rückholungsbergwerkes anhand bestehender Planungen anderer Endlagerprojekte und hier besonders der Tagesanlagen erfolgen.

Die Auffahrung der Hauptstrecken und Querschläge soll möglichst zügig umgesetzt werden. Die Errichtung der zwei Behältertransportstrecken, vier Abwetterstrecken und aller Querschläge kann mit leistungsstarker Vortriebstechnik an drei Betriebspunkten und in einem Mehrschichtsystem innerhalb von ca. fünf Jahren erfolgen. Die drei Frischwetterstrecken im ÜB werden separat aufgefahren. Dazu wird bei zwei Betriebspunkten eine Dauer von ca. 3,5 Jahren abgeschätzt. Ein Gleisbau ist nur in den Behältertransportstrecken nötig. Die Dauer des Gleisbaus wird auf ca. 2 Jahren abgeschätzt. Mit vier unabhängigen Vortrieben kann die Auffahrung aller Teilstrecken innerhalb von ca. 24 Jahren erfolgen. Für die Rückholung aller eingelagerten Endlagerbehälter wird in Summe eine reine Betriebsdauer von ca. 35 Jahren abgeschätzt. Vorlaufende Arbeiten, wie Planung, Genehmigung oder Errichtung neuer Anlagen, genauso wie nachgeschaltete Arbeiten (z. B.: Verschluss) sind dabei nicht berücksichtigt.

Die Kosten werden für die gesamte Betriebsdauer unter Berücksichtigung der Kosten für die Auffahrungen, für die Erkundung, für die Herrichtung der Bohrlöcher, für die konkrete Durchführung der Rückholung, für den Versatz, für die Kühlung bzw. Bewetterung, für die Unterhaltung und den Betrieb der gesamten Anlage zusammen mit den Anschaffungskosten, den Wartungskosten und den Personalkosten auf ca. 58 Mio. € jährlich und 2,0 Mrd. € insgesamt abgeschätzt.





## **7 Rückholbarkeit vertikale Bohrlochlagerung im Tongestein**

Basierend auf dem Endlagerkonzept "Vertikale Bohrlochlagerung" und den dafür bestehenden Überlegungen zur Rückholung werden nachfolgend die Ergebnisse vertiefender Untersuchungen zur Rückholung zusammengefasst. Detaillierte Beschreibungen dazu sind im technischen Bericht "Technische Konzepte für die Rückholung der Einlagerungsvariante vertikale Bohrlochlagerung in Tongesteinsformationen" (BGE TEC, 2018d) zu finden. Die Untersuchungen umfassen neben dem Betriebsablauf und dem Rückholungsablauf auch das Automatisierungspotenzial bei der Rückholung und die Durchführung einer Betriebsstörungsanalyse und eine Beurteilung der Übertragbarkeit des gleislosen Transportes auf die Einlagerung. Des Weiteren werden die durchgeführten Arbeiten zur Berechnung der Standsicherheit der Rückholungsstrecken, das Bewetterungskonzept sowie die Klimavorausberechnungen und der Umgang mit dem Ausbau beschrieben. Abschließend werden die Arbeiten zum Verschluss und zum Umgang mit dem geräumten Endlager, sowie die Zeit- und Kostenschätzung zusammengefasst.

### **7.1 Einlagerungskonzept**

Im Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung im Tongestein ist vorgesehen, die wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und die ausgedienten Brennelemente in den gleichen Brennstabkokillen zu verpacken und einzulagern, analog dem Vorgehen im Salz (vgl. dazu Abschnitt 4.1). Aufgrund der niedrigeren Auslegungstemperatur im Tongestein ist die Beladung der BSK aber geringer als im Salz.

Das Endlagerbergwerk wird durch eine zentrale Doppelschachtanlage mit der Oberfläche verbunden. Im schachtnahen Bereich werden Infrastrukturräume errichtet, von denen aus Hauptstrecken zwei separate Einlagerungsbereiche mit je vier Reihen von Einlagerungsfeldern erschließen. Die beiden Einlagerungsbereiche sind nach Brennelementen (Kurzbezeichnung BE) und wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen (Kurzbezeichnung HAW) getrennt. Jede Reihe der Einlagerungsfelder ist durch eine Behältertransport-, eine Frischwetter- und eine Abwetterstrecke erschlossen. Querschläge verbinden alle drei Hauptstrecken mit den Bohrlochüberfahrungsstrecken. Die Bohrlochüberfahrungsstrecken liegen durchschlägig zwischen zwei Querschlägen und verlaufen parallel zu den Hauptstrecken. Die Bohrlochüberfahrungsstrecken werden nach und nach im Zuge des Einlagerungsprozesses im Rückbau aufgefahren. Die Einlagerung beginnt in den Bohrlochüberfahrungsstrecken des Querschlags der am weitesten vom Schacht entfernt ist und 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.

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.

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 in der ELV bei gleichbleibender Geometrie der Einlagerungsstrecke. Nach dem Abteufen des Bohrlochs erfolgt das Einbringen einer äußeren, perforierten Verrohrung zur Gewährleistung der Bohrlochstabilität. Zur Verzögerung möglicher Fluidzutritte aus dem Gebirge zu den Endlagerbehältern wird im Bohrloch ein Tonbuffer in Form vorkompakter Tonscheiben 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.

Die Einlagerungstechnik ist identisch mit der Technik für die Bohrlochlagerung im Salz (siehe Abschnitt 4.2). Nach erfolgter Einlagerung von drei BSK wird der Innenliner mit einem Deckel und das Bohrloch mit einem Bentonitelement und einem Betonwiderlager verschlossen.

## 7.2 Rückholungskonzept

Bei einer Rückholung sollen die eingelagerten Kokillen in Umkehrung des Einlagerungsprozesses aus dem Bohrloch entnommen 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.

Im bestehenden Einlagerungskonzept aus ANSICHT (DBE TEC, 2015) wird kein ewG ausgewiesen. Die Festlegung eines ewG ist nur nach einer Sicherheitsanalyse möglich. Die im Punkt 8.2 der Sicherheitsanforderungen formulierte Auslegungsanforderung einer minimalen Durchörterung des ewG kann daher nicht abschließend beurteilt werden. Es ist aber zu erkennen, dass diese Anforderung nur bedingt erfüllt wird. 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 wie möglich minimiert. Für eine mögliche Rückholung soll dieses Grundkonzept des Grubengebäudes beibehalten werden. Für das bisherige Behälterkonzept der BSK wurde nicht untersucht, inwieweit die Auslegungsanforderung der Handhabbarkeit der Abfallbehälter für einen Zeitraum von 500 Jahren erfüllt ist. Auch die Umsetzung der im Punkt 8.6 der Sicherheitsanforderungen gestellten Anforderung der Rückholbarkeit der Endlagerbehälter während der Betriebszeit ist in ANSICHT (DBE TEC, 2015) knapp beschrieben. Die Erarbeitung eines geeigneten Rückholungskonzeptes ist Gegenstand des vorliegenden FuE-Projektes.

Für die Rückholung der eingelagerten Endlagerbehälter ist die Neu- bzw.- Wiederauffahrung aller bereits verfüllten Zugangsstrecken notwendig. 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 Bohrlochschleuse erneut auf diesem installiert werden. Die Entnahme des Sandversatzes und der Kokillen soll in Umkehrung des Einlagerungsvorganges und mit der gleichen Einlagerungstechnik erfolgen. Dazu wird die Einlagerungsvorrichtung (ELV) über dem Bohrloch positioniert. Mittels einer Saugvorrichtung soll das Verfüllmaterial (Sand) schrittweise aus dem Bohrloch entfernt werden, vgl. Abschnitt 4.2.3. Das Versatzmaterial ist auf eventuell vorhandene Kontaminationen hin zu überprüfen und abzutransportieren. Ist der Kopf der obersten Kokille freigelegt, wird mit der ELV ein leerer Transferbehälter auf der Bohrlochschleuse 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 Tragpilz der rückholbaren Kokille an und zieht diese in den selbstabschirmenden Transferbehälter. Der Transferbehälter wird anschließend verschlossen, in eine liegende Position gedreht und auf einen Plateauwagen abgeladen. Der beladene Plateauwagen wird mit dem gleisgebundenen Transportsystem von der Bohrlochüberfahrungsstrecke über die Behältertransportstrecke bis zum Förderschacht und von dort aus nach über Tage transportiert. Die Arbeitsschritte zur Entnahme des Sandversatzes und der Rückholung der Kokille werden solange wiederholt bis das Bohrloch komplett geräumt ist.

### **7.2.1 Umgang mit dem Ausbau**

Die geomechanischen Eigenschaften des Tongesteins erfordern die Errichtung eines Ausbaus in allen Grubenbauen. Zur Gewährleistung der betrieblichen Sicherheit ist ein zuverlässig funktionsfähiger Ausbau erforderlich, mit einer Lebensdauer über die gesamte Endlagerbetriebszeit von mehreren Jahrzehnten. 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 den Nachweis der Langzeitsicherheit und auch die Rückholung ist ein verbleibender Ausbau aber eher hinderlich. Mit Blick auf die betriebliche 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 sowie 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.

Eine Entnahme des Ausbaus vor dem Versetzen der Strecken würde zwar den Zielkonflikt zur Langzeitsicherheit entschärfen, ist aber mit hohen Risiken für die 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 der Strecken sind die Eigenschaften des Versatzkörpers, des Ausbaus und des Wirtsgesteins zu beachten. Alle drei Materialien weisen 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 aus den versetzten Strecken entfernt und parallel dazu die Stabilität des Hohlraums hergestellt. Es gibt dabei drei unterschiedliche Wege mit dem vorhandenen Ausbau umzugehen. Zum einen kann der Ausbau für die Einlagerungsphase dimensioniert und nach der Neuauffahrung ertüchtigt werden, zum zweiten kann der Ausbau nach der Einlagerung geraubt und nach der Wiederauffahrung ein neuer Ausbau eingebaut werden. Zum dritten könnte der Ausbau für eine maximale Betriebszeit (Einlagerung und Rückholung) dimensioniert werden.

Bei der Ertüchtigung des Ausbaus beschränkt sich die Neuauffahrung im Wesentlichen auf die Versatzentnahme. Danach wird der Ausbau geprüft und ggf. instandgesetzt. Bei dieser Instandsetzung kann es passieren, dass sich der Streckenquerschnitt so weit minimiert, dass es zu Beeinträchtigungen der Fahrwege für die benötigten Maschinen kommt.

Beim Rauben des Ausbaus und beim Einbau nach der Wiederauffahrung ist die Entnahme und ggf. ein Überschneiden des alten Ausbaus nötig. Damit muss für die Auffahrung aller Strecken eine geeignete Technik zur Versatzentnahme und zum Überschneiden bereitgehalten werden. Die zeitgleiche Entnahme von quasi losem Versatz und festem Betonausbau stellt hohe und 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. 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. 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. Je länger der Ausbau seine Tragfähigkeit erhalten 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 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 verstärken.

Von den drei genannten Varianten zum Umgang mit dem Ausbau wird Variante 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.

### **7.2.2 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. Alle Streckenverschlüsse bestehen aus Betonwiderlagern und Bentonit-Dichtelementen. Sie unterscheiden sich in Anordnung und Anzahl der einzelnen Elemente.

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 aufgefahren.

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. In beiden Fällen müsste das gegenwärtige Grubengebäudelayout des Einlagerungsbetriebes durch eine Verlängerung der Querschläge angepasst werden. Dadurch entsteht ausreichend Raum für die alternative Streckenführung unter Einhaltung des notwendigen Sicherheitspfeilers/-abstandes. Dies würde zu einer Vergrößerung des Grubengebäudes führen und steht damit im Widerspruch zu der Forderung nach Minimierung der Hohlräume gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU (BMU, 2010) und wird daher nicht weiter betrachtet.

### **7.2.3 Versatzentnahme und Neuauffahrung**

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

Für die Aufwältigung der verfüllten Strecken wird der Einsatz von Tunnelbaggern als Vorzugsvariante definiert. 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 des Ausbaus kann für kleine

Flächen mit dem Tunnelbagger erfolgen. Größere Areale können mit der TSM gewonnen werden. Für das Einbringen 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.

#### **7.2.4 Freilegen des Bohrloches**

Nach der Einlagerung der Endlagerbehälter werden die Bohrlochschleuse und der obere Teil des Innenliners entfernt. Es folgt die Errichtung des Bohrlochverschlusses. Vor der eigentlichen Rückholung der Endlagerbehälter (deren aktive Entnahme) muss der Bohrlochverschluss entfernt, die Verrohrung geöffnet und die Bohrlochschleuse erneut aufgesetzt werden.

Die Lagebestimmung des Bohrlochkellers erfolgt zunächst rein optisch. Die Betonverfüllung ist deutlich vom geschlossenen Streckenausbau zu unterscheiden. Vorauseilend 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 potenzielle Kontaminationen frühzeitig erkannt und entsprechende Vorsorgemaßnahmen während der weiteren Arbeiten ergriffen werden. Die Errichtung des Bohrlochkellers entspricht der Entnahme des Betonwiderlagers. Nach dem Freilegen des Innenliners kann eine Beprobung des Innenraums erfolgen.

#### **7.2.5 Entnahme der Endlagerbehälter**

Der Vorgang der Entnahme der Endlagerbehälter ist identisch mit dem Rückholungsvorgang bei der Bohrlochlagerung im Salz (siehe Abschnitt 4.2.4).

### **7.3 Wettertechnik und Klimavorausberechnung**

#### **7.3.1 Bewetterung**

Das Grubengebäude ist durch 2 Schächte aufgeschlossen und wird saugend bewettert. Der Material- und Personaltransportschacht ist einziehender Frischwetterschacht und der Behältertransportschacht ist ausziehender Abwetterschacht. Das Grubengebäude besteht aus zwei Flügeln mit je vier Reihen Einlagerungsfeldern. Sämtliche Einlagerungsfelder des Endlagers sind an jeweils drei Hauptstrecken angeschlossen. Die Hauptstrecken für den Haufwerkstransport und für den Behältertransport sind Frischwetterzubringer für die Betriebspunkte im ÜB und KB. Die Abwetter von den Betriebspunkten gelangen über die angrenzenden Querschläge in die gemeinsame Abwetterstrecke und werden von dort dem Behältertransportschacht zugeführt. Schachtseitige Querschläge an bisher ungenutzten Einlagerungsfeldern sind zur Vermeidung von Wetterkurzschlüssen bis zu ihrer Nutzung verschlossen.

Das Bewetterungskonzept im Rückholungsbetrieb entspricht dem zuvor beschriebenen System aus dem Einlagerungsbetrieb.

### 7.3.2 Temperaturberechnungen und Klimavorausberechnung

Für die Abschätzung der Temperaturentwicklung im Grubengebäude des Endlagerkonzeptes der Bohrlochlagerung im Tongestein kann auf Modellrechnungen aus dem FuE-Vorhaben ANSICHT (DBE TEC, 2016) zurückgegriffen werden. Das Endlagerkonzept berücksichtigt eine Auslegungstemperatur von maximal 150°C.

Für die Bohrlöcher mit der längsten Einlagerungsdauer (ca. 40 Jahre) sind auf der Sohle der Bohrlochüberfahrungsstrecke ca. 57°C zu erwarten. 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 Endlagerbehältern hin stetig an. Das Temperaturmaximum am Innenliner wird nach ca. 40 Jahren erreicht und beträgt ca. 86°C. 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. Für die Hauptstrecken wird ebenfalls eine einheitliche Temperatur angenommen. Die Streckentemperatur in den Frischwetter- und Abwetterstrecken beträgt 43°C. Die Streckentemperatur in den Behältertransportstrecken beträgt 40°C und in den Querschlägen 45°C. Für das übrige Grubengebäude und den Einlagerungsbereich der HAW-Endlagerbehälter wird eine Erwärmung vernachlässigt. Die Temperatur ist gleich der ursprünglichen Gebirgstemperatur von 36°C.

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 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 wird in allen Streckenvortrieben angenommen. Zeitlich findet die kurzzeitige Zutrittsrate nur im Zeitraum zwischen der Auffahrung und dem Einbringen des Ausbaus Anwendung. Räumlich wird die kurzzeitige Zutrittsrate auf den Bereich

zwischen der Ortsbrust und dem Austritt der Sonderbewetterung berücksichtigt. Innerhalb aller ausgebauten Strecken wird die Langzeittrittsrate berücksichtigt.

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 durchgeführten Wetternetz- und Klimavorberechnungen basieren auf dem Einlagerungskonzept ANSICHT (DBE TEC, 2016) und den dazugehörigen numerischen Berechnungen zur Temperaturentbreitung im Gebirge. Die Wärmeverteilung im Grubengebäude wurde aus den Berechnungen abgeleitet. Aus den erstellten Modellen (vgl. Abbildung 7-1) wird deutlich, dass zur Einhaltung der vorgeschriebenen Grenztemperaturen (30°C Effektivtemperatur nach KlimaBergV) besonders in sonderbewetterten Strecken und Betriebspunkten mit einem großen Geräteinsatz zusätzliche Kühlmaßnahmen unumgänglich sind. Abweichend von der Jahresdurchschnittstemperatur (ca. 10°C) 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.

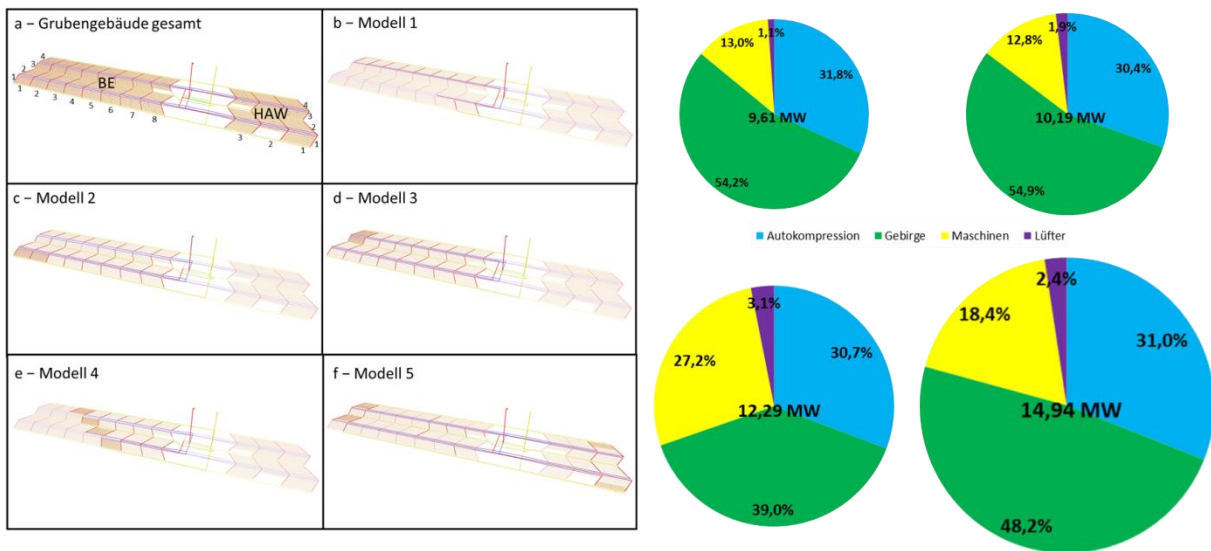


Abbildung 7-1: links: Übersicht der Teilmodelle, rechts: Energieeintrag getrennt nach Wärmequellen für Modell 2 (links oben), Modell 3 (rechts oben), Modell 4 (links unten) und Modell 5 (rechts unten), Legende: gelb-Maschinen, blau-Autokompression, grün-Gebirge, violett-Lüfter



## 7.4 Umgang mit dem geräumten Grubengebäude

Die im Abschnitt 4.4 genannten Aspekte zum Umgang mit dem geräumten Endlager gelten ebenso für die Einlagerung und Rückholung im Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung im Tongestein.

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

## 7.5 Zeit- und Kostenschätzung

Für die Zeit- und Kostenschätzung einer potenziellen Rückholung von BSK im Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung wird ein zweigeteilter Ansatz verfolgt. Aufgrund der Einzigartigkeit der Anforderung einer Rückholbarkeit erfolgt die Zeitermittlung für die Rückholung über eine Abschätzung der notwendigen Teilprozesse. Bestehende Unwägbarkeiten finden durch entsprechende Annahmen Berücksichtigung. Ergänzend zu dieser Zeitschätzung soll der Aufwand für den Betrieb des Rückholungsbergwerkes anhand bestehender Planungen anderer Endlagerprojekte und hier besonders der Tagesanlagen erfolgen.

Die Auffahrung der insgesamt 55 km Behältertransport-, Abwetter- und Frischwetterstrecken sowie der 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 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 Auffahrung ca. 32 Jahre dauert und parallel zur Rückholung umgesetzt wird. 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 Bohrlochkeller (in Summe 16,3 Jahre) und auch der Gleisbau in den Bohrlochüberfahrungsstrecken (ca. 5,5 Jahre) können in Abhängigkeit des Rückholungsfortschrittes umgesetzt werden. Die Versatzentnahme und die eigentliche Rückholung der BSK-R 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.

Die Kosten werden für die gesamte Betriebsdauer unter Berücksichtigung der Kosten für die Auffahrungen, für die Erkundung, für die Herrichtung der Bohrlöcher, für die konkrete Durchführung der Rückholung, für den Versatz, für die Kühlung bzw. Bewetterung, für die Unterhaltung und den Betrieb der gesamten Anlage zusammen mit den Anschaffungskosten, den Wartungskosten und den Personalkosten auf ca. 91 Mio. € jährlich und 3,7 Mrd. € insgesamt abgeschätzt.

## 8 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) erfolgte eine Vertiefung der Planungen zu Rückholungskonzepten. Der vorliegende Abschlussbericht fasst die Projektergebnisse für die betrachteten Einlagerungskonzepte in den Wirtsgesteinen Salz und Tongestein zusammen. Die durchgeführten Arbeiten umfassen eine Vertiefung der Betriebsabläufe im Rückholungsbergwerk, eine Konkretisierung und Weiterentwicklung der benötigten Technik, die Simulation thermo-mechanischer und thermo-dynamischer Prozesse zur Vorhersage der zu erwartenden Bedingungen im Grubengebäude und eine erste Zeit- und Kostenschätzung für die Rückholungstätigkeit.

Das Rückholungskonzept zur horizontalen Streckenlagerung in Salz und Tongestein beinhaltet die Ertüchtigung der Einlagerungstechnik, um diese auch für die Rückholung nutzen zu können. Die Anforderungen an die Technik während der Rückholung wurden formuliert. Unterschiede für eine Rückholung im Salz- oder Tongestein ergeben sich aus der unterschiedlichen Behältergeometrie und -masse. Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurde nachgewiesen, dass die Umsetzung dieser Anforderungen in Form einer modifizierten Einlagerungsvorrichtung möglich ist. Die modifizierte Einlagerungsvorrichtung basiert auf dem Hubsystem des bisherigen Prototyps zur Handhabung des POLLUX<sup>®</sup>-10 Behälters (Salz), unterscheidet sich von diesem aber durch ein gleisloses Fahrwerk und eine angepasste Behälteraufnahme. Der POLLUX<sup>®</sup>-Behälter soll bei der Rückholung an der Mantelfläche, statt an den Tragzapfen gegriffen werden. Mit Hilfe einer Betriebsstörungsanalyse wurden die Konstruktion und die Betriebsabläufe während der gleislosen Rückholung analysiert. Eine gleislose Rückholung ist grundsätzlich technisch möglich. Gleichwohl wurden verschiedene Schwachstellen des Systems und noch offener Entwicklungsbedarf identifiziert. Auch die Nutzung der modifizierten Einlagerungsvorrichtung während der Einlagerung ist grundsätzlich möglich. Für den Einsatz im Einlagerungsbetrieb sind aber weitere technische Anpassungen an der Maschine vorzunehmen.

Die Rückholung eingelagerter BSK im Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung basiert im Wesentlichen auf einer Umkehrung des Einlagerungsvorganges. Aus den Randbedingungen während der Rückholung erwachsen Anforderungen an die Rückholungstechnik. Zur Ertüchtigung des bestehenden Prototyps der Einlagerungsvorrichtung für die Rückholung wurden notwendige technische Änderungen benannt. Die Entnahme des Versatzes im Einlagerungsbohrloch stellt die wesentliche technische Herausforderung während der Rückholung dar. Im Rahmen einer ersten Machbarkeitsstudie wurde ein technisches Konzept zur Umsetzung der Versatzentnahme erarbeitet. Mit Hilfe einer speziellen Saugvorrichtung kann der Sandversatz abschnittsweise aus dem Bohrloch entfernt werden. Die Technik ist grundsätzlich in beiden Wirtsgesteinen einsetzbar.

Mit Hilfe der thermo-dynamischen und thermo-mechanischen Berechnungen konnten die Bedingungen im Grubengebäude während der Rückholung nachvollzogen werden. Die zugrundeliegenden Endlagerauslegungen mit dem Ziel einer dichtesten Lagerung der Endlagerbehälter führen besonders bei den Konzepten der Streckenlagerung in weiten Teilen der

Einlagerungsfelder zu Temperaturen nahe der Auslegungsgrenze (200°C) und sehr hohen Konvergenzen. Die Lagerorte der Endlagerbehälter und die Grubenräume liegen im gleichen Horizont und nah beieinander. Eine Auffahrung der Aus- und Vorrichtungsstrecken (Richtstrecken und Querschläge) des Rückholungsbergwerkes scheint unter diesen Bedingungen noch technisch machbar. Bei der zugrundeliegenden Endlagerauslegung mit dichtester Lagerung ist die Auffahrung der Teil- und Rückholungstrecken allerdings nicht in jedem Einlagerungsfeld uneingeschränkt möglich. Die dafür notwendigen Kühlpausen und die gerade noch zulässigen Vortriebslängen führen in Verbindung mit den hohen Gebirgskonvergenzen dazu, dass die herrschenden Umgebungsbedingungen eine gesicherte Wiederauffahrung und Rückholung praktisch unmöglich machen. In diesem Fall ist die Grubengebäudeauslegung neu zu entwickeln ohne Minimierung der erforderlichen Endlagerfläche.

Der große räumliche Abstand zwischen den eingelagerten BSK und dem Grubengebäude der Bohrlochlagerung führt zu einem zeitlich verzögerten aber stetigen Temperaturanstieg in den Bohrlochüberfahrungsstrecken. Die zugrundeliegende Auslegungstemperatur von 200°C im Salz und 150°C im Tongestein wird im Nahbereich der Bohrlöcher erreicht. Innerhalb des Grubengebäudes, mit mehreren Metern vertikalem Abstand zu den Endlagerbehältern, sind deutlich geringere Umgebungstemperaturen zu erwarten. Die Bedingungen im Grubengebäude sind mit Hilfe zusätzlicher technischer Kühlmaßnahmen beherrschbar, erfordern aber die Errichtung einer entsprechenden Infrastruktur zur Kühlung der Vortriebsstrecken. Eine weitere Optimierung der Umgebungsbedingungen während der Rückholung ist durch ein angepasstes Auffahrungsschema und Kühlpausen möglich.

Im angedachten Rückholungszeitraum, wenige Jahrzehnte nach Einlagerungsbeginn, werden die Auslegungsgrenzwerte für die Gebirgstemperaturen erreicht. Diese hohen Temperaturen sind nur mit einem erheblichen technischen Aufwand zu beherrschen. Die Errichtung eines Kühlsystems wird für den Rückholungsbetrieb und besonders die Vortriebe unerlässlich. Für den erwarteten hohen Kühlbedarf scheint eine Kühlung mit einzelnen dezentralen Anlagen wenig effektiv. Für das Rückholungsbergwerk sollte eine zentrale "Kälterzeugung" mit entsprechender Verteilung in die zu kühlenden Bereiche umgesetzt werden. Zusätzlich zur Kühlung sind auch die eingesetzten Maschinen in ihrer Auslegung an die heißen Umgebungsbedingungen anzupassen. Zum Schutz des Personals sind alle Maschinen mit klimatisierten Kabinen auszustatten. Auch in der Grube sollten klimatisierte Räume geschaffen werden. Zusätzlich sollten Arbeitsabläufe während der Rückholung soweit wie möglich automatisiert werden, um den Aufenthalt des Personals in den heißen Bereichen zu minimieren. Für die Haupttätigkeiten – Lösen, Laden, Fördern – ist dies im konventionellen Bergbau heute bereits Stand der Technik, für die Rückholung der Endlagerbehälter sind solche automatisierten Techniken noch zu entwickeln. Zusätzliche Herausforderungen werden für die Umsetzung von Nebentätigkeiten erwartet.

Zur Schaffung möglichst günstiger Umgebungsbedingungen während des potenziellen Rückholungszeitraums wurde am Beispiel der horizontalen Streckenlagerung im Salz die thermische Endlagerauslegung optimiert. Statt einer möglichst dichten Lagerung der Endlagerbehälter sollten als Optimierungsziel möglichst günstige thermo-mechanische Bedingungen im potenziellen Rückholungszeitraum angesetzt werden. Damit beeinflusst die Auslegungsanforderung einer Rückholbarkeit die Endlagerauslegung im Ganzen. Eine Anpassung

der Endlagerauslegung zur Gewährleistung der Rückholbarkeit ist mit den geltenden Sicherheitsanforderungen vereinbar, solange *"Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung oder Bergung getroffen werden, [...] die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen"* (BMU, 2010). Eine solche Beeinträchtigung, im Sinne der Beeinflussung von Komponenten, von Teilsystemen oder dem Gesamtsystem mit der Folge einer Störung ist durch entsprechende Sicherheits- bzw. Konsequenzenanalysen auszuschließen. Solange eine Beeinträchtigung aber nicht stattfindet, ist eine Abwägung der verschiedenen, sich teils entgegenstehenden, Auslegungsanforderungen möglich. Eine veränderte Endlagerauslegung mit weniger strikter Einhaltung des Minimierungsgebotes soll eine mögliche Rückholung durch die Schaffung günstiger Umgebungsbedingungen im Rückholungszeitraum erlauben. Nach StandAG § 23 (5) Mindestanforderungen sind *"in den Flächenbedarf des Endlagers [...] Flächen, die für die Realisierung von Maßnahmen zur Rückholung von Abfallbehältern oder zur späteren Auffahrung eines Bergungsbergwerks..."* notwendig sind, mitzuberücksichtigen. Mit den durchgeführten Untersuchungen wurde gezeigt, wie der Zielkonflikt zwischen den unterschiedlichen Auslegungsanforderungen zumindest teilweise aufgelöst werden kann.

Ein ähnlicher Zielkonflikt wurde auch für die horizontale Streckenlagerung im Tongestein identifiziert. Der für die Rückholung benötigte Streckenquerschnitt ist bei der Auslegung der Einlagerungsstrecken und der Dimensionierung der Streckenabstände zu berücksichtigen. Auslegungstemperaturen zwischen 100°C und 150°C erlauben im Tongestein eine vergleichsweise dichte Packung der Endlagerbehälter. Durch die aus bergmännischer Sicht ungünstigen geomechanischen Eigenschaften der Tongesteine können für die Auslegung der Einlagerungsfelder geomechanische Aspekte eine thermische Optimierung der Feldgröße einschränken. Dies gilt auch und besonders für den Rückholungsbetrieb. Die Auffahrung großer Querschnitte im Rückholungsbetrieb würde zu einer Schwächung der Festen zwischen den Einlagerungsstrecken führen. Das in diesem Vorhaben entwickelte Rückholungskonzept beinhaltet eine Neuauffahrung mit Hilfe gleisloser Technik, konkret Hydraulikbaggern. Die Rückholung soll aus einem kleinen Querschnitt vergleichbar zur Einlagerung erfolgen. Eine Aufweitung der Rückholungsstrecke und damit eine Schwächung der Festen ist nicht vorgesehen. Sofern für die Rückholung größere Querschnitte als bei der Einlagerung vorgesehen sind, müssen diese in der Auslegung durch einen vergrößerten Streckenabstand berücksichtigt werden.

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 Endlagerbehälter zu einer Verdoppelung der Betriebszeit führen. Dementsprechend ist eine geeignete Infrastruktur sowohl über als auch unter Tage vorzuhalten. Der weitere Umgang mit den Endlagerbehältern und den enthaltenen wärmeentwickelnden hochradioaktiven Abfällen sowie ausgedienten Brennelementen ist stark von den Beweggründen, die zur Rückholung führten, abhängig. Für die Handhabung der Endlagerbehälter werden ausreichende zentrale oder dezentrale Zwischenlagerkapazitäten, geeignete kerntechnische Anlagen zur Konditionierung der rückgeholten Abfälle, geeignete und ausreichende Endlagerbehälter für Zwischenlagerung und/oder Transport und ggf. auch entsprechende Transportkapazitäten benötigt. Da die Rückholung bisher nicht im AtG verankert ist, können keine Aussagen zur Genehmigungssituation eines möglichen Lagers für die zurückgeholten Endlagerbehälter

getroffen werden. Der weitere Umgang mit den Endlagerbehältern ist auch von den Gründen für eine Rückholung abhängig. Da die Rückholung während der gesamten Betriebszeit durchführbar sein soll, erscheint es zweckmäßig, ein Lager von Beginn an bereitzuhalten.

## 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
- (BbergG, 2015) Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), zuletzt geändert durch Artikel 303 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474)
- (BGE TEC, 2018a) BGE TECHNOLOGY GmbH: ERNESTA - Technische Konzepte für die Rückholung der Einlagerungsvariante horizontale Streckenlagerung in Salzformationen, Technischer Bericht, BGE TEC 2018-09, Peine 2018
- (BGE TEC, 2018b) BGE TECHNOLOGY GmbH: ERNESTA - Technische Konzepte für die Rückholung der Einlagerungsvariante vertikale Bohrlochlagerung in Salzformationen, Technischer Bericht, BGE TEC 2018-07, Peine 2018
- (BGE TEC, 2018c) BGE TECHNOLOGY GmbH: ERNESTA – Technische Konzepte für die Rückholung der Einlagerungsvariante horizontale Streckenlagerung in Tongesteinsformationen, Technischer Bericht, BGE TEC 2018-10, Peine 2018
- (BGE TEC, 2018d) BGE TECHNOLOGY GmbH: ERNESTA - Technische Konzepte für die Rückholung der Einlagerungsvariante vertikale Bohrlochlagerung in Tongesteinsformationen, Technischer Bericht, BGE TEC 2018-08, Peine 2018
- (BMU, 2010) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Berlin, 2010
- (DBE, 1995) Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE): Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente (DEAB) - Handhabungsversuche zur Streckenlagerung T60, Peine, 1995
- (DBE TEC 2010a) DBE TECHNOLOGY GmbH: Optimization of the Direct Disposal Concept by Emplacing SF Canisters in Boreholes (ES-DRED/DENKMAL) - Final Report, Peine, 2010
- (DBE TEC, 2010b) DBE TECHNOLOGY GmbH: Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein (ERATO) - Abschlussbericht, Peine, 2010

- (DBE TEC, 2014a) DBE TECHNOLOGY GmbH: Auswirkungen der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte, Abschlussbericht, Peine, 2014
- (DBE TEC, 2014b) DBE TECHNOLOGY GmbH: DIREGT III Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern bis 160 Mg, Abschlussbericht, unveröffentlicht, 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, 2016) DBE TECHNOLOGY GmbH: Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell SÜD. Technischer Bericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2016
- (DBE TEC, 2017) 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
- DIN 31051 DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung
- (ESK, 2011) Entsorgungskommission (ESK): Rückholung / Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle aus einem Endlager – ein Diskussionspapier, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, 2011
- (GRS, 2012) Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Arbeitspaket 6 - Abschlussbericht, GRS-Bericht GRS-281, Köln, 2012
- (GRS, 2018) Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Bewertung der Wirksamkeit des Radionuklideinschlusses für ein Endlager in flach lagernden Salzformationen Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA, GRS-Bericht GRS-496, Braunschweig, Mai 2018
- (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 hoch radioaktiver Abfallstoffe: Abschlussbericht, Drucksache 268, Hrsg. Geschäftsstelle Nationales Begleitgremium, Berlin, 2016
- (LBEG, 2007), Landesbergamt für Bergbau, Energie und Geologie : Leitfaden des Landesbergamtes für Bergbau, Energie und Geologie des Landes Niedersachsen für das Verwahren von Tagesschächten, Stand: 19.12.2007
- (NEA, 2011) Nuclear Energy Agency (NEA): Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel - Final Report, Paris, 2011
- (Renger&Dohl, 2015) K.-H. Renger, K. Dohl: Konzeptstudie Saugvorrichtung für Bohrlochversatz - unveröffentlicht, RSP Germany, Saalfeld, 2015
- (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](http://www.bundesregierung.de): Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG); StandAG



**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 2-1:	Typische Entwicklungsstufen eines Endlagers und Zuordnung der Rückholbarkeit und Bergung, nach (NEA, 2011)	5
Abbildung 3-1:	Grubengebäude nach (GRS, 2012) im möglichen Rückholungsbetrieb	13
Abbildung 3-2:	links: Querschnitte der beiden Teilstrecken, rechts: Endgültiges Profil der Rückholungsstrecke und Querschnitt der Einlagerungsstrecke	14
Abbildung 3-3:	Darstellung mELVIS im angehobenen Zustand mit Endlagerbehälter	15
Abbildung 3-4:	Konzept Plateauwagen für mELVIS, beladen	17
Abbildung 3-5:	Auswertung des Kurzzeitfestigkeitskriteriums im Modell	20
Abbildung 3-6:	Konvergenzentwicklung über die Rückholungsdauer für verschiedene Endlagerkonfigurationen	21
Abbildung 3-7:	Bewetterungsschema während der Rückholung	22
Abbildung 3-8:	Schematische Darstellung des Grubengebäudes und dessen Einteilung in Strahlenschutzbereiche	23
Abbildung 3-9:	Temperaturverteilung im Grubengebäude am Ende der Einlagerung bzw. zu Beginn der Rückholung (ca. 40 Jahre nach Beginn der Betriebszeit), links Detailansicht der Einlagerungsfelder Ost 12 und 11	24
Abbildung 3-10:	Gesamtbilanz des Wärmeeintrages ist in allen Teilmodellen im Vergleich	27
Abbildung 4-1:	Grubengebäude Rückholung	33
Abbildung 4-2:	Schnittbild Saugvorrichtung im Bohrloch (Renger&Dohl, 2015)	36
Abbildung 4-3:	Bewetterungsschema während der Rückholung	38
Abbildung 4-4:	Vergleich erwarteter Wärmeeinträge während des Einlagerungsbetriebes und der Rückholung (46 Jahre nach Einlagerungsbeginn)	39
Abbildung 5-1:	Skizze Rückholungsstrecke senkrecht zur Einlagerungsstrecke	45
Abbildung 6-1:	Schematische Darstellung des Rückholungsablaufes	48
Abbildung 6-2:	Teilschritte zur Freilegung der Endlagerbehälter und Querschnitt der Rückholungsstrecke	50
Abbildung 6-3:	Schematische Darstellung des Bewetterungskonzeptes für die Streckenlagerung während der Einlagerung (DBE TEC, 2010b)	53
Abbildung 7-1:	links: Übersicht der Teilmodelle, rechts: Energieeintrag getrennt nach Wärmequellen für Modell 2 (links oben), Modell 3 (rechts oben), Modell 4 (links unten) und Modell 5 (rechts unten), Legende: gelb-Maschinen, blau-Autokompression, grün-Gebirge, violett-Lüfter	64
BGE TEC 2018-11		75

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 3-1:	Abmessungen und Gewicht der modifizierten Einlagerungsvorrichtung in Strecken im Vergleich zum bestehenden Prototyp (ELVIS)	15
Tabelle 3-2:	Erwartete Temperaturen am Stoß und im Querschnitt der Teilstrecken für unterschiedliche Auslegungskonfigurationen	26



**BGE TECHNOLOGY GmbH**

**Eschenstraße 55**

**31224 Peine – Germany**

**T + 49 5171 43-1520**

**F + 49 5171 43-1506**

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

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