

ERNESTA

Technische Konzepte für die Rückholung der
Einlagerungsvariante horizontale Streckenlagerung
in Salzformationen

BGE TEC 2018-09

ERNESTA

Technische Konzepte für die Rückholung der Einlagerungsvariante horizontale Streckenlagerung in Salzformationen

BGE TEC 2018-09

Autoren	Philipp Herold Sabine Prignitz Niklas Bertrams Eric Kuate Simo Wolfgang Filbert Christian Friedrich (BGE) Arno Becker (SIEMAG TECBERG)
---------	--

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

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

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

Dieser Bericht wurde erstellt im Rahmen des FuE-Projektes

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

(ERNESTA)

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

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Rückholungsstrategie	3
3	Einlagerungskonzept und bestehendes Rückholungskonzept	9
3.1	Einlagerungskonzept	9
3.2	Bestehendes Rückholungskonzept	12
4	Vertiefende Untersuchungen zum Rückholungskonzept	15
4.1	Aus- und Vorrichtung – Betriebsablauf und Technik	15
4.2	Lagebestimmung der Behälter und Erkundung während der Rückholung	18
4.3	Auffahrung der Teilstrecken für die Rückholungsstrecke	20
4.4	Freilegen der Behälter	21
4.5	Entnahme der Behälter	23
4.6	Transport vom Rückholungsort zum Schacht	28
4.7	Automatisierungspotential während der Rückholung mit besonderer Berücksichtigung von Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz	32
4.7.1	Automatisierung im Bergbau	32
4.7.2	Stand der Automatisierungstechnik für Bau- und Bergbaumaschinen	33
4.7.3	Beurteilung des Automatisierungspotentials mit besonderer Berücksichtigung der Betriebssicherheit	37
4.7.4	Zusammenfassung des Automatisierungspotentials im Rückholungsbergwerk	42
4.8	Betriebsstörungsanalyse	43
4.9	Übertragung der mELVIS auf die Einlagerung	54
4.9.1	Anpassung Streckenquerschnitt	55
4.9.2	Konstruktive Anpassungen der mELVIS	58
4.9.3	Beschreibung der Betriebsabläufe bei der gleislosen Einlagerung	60
4.9.4	Bewertung der betrieblichen Sicherheit und übergeordnete Sicherheitsaspekte	61
5	Thermomechanische Simulation der Standsicherheit der Rückholungsstrecke	63
5.1	Ausgangsdaten	63
5.1.1	Geologie	63
5.1.2	Endlagerbehälter	63
5.1.3	Wärmeleistung einzelner Brennelemente	64

5.2	Modellbildung	66
5.2.1	Berechnungsmodell	66
5.2.2	Auffahrungskonzept	69
5.2.3	Berechnungsprogramm	70
5.3	Materialverhalten	70
5.3.1	Mechanisches Materialverhalten	70
5.3.2	Thermisches Materialverhalten	73
5.3.3	Thermomechanische Kopplung	74
5.4	Ergebnisse und Bewertung	74
5.4.1	Simulation des Einlagerungsvorgangs	74
5.4.2	Simulation des Rückholungsvorgangs	78
5.5	Erkenntnisse aus der thermomechanischen Simulation	83
5.6	Optimierung der Endlagerkonfiguration	84
5.6.1	Thermische Optimierung des Endlagers	84
5.6.2	Mechanische Optimierung des Rückholvorgangs	87
6	Bewetterung und Klimavorausberechnung	89
6.1	Bewetterungssystem	89
6.2	Temperaturentwicklung im Gebirge bis zum Beginn der Rückholung	92
6.3	Temperaturentwicklung im Gebirge nach Entnahme der Behälter	97
6.4	Klimavorausberechnung	100
6.4.1	Umgebungsbedingungen	100
6.4.2	Regulatorische Vorgaben	101
6.4.3	Modellbildung	101
6.4.4	Analyse Auffahrung der Hauptstrecken und Querschläge	104
6.4.5	Auffahrung der Rückholungsstrecken	108
6.5	Vergleichende Betrachtung Auslegungsoptimierung	114
6.5.1	Mögliche Konfigurationen	114
6.5.2	Auswirkungen auf Bewetterung und Klimatisierung	117
6.6	Vorsorgliche Grenztemperatur nach StandAG	123
6.6.1	Mögliche Konfigurationen	123
6.6.2	Auswirkungen auf Bewetterung und Klimatisierung	125
6.7	Erkenntnisse aus der Klimavorausberechnung	129

7	Umgang mit Brennelementstrukturteilen	131
8	Verschluss und Umgang mit dem geräumten Endlager	139
9	Zeit- und Kostenschätzung	141
9.1	Zeitschätzung	143
9.2	Kostenschätzung	148
10	Zusammenfassung	151
	Quellenverzeichnis	153
	Abbildungsverzeichnis	157
	Tabellenverzeichnis	163

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 Umwelt und Mensch vor den schädlichen Auswirkungen der ionisierenden Strahlung sowie toxischen Bestandteilen zu schützen.

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

Während der Konzeption und Auslegung eines Endlagers ist darauf zu achten, dass die technischen Maßnahmen zur Rückholung 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 Behälters gegeben sein muss. Vielmehr steht die Funktionsfähigkeit des gesamten Endlagersystems im Vordergrund. Aus diesem Verständnis heraus wird für die mögliche Rückholung von Behältern aus einem Endlager das sogenannte "Re-Mining"-Konzept favorisiert. Dies bedeutet, dass die Behälter entsprechend der Endlagerauslegung eingelagert und verschlossen werden. Im Falle einer Rückholung erfolgen dann die erneute Auffahrung der Zugänge und die Entnahme der Behälter. Eine Offenhaltung einzelner Grubenteile 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 Teilbericht werden die Arbeiten zur Vertiefung des Planungsstandes zum Rückholungskonzept für die Einlagerungsvariante horizontale Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern in Salzgestein zusammengefasst.

Zu diesem Zweck fasst der Abschnitt 2 dieses Berichtes die regulatorischen Randbedingungen und das daraus erwachsende Verständnis zur generellen Rückholungsstrategie zusammen. Im Abschnitt 3 wird das Einlagerungskonzept und das bestehende Rückholungskonzept kurz beschrieben. Mit dem Abschnitt 4 werden die vertiefenden Planungen zu den notwendi-

gen Arbeitsschritten und der Technik zusammengefasst. Darin enthalten ist auch eine erste Abschätzung des Automatisierungspotenzial in den verschiedenen Prozessen bzw. Arbeitsschritten. Mit dem Abschnitt 5 werden die Untersuchungen zur geomechanischen Situation in den geplanten Rückholungstrecken erläutert. Zusätzlich beschreibt Abschnitt 5 eine Auslegungsoptimierung mit dem Fokus die Umgebungsbedingungen im Grubengebäude für eine mögliche Rückholung anzupassen. In Ergänzung dazu fasst Abschnitt 6 das Bewetterungs- und Kühlkonzept zusammen und versucht ein technisches Konzept zur Einhaltung der betrieblichen Anforderungen zu entwickeln. Im Abschnitt 7 wird das Rückholungskonzept auf die Behälter für Brennelementstrukturteile übertragen. Abschnitt 8 skizziert den Umgang mit dem geräumten Endlager. Die Ergebnisse der einzelnen Abschnitte fließen in eine erste Zeit- und Kostenschätzung ein (Abschnitt 9).

2 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 einer oder mehrerer Schritte in allen Phasen des Prozesses der Endlagerentwicklung: Endlagerung und -auslegung, Bau und Betrieb des Endlagers bis hin zur völligen Rückabwicklung"* (ESK 2011) definiert. Mit voranschreitender Projektphase steigt dabei der Aufwand eines Rücksprungs bzw. einer Kurskorrektur. Die Diskussion um die Reversibilität dreht sich innerhalb der breiten gesellschaftlichen Debatte im Wesentlichen um die Frage nach der Notwendigkeit einer Rückholbarkeit. Die *"... Rückholbarkeit wird als die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten Abfallbehälter 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 das zukünftig Fehler festgestellt werden oder aber ein alternativer Umgang bzw. eine alternative Nutzung der eigenlagerten Abfälle und ausgedienten Brennelemente angestrebt wird. Die Rückholbarkeit würde dem Jahrzehnte dauernden Prozess der Endlagerung zusätzliche Flexibilität verleihen und würde auch der nachfolgenden Generation eine gewisse Handlungsfreiheit einräumen. Die Beurteilung zur Notwendigkeit einer Rückholung obliegt dieser zukünftigen Generation. Aus der Handlungsoption erwächst allerdings auch die Möglichkeit eines Missbrauchs. Die Sicherstellung der Kernmaterialüberwachung und Vermeidung einer Proliferation wird mit der Rückholbarkeit erschwert. Die Rückholbarkeit kann auch die betriebliche Sicherheit sowie die Langzeitsicherheit des Endlagers beeinflussen. Damit wäre das primäre Schutzziel des Endlagers beeinträchtigt und somit auch die Erbringung eines Sicherheitsnachweis zumindest erschwert. In Summe können aus der Handlungsoption Rückholbarkeit auch ohne Umsetzung der Rückholung erhebliche Zusatzkosten erwachsen. (IAEA, 2009)

Aus der Diskussion um die Vor- und Nachteile der Rückholbarkeitsoption entwickelt sich in den letzten Jahren mehr und mehr der gesellschaftliche Konsens, dass eine Rückholbarkeit der eingelagerten 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, Betrieb und Stilllegung eines Endlagers und für die Genehmigungsbehörden bei der Planfeststellung bindend. Die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen des BMU bildet somit eine Genehmigungsvoraussetzung. Dritte, die auf eine Genehmigungsfähigkeit hinarbeiten, müssen diese berücksichtigen. (BMU, 2010)

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

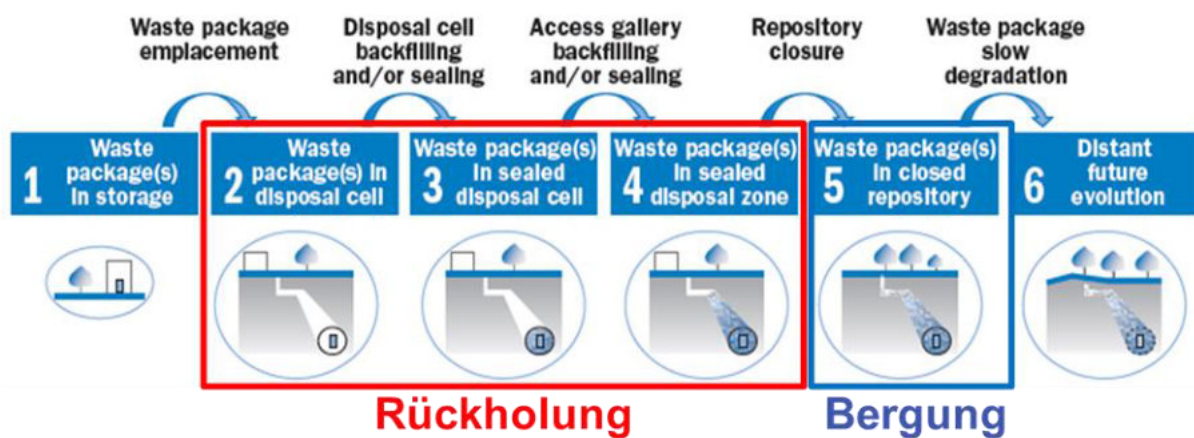


Abbildung 2-1: Typische Entwicklungsstufen eines Endlagers und Zuordnung der Rückholbarkeit und Bergung, nach (NEA, 2011)

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 des Einlagerungsfortschrittes 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 Auslegungsan-

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

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 (StrlSchV, 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 (StrlSchV, 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 Freimessan-

lagen 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 kann 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 Aufnahme und dem Rückholungsprozess 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 eingelagerte 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 der Brennelementstrukturteile rückgeholt werden.

3 Einlagerungskonzept und bestehendes Rückholungskonzept

3.1 Einlagerungskonzept

Das Einlagerungskonzept der horizontalen Streckenlagerung von POLLUX[®]-Behältern sieht vor, die Endlagerbehälter direkt auf der Sohle der Einlagerungsstrecken eines Bergwerkes im Salzgestein abzulegen. Die Endlagerung der Brennstäbe aus den ausgedienten Brennelementen der verschiedenen Leistungsreakortypen erfolgt in POLLUX[®]-10 Behältern. Der POLLUX[®]-10 besteht aus einem inneren Behälter mit Tragkörben für die Brennstäbe und einem äußeren Abschirmbehälter. Die Behältermasse beträgt rund 65 t. Bei der Konditionierung der Brennelemente separierte Brennelementstrukturteile werden in Gussbehälter Typ II verpackt. Wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung werden in POLLUX[®]-9 Behältern verpackt. Der POLLUX[®]-9 Behälter unterscheidet sich vom POLLUX[®]-10 durch einen veränderten Innenaufbau und eine stärkere Abschirmung. Die äußeren Abmessungen entsprechen denen eines POLLUX[®]-10 Behälters. Für ausgediente Brennelemente von Versuchs- und Prototypkernkraftwerken sowie Forschungsreaktoren ist die Nutzung der CASTOR[®]-Behälter, in denen sie heute bereits verpackt und zwischengelagert sind, vorgesehen. Die Gussbehälter Typ II und auch die CASTOR[®]-Behälter besitzen deutlich kleinere Abmessungen und Massen als der POLLUX[®]-10 Behälter.

Im Rahmen der "Vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben" (GRS, 2012) wurde für den Standort Gorleben zur Umsetzung des Einlagerungskonzeptes der horizontalen Streckenlagerung das benötigte Grubengebäude zur Unterbringung aller Endlagerbehälter entworfen (siehe Abbildung 3-1). Die geplante Einlagerungssohle liegt in 870 m Teufe. Vom zentralen Infrastrukturbereich zwischen Schacht 1 und 2 erschließen zwei Richtstrecken den Einlagerungsbereich in östliche Richtung. Der Verlauf der Richtstrecken richtet sich, unter der Einhaltung von Sicherheitsabständen, nach den vorhandenen Salzstrukturen. Im Querschnitt der südlichen Richtstrecke (Querschnitt 23 m²) sind Fahrwege und eine Bandanlage untergebracht. In der nördlichen Richtstrecke findet der Transport der Endlagerbehälter zwischen Schacht 2 und den Einlagerungsstrecken statt. Im Querschnitt von 24 m² sind die Gleisanlage und ein Fahrweg für nicht gleisgebundene Fahrzeuge untergebracht.

Zwischen den am nördlichen und südlichen Rand des Einlagerungsbereichs aufgefahrenen Richtstrecken bilden zwölf Querschläge die Zugänge zu den Einlagerungsfeldern. Von jedem Querschlag zweigen maximal 250 m lange Einlagerungsstrecken als Blindstrecken ab. Die Einlagerungsstrecken besitzen einen Querschnitt von 17 m². Innerhalb der Einlagerungsfelder sind die Einlagerungsstrecken für die POLLUX[®]-Behälter parallel, in 36 m Abstand, angeordnet. Nur in den Einlagerungsfeldern der Brennelemente von Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie Forschungsreaktoren und CSD-B/C Kokillen ist aufgrund der geringeren Wärmeleistung der ausgedienten Brennelemente ein kleinerer Streckenabstand von 15,3 m möglich. Einlagerungsstrecken für Behälter mit CSD-V Kokillen sind in 21 m Abstand angeordnet.

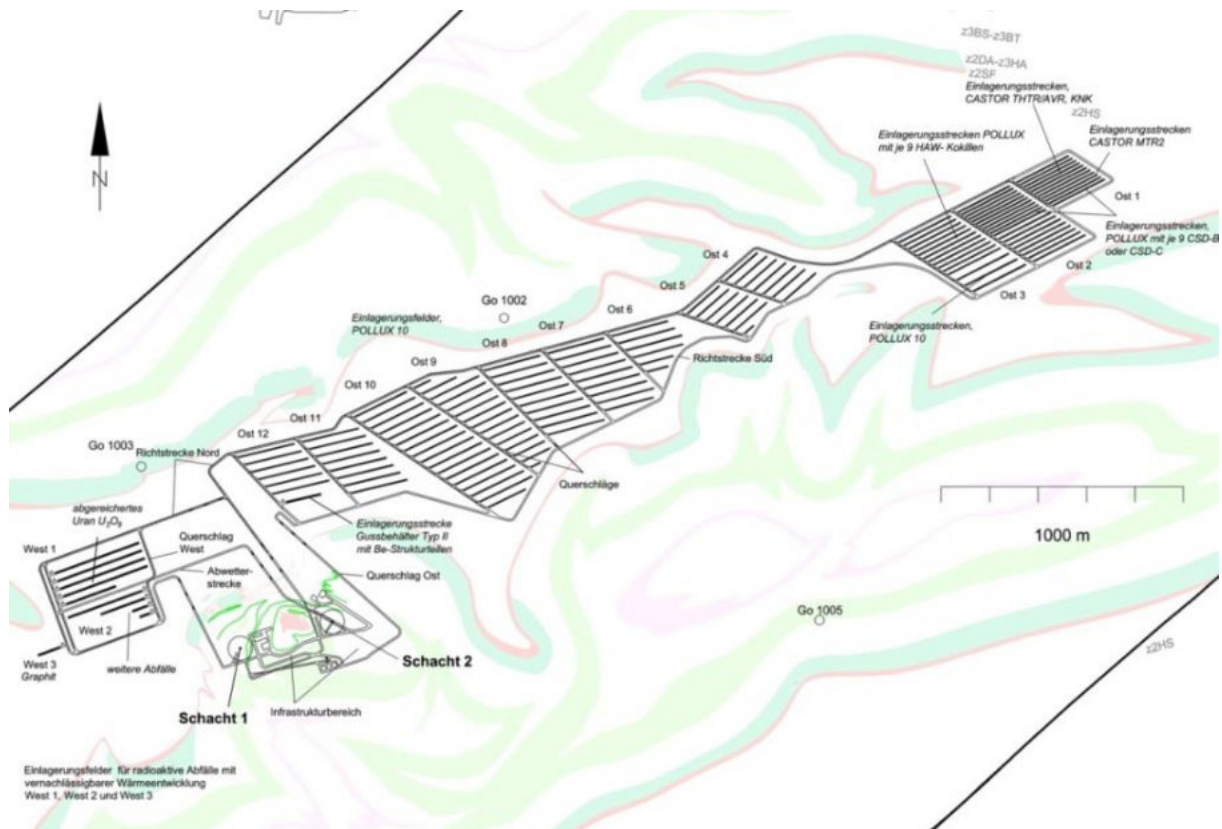


Abbildung 3-1: Darstellung des Grubengebäudes für die Streckenlagerung auf der Einlagerungssohle (870 m Sohle) (GRS, 2012)

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 einsöhlilig 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 blasenden 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 Behälter werden im Fördergestell auf einem Plateauwagen 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 Einlagerungsstrecke. Am Einlagerungsort steht die Einlagerungsvorrichtung in Strecken (ELVIS) zum Aufnehmen und Ablegen des Behälters bereit (siehe Abbildung 3-2).



Abbildung 3-2: Versuchsstand zur Demonstration der Streckenlagerung von POLLUX®-10 Behältern (DBE TEC, 2008)

Mit Hilfe der Einlagerungsvorrichtung wird der am Einlagerungsort auf dem Plateauwagen bereitgestellte POLLUX®-10 Behälter vom Plateauwagen abgehoben und nach Zurückziehen des Plateauwagens auf der Streckensohle abgelegt. Der Prototyp wurde im Rahmen des FuE-Programms zur Direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente (DBE, 1995) geplant, gefertigt und im Dauereinsatz erfolgreich erprobt.

Direkt im Anschluss an die Einlagerung erfolgt der Versatz des Behälters mit naturtrockenem (0,02 Gew.-% Wassergehalt, (GRS, 2012)) Salzgrus. Die Gleisanlagen und weitere Einbauten innerhalb der Einlagerungsstrecken werden vor dem Versetzen schrittweise geraubt. Im laufenden Betrieb alternieren Einlagerung und Versatz immer zwischen zwei Einlagerungsstrecken in einem Querschlag. Sind alle Einlagerungsstrecken eines Querschlages belegt und versetzt, wird das Einlagerungsfeld entsprechend dem Verschlusskonzept abgeworfen. Im Rückbau werden die Einbauten der nicht mehr benötigten Strecken beraubt und mit Salzgrus versetzt. Die Richtstrecken werden mit um 0,6 Gew.-% angefeuchtetem Salzgrus versetzt. In den Zugangsstrecken zwischen den zentralen Infrastrukturbereich und den Einlagerungsfeldern erfolgt die Errichtung von Verschlussbauwerken.

3.2 Bestehendes Rückholungskonzept

Die Rückholbarkeit ist im beschriebenen Endlagerkonzept grundsätzlich gegeben. In (GRS, 2012) wurden bereits verschiedene konzeptionelle Ansätze aufgezeigt, die eine Rückholbarkeit erleichtern. In (DBE TEC, 2014) erfolgte dazu eine erste Konkretisierung. Die Rückholbarkeit der Behälter darf die Langzeitsicherheit des Endlagers nicht beeinträchtigen, die Anzahl offener Einlagerungsbereiche ist gering zu halten und die Durchörterung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit Schächten, Auffahrungen oder Bohrungen ist zu minimieren. 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 Behälters) bis zum Betriebsende (dem Verschluss der Schächte). Vorlaufende Arbeiten, wie die Errichtung des Endlagerbergwerkes oder anschließende Prozesse wie der Verschluss der Schächte gehören nicht zur Betriebszeit. Als abdeckendes Szenario wird daher angenommen, dass zu Beginn der Rückholung die Einlagerung abgeschlossen, alle Einlagerungs- und Zugangsstrecken versetzt und die Streckenverschlüsse bereits errichtet sind. Das verbleibende Grubengebäude umfasst lediglich die Tageszugänge und einige wenige Grubenbaue des Infrastrukturbereiches.

Zur Einhaltung dieser wesentlichen Auslegungsanforderungen wurde in (DBE TEC, 2014) ein grundlegendes Rückholungskonzept, basierend auf einem als „Re-Mining-Strategie“ bezeichneten 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 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. Die Rückholung der Abfälle erfolgt in umgekehrter Reihenfolge zur Einlagerung.

Die Errichtung der eigentlichen Rückholungsstrecken und die Entnahme der Behälter erfolgt in mehreren Teilschritten. Zunächst wird eine Teilstrecke parallel zu den eingelagerten Behältern aufgefahren. Die Teilstrecke besitzt nur einen kleinen, für die Vortriebstechnik notwendigen, Querschnitt von rund 13 m² (siehe Abbildung 3-3). Die Teilstrecke ist so angeordnet, dass zwischen Streckenkontur und den eingelagerten POLLUX[®]-Behältern ein Sicherheitsabstand von ca. 0,5 m verbleibt. Mit dem gewährten Sicherheitsabstand soll ein versehentliches Anschneiden der Behälter während der Auffahrung vermieden werden. Im zweiten Schritt erfolgt auf der gegenüberliegenden Behälterseite die Auffahrung einer parallelen Teilstrecke. Die Auffahrung entspricht einer Spiegelung der ersten Teilstrecke in der Behälterlängsachse. Das Sohlenniveau beider Teilstrecken liegt planmäßig unterhalb der Behälterauflagefläche. In der endgültigen Rückholungsstrecke liegt der Behälter somit auf einem Salzgesteinssockel in leicht erhöhter Position, siehe Abbildung 3-3. Dies erleichtert die Aufnahme der Behälter durch eine modifizierte Einlagerungsvorrichtung (mELVIS). Durch die Entnahme des verbleibenden Pfeilers zwischen beiden Teilstrecken entsteht die endgültige Kontur der Rückholungsstrecke.

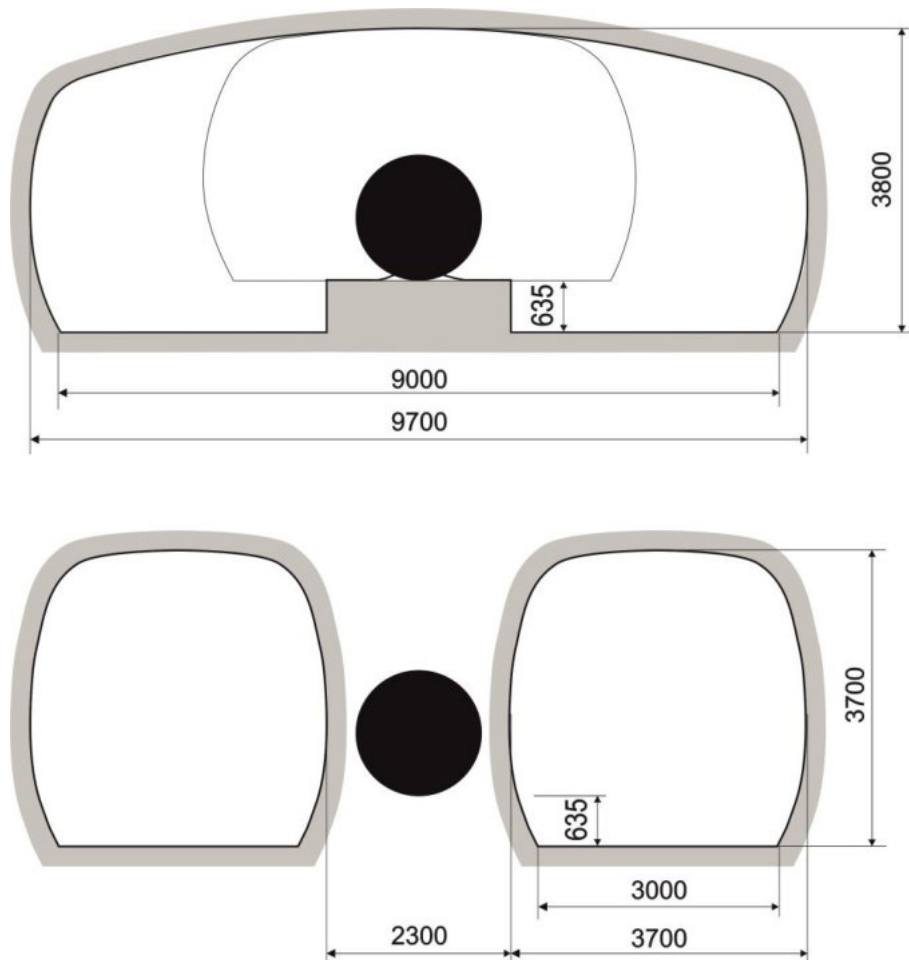


Abbildung 3-3: oben: Endgültiges Profil der Rückholungsstrecke und Querschnitt der Einlagerungsstrecke, unten: Querschnitte der beiden Teilstrecken

4 Vertiefende Untersuchungen zum Rückholungskonzept

4.1 Aus- und Vorrichtung – Betriebsablauf und Technik

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

Die Auffahrung der Richtstrecken erfolgt parallel zu beiden Seiten der Einlagerungsfelder. Die Lage der Richtstrecken orientiert sich an den früheren Richtstrecken des Einlagerungsbetriebes. Im nördlichen Grubenbereich werden zur Optimierung der Bewetterung und der Betriebsabläufe zwei parallele Richtstrecken geschaffen. Die Richtstrecken sind je 4.500 m lang und in regelmäßigen Abständen miteinander verbunden. Der Querschnitt beider Strecken beträgt 24 m², siehe Abbildung 4-1. Die Auffahrung kann mit einer schweren TSM erfolgen. Denkbar ist auch der Einsatz zweier TSM oder aber eines Continuous Miners und einer TSM, welches die Errichtung der Zugangsstrecken beschleunigen würde.

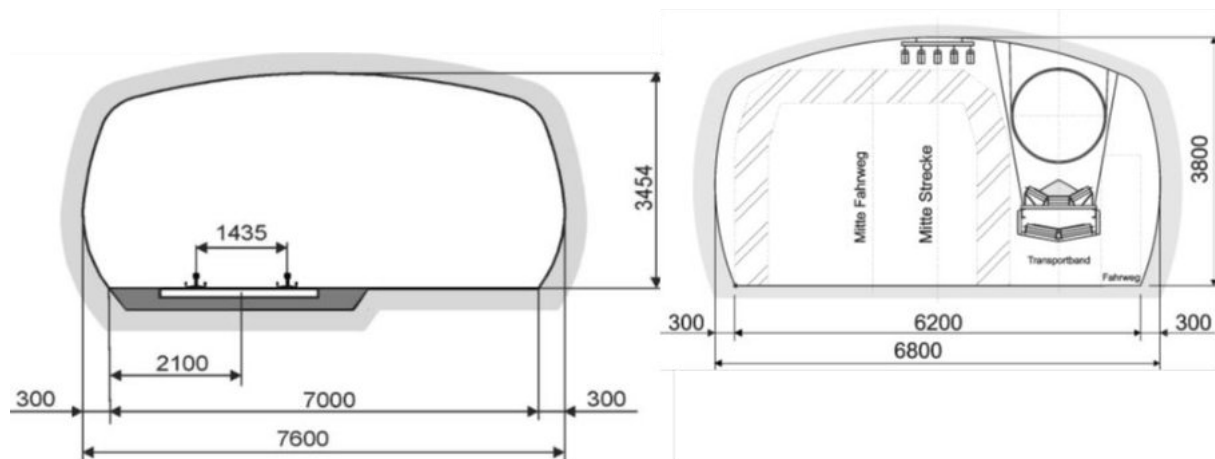


Abbildung 4-1: links: Profil der Doppelstrecken Nord und der Querschläge, rechts: Profil der Richtstrecke Süd (Angaben jeweils in mm) (GRS, 2012)

Die südliche Richtstrecke wird parallel zu den nördlichen Strecken errichtet. Vom Betriebspunkt der südlichen Richtstrecke aus werden die Querschläge und damit die Verbindung zur Doppelstrecke errichtet, siehe Abbildung 4-2. Jedes Einlagerungsfeld wird von zwei Querschlägen eingefasst. Die Querschläge können für die Rückholung benachbarter Einlagerungsfelder genutzt werden. Das Sohlniveau der Querschläge entspricht dem Einlagerungsniveau.

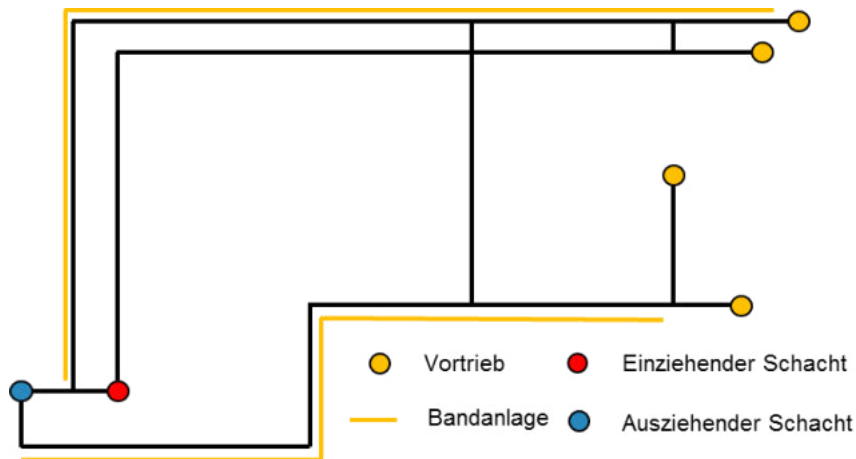


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung der Auffahrung aller Hauptstrecken und Querschläge

Der Abtransport des Haufwerks erfolgt an beiden Betriebspunkten über eine Bandanlage. Die TSM kann direkt auf diese aufgeben oder aber Fahrlader fördern das Haufwerk an eine entsprechende Kippstelle. Abbildung 4-3 zeigt das vollständige Grubengebäude zur Rückholung aller Abfälle unter Berücksichtigung der Endlagerauslegung nach (GRS, 2012).

Die Zuordnung der Hauptstreckenvortriebe zu den Strahlenschutzbereichen richtet sich nach dem Versatz- und Verschlusskonzept der Einlagerung. Die nördliche Richtstrecke und die Querschläge sind während der Einlagerung dem Kontrollbereich (KB) zugeordnet. Mit dem Versatz werden die Strecken und damit auch der KB verschlossen. Eine Wiederauffahrung entspricht dann einem erneuten Öffnen des KB. Zur Erleichterung der Auffahrung während der Rückholung könnten alle Hauptstrecken des KB vor dem Versatz freigemessen werden. Das Freimessen ist mit einem hohen zeitlichen und technischen Aufwand verbunden. Dieser Aufwand wird aber unter Umständen durch eine zügigere und einfachere Neuauffahrung während einer möglichen Rückholung gerechtfertigt. Bisher ist eine solche rückholungserleichternde Maßnahme nicht Teil des Einlagerungskonzeptes.

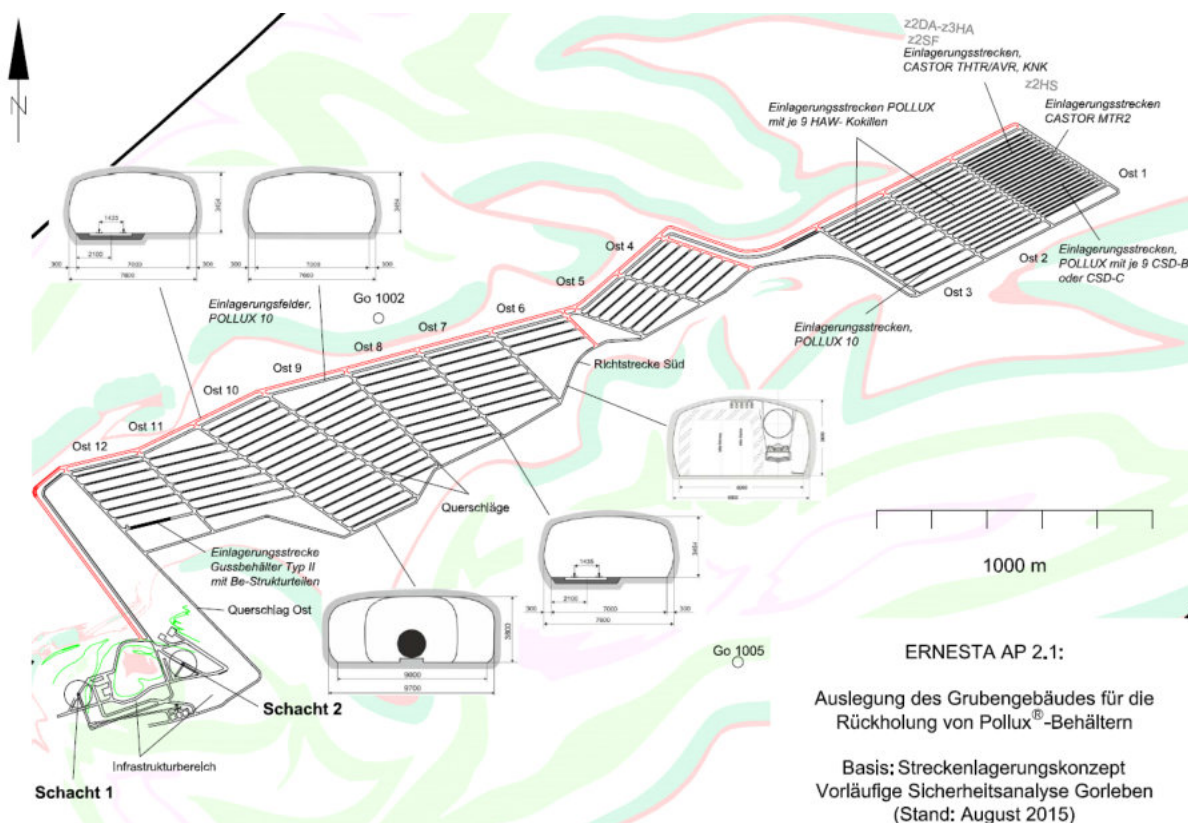


Abbildung 4-3: Grubengebäude nach (GRS, 2012), im möglichen Rückholungsbetrieb

Die Auffahrung der eigentlichen Rückholungsstrecken und die Rückholungstätigkeit selbst können beginnen, sobald die ersten Einlagerungsfelder durch die Richtstrecken und Querschläge erschlossen sind. Die Rückholung erfolgt in umgekehrter Reihenfolge zur Einlagerung, beginnend mit dem schachtnächsten Einlagerungsfeld.

Spätestens von Beginn der Auffahrung der Rückholungsstrecken wird der untertägige Bereich des Endlagers gemäß § 36 StrlSchV (StrlSchV, 2017) in Überwachungs- und Kontrollbereich unterteilt, vgl. dazu Abbildung 4-4. Ein regulärer Übergang zwischen beiden Strahlenschutzbereichen ist unter Tage nur im Infrastrukturbereich vorgesehen. Gemäß den Anforderungen aus § 44 (StrlSchV, 2017) sind alle Personen und beweglichen Gegenstände, die den Kontrollbereich verlassen bzw. herausgebracht werden, auf Kontamination zu prüfen. Bei den Gegenständen ist darüber hinaus noch zu überprüfen ob sie aktiviert wurden. Wird an Personen eine Kontamination festgestellt, so sind direkt Maßnahmen zu treffen, um eine Strahlenexposition und eine Weiterverbreitung radioaktiver Stoffe zu verhindern. Gegenstände dürfen nur dann den Kontrollbereich verlassen, wenn ihre Aktivierung bzw. Kontamination die Werte für die uneingeschränkte Freigabe bzw. die Oberflächenkontamination aus Anhang III Tabelle 1 der (StrlSchV, 2017) unterschreiten. Für den Übergang vom Überwachungs- in den Kontrollbereich bzw. umgekehrt werden im Infrastrukturbereich Schleusen mit Monitoren aufgebaut, die Personal und Sachgüter auf Kontamination bzw. Aktivierung hin überprüfen. Für eine etwaige Dekontamination von Personen bzw. Sachgütern sind im Kontrollbereich extra Bereiche für eine Dekontamination vorgesehen.

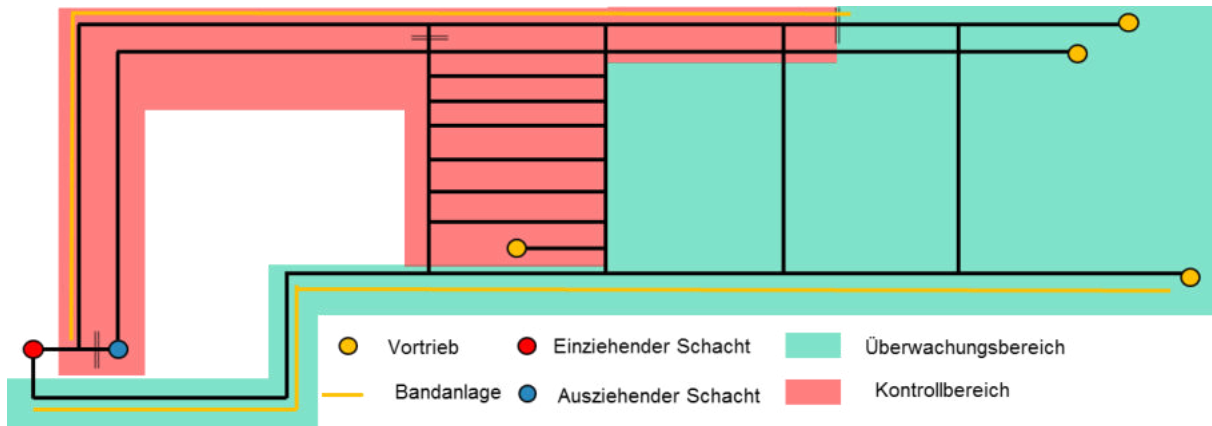


Abbildung 4-4: Schematische Darstellung der Auffahrung von Richtstrecken, Querschlägen und Teilstrecken mit möglichen Betriebspunkten (gelbe Punkte), sowie Kontroll- (roter Bereich) und Überwachungsbereich (grün)

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

4.2 Lagebestimmung der Behälter und Erkundung während der Rückholung

Mit der Annäherung an die Behälter sind Kenntnisse zu deren exakter Lage unerlässlich. Ein unbeabsichtigtes Anschneiden der Behälter ist in jedem Fall zu vermeiden. Nach § 65 BBergG muss für Anlagen unter der Verantwortung des Bergrechtes ein Risswerk geführt und regelmäßig aktualisiert werden. Zusätzlich kann festgelegt werden, *"...daß bestimmte rißliche und sonstige zeichnerische Darstellungen über Tätigkeiten [...] und über Einrichtungen [...] einzureichen und nachzutragen, daß bestimmte Listen, Bücher und Statistiken über [...] betriebliche Vorgänge zu führen..."* § 67 (BBergG, 2015) sind. Die einzuhaltende Genauigkeit des Risswerks richtet sich nach § 6 MarkschBergV nach dem Zweck. Im Allgemeinen kann für Punktlagen eine Messgenauigkeit von kleiner ± 10 cm angenommen werden. Zusätzlich zu den bergbehördlichen Vorschriften wird auch in den "Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle" eine Dokumentation aller "..."

für Sicherheitsaussagen und für zukünftig zu treffende Beurteilungen und Entscheidungen relevanten Daten und Dokumente ..." (BMU, 2010) gefordert. Dazu zählen auch *"die mark-scheiderischen Daten des Endlagers, einschließlich ihrer historischen Entwicklung"* (BMU, 2010) und *"alle relevanten Informationen über die einzelnen eingelagerten Abfälle..."* (BMU, 2010). Aus heutiger Sicht kann somit angenommen werden, dass die exakte Lage der Behälter bei der Einlagerung bzw. vor dem Versatz bekannt ist. Mögliche Lageveränderungen der Behälter im Zeitraum zwischen dem Versatz und der Rückholung können durch diese Dokumentation aber nicht erfasst werden. Vor Beginn der Auffahrung der Rückholungsstrecken muss somit eine vorausseilende Erkundung die Lagedaten verifizieren.

Mögliche zum Einsatz kommende Messmethoden zur Detektion der Endlagerbehälter ergeben sich aus den unterschiedlichen Eigenschaften des Salzversatzes und der Endlagerbehälter. Aufgrund der Größe der Endlagerbehälter ist es grundsätzlich möglich, verschiedene Messmethoden zur Detektion einzusetzen. Im Wesentlichen kommen geophysikalische Reflexionsverfahren infrage, welche eine sprunghafte Änderung der akustischen Impedanz (bspw. Seismik oder Ultraschall) oder der elektromagnetischen Impedanz (Radarmessungen) erfassen. Der zwischen Versatz und Behälter auftretende Impedanzsprung führt zu entsprechenden Reflexionssignalen in den Messdaten.

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

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

Aufgrund der zügigen Durchführbarkeit der Messungen und der heute vorhandenen, ausgereiften Messtechnik empfiehlt sich die Ortung der Endlagerbehälter mittels Radarmessungen. Die Radarmessungen können nach Auffahrung von Teilbereichen oder kompletter Auffahrung der Teilstrecken bzw. Rückholstrecken erfolgen. So können beispielsweise vor Auffahrung der Teilstrecken Erkundungsbohrungen in Streckenachse geteuft werden. Die Radarmessungen können dann auch in Form von Bohrlochradarmessungen erfolgen. Entsprechendes Messequipment entspricht dem Stand der Technik und ist am Markt für verschiedenen Bohrdurchmesser verfügbar. Vor Beginn der eigentlichen Messungen ist eine Kalibrierung der elektromagnetischen Wellengeschwindigkeit im Ausbreitungsmedium (Salzgestein

bzw. Salzgrus) notwendig. Dies kann über eine definierte Sender-Empfänger Anordnung oder über einen räumlich definierten Reflektor erfolgen.

Nach Kalibrierung der Wellengeschwindigkeit werden die Radarmessungen auf einer horizontalen Messlinie (Radarprofil) am Stoß durchgeführt. Ein eingespieltes Messteam kann Profillängen größer 100 m je Schicht vermessen. Durch diese Messungen wird die horizontale Position der einzelnen Endlagerbehälter bestimmt. Zur genauen Bestimmung der vertikalen Position der Endlagerbehälter werden drei übereinander angeordnete horizontale Radarprofile vorgeschlagen, z.B. in 1, 2 und 3 m Höhe über der Sohle am Stoß. Alternativ kann an der Position der einzelnen Endlagerbehälter eine vertikale Messlinie über die gesamte Stoßhöhe erfolgen. Die Kombination der drei horizontalen Messprofile bzw. Kombination eines horizontalen mit den vertikalen Messprofilen erlaubt die Ortung der einzelnen Endlagerbehälter in ihrer 3-dimensionalen Lage. Die Genauigkeit der Lagebestimmung ist im Wesentlichen abhängig von der Wellenlänge des Quellsignals und liegt bei der Nutzung einer hochfrequenten Antenne im Bereich kleiner 1 dm. Dies entspricht ca. der Genauigkeit der markscheiderischen Aufzeichnungen.

4.3 Auffahrung der Teilstrecken für die Rückholungsstrecke

Die Auffahrung der Rückholungsstrecken erfolgt in allen Einlagerungsfeldern vom schachtfernen Querschlag aus und wird nach dem in (DBE TEC, 2014) entwickelten Schema in drei Teilschritten durchgeführt. Die POLLUX®-Behälter sollen in der endgültigen Rückholungsstrecke, in erhöhter Position, auf einem Salzsockel liegen. Das Sohlniveau der Rückholungsstrecke und damit auch der Teilstrecken muss in Abhängigkeit der tatsächlichen Behälterlage definiert werden. Der Pfeilerbereich zwischen den Querschlägen und den Behältern bietet ausreichend Raum um den jeweiligen Höhenunterschied zu überwinden. Die entstehenden kurzen Rampen besitzen Neigungen kleiner 2,5°.

In einem Querschlag findet immer nur ein Vortrieb statt. Für die Errichtung der Teilstrecken ist eine leichte TSM ausreichend. Mit Blick auf die hohe thermische Belastung resultierend aus dem Wärmeeintrag der eingelagerten wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente und auch der Vortriebstechnik selbst ist eine Begrenzung der Schneidleistung zur Gewährleistung hinreichender Kühlzeiten notwendig. Der Einsatz größerer, leistungstärkerer Maschinen bietet hier keinen Vorteil.

Die für den Vortrieb notwendige Infrastruktur (Kühlanlage und Entstaubung) wird im Querschlag errichtet und kann für die Auffahrung beider Teilstrecken sowie für die Entnahme des Pfeilers genutzt werden.

Die Vortriebe der Teilstrecken sind mit einer Sonderbewetterung ausgestattet. Nach dem Durchschlag jeder Teilstrecke wird diese durchgängig bewettert und soll so das umgebende Gebirge stetig kühlen. Die Auffahrung der zweiten Teilstrecke erfolgt in der gleichen Vortriebsrichtung. Im Anschluss an die Auffahrung der zweiten Teilstrecke beginnt die Entnahme des Pfeilers inkl. der Entnahme der Behälter. Mit der TSM werden die Pfeilerbereiche zwi-

schen zwei Behältern geschnitten. Die Pfeilerbereiche um die Behälter werden mit einer alternativen Vortriebstechnik zurückgebaut, siehe Abschnitt 4.4.

Das Haufwerk wird mit einem Fahrlader von der Ortsbrust über den Querschlag bis zur Kippstelle der Bandanlage gefördert, anschließend zwischengespeichert oder direkt zum Versatz bereits geräumter Strecken verwendet. Haufwerk, das aus dem Kontrollbereich gefördert werden soll und bspw. übertägig auf Halden deponiert wird, muss gemäß § 44 (StrlSchV, 2017) auf Kontamination hin überprüft werden. Soll das Haufwerk als nicht radioaktiver Stoff verwendet werden, so ist es gemäß § 29 (StrlSchV, 2017) freizumessen. Hierbei handelt es sich um weniger als 100 m³ pro Schicht, jedoch in Summe um mehrere 10.000 m³ an Haufwerk, das freigemessen werden muss. Solche Mengen lassen sich mittels Freimessanlagen, die erfolgreich bei der Freimessung von z.B. Bauschutt in den Kernkraftwerken eingesetzt werden, bearbeiten. Es ist zu berücksichtigen, dass die Freimessung des Haufwerkes wahrscheinlich langsamer erfolgt als die Auffahrung. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, in der Nähe der Freimessanlage einen Bunker einzurichten, der als Puffer für das aufgefahrene Haufwerk dient.

4.4 Freilegen der Behälter

Im Anschluss an das Auffahren der beiden Teilstrecken wird der Pfeiler mit der TSM in Verhieb genommen. Der Querschnitt des Pfeilers beträgt ca. 11 m² mit einer freizuschneidenden Höhe von ca. 3,5 m und einer mittleren Breite von ca. 2,3 m, siehe Abbildung 4-5. Der Pfeiler besteht teils aus gewachsenem Steinsalz und teils aus kompaktiertem Salzgrusversatz.

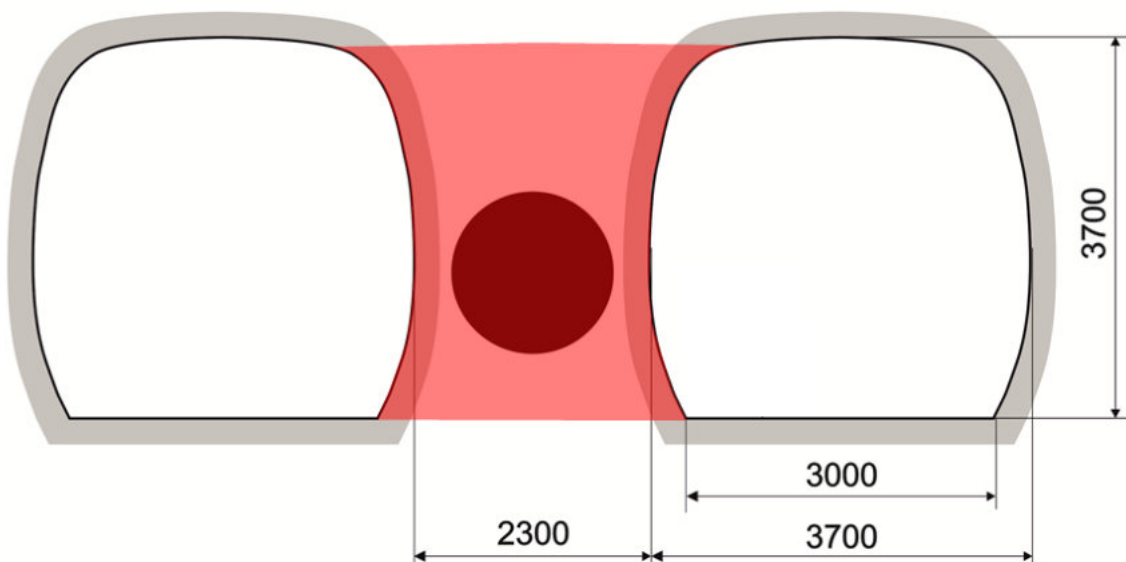


Abbildung 4-5: Profil der Teilstrecken mit intaktem Pfeiler (rot) und POLLUX®-Behälter (Angaben in m)

Die TSM trägt den Pfeiler bis auf einen Abstand von ca. 0,5 m vor der detektierten Behälterposition ab. Soweit das Schneidprofil der TSM dazu geeignet ist, wird auch der Firstbereich über dem Behälter mit diesem Arbeitsschritt frei geschnitten. Der verbleibende Pfeiler im

Nahbereich der Behälter und über die gesamte Behälterlänge kann mit Hilfe eines fernbedienten Abbruchroboters (s. beispielhaft Abbildung 4-6) entfernt werden. Der Manipulatorarm des Abbruchroboters kann über eine Schnellwechselvorrichtung mit verschiedenen Werkzeugen ausgestattet werden. Je nach Bedarf können so Hydraulikhämmer, Schneidwerke, Ladeschaufeln oder auch Bürsten zum Freilegen der Behälter genutzt werden.

Gegenüber einer TSM zeichnet sich ein Abbruchroboter durch einen flexibleren Arbeitsbereich aus. Auf Grund der Geometrie des POLLUX®-Behälters und des in der Tiefe stark begrenzten Schneidprofils der TSM wäre ein ständiger Positionswechsel der Maschine notwendig. Dies entspricht nicht der gewöhnlichen Arbeitsweise einer TSM. Neben einer verminderten Schneidleistung führt die resultierende hohe Beanspruchung des Fahrwerks zu einem erhöhten Verschleiß. Unter den erwarteten extremen Umgebungsbedingungen muss somit mit einer erhöhten Störanfälligkeit der TSM bzw. deren Fahrwerk gerechnet werden. Die TSM wird nur für den Rückbau der vollen Pfeilerbereiche zwischen den Behältern sowie dem Nachschnitt an Firste und Sohle genutzt. Während der Arbeiten am Behälter verbleibt die TSM in der rückwärtigen Rückholungsstrecke oder auch in einer der vorlaufenden Teilstrecken.



Abbildung 4-6: Abbruchroboter zum Freilegen der POLLUX®-Behälter, hier beispielhaft der BROKK 400 (Brokk, 2015)

Das gelöste Haufwerk wird mit dem Fahrlader aus der Rückholungsstrecke entfernt. Nach dem Freilegen und ggf. der Ertüchtigung von Firste und Sohle kann die Entnahme des Behälters, die eigentliche Rückholung, erfolgen. Die Entnahme der Behälter und der Transport zum Schacht erfolgen stets in einer Schicht. Nacharbeiten an der Sohle und das Entfernen des Sockels werden erst mit dem neuen Rückholungszyklus und der Pfeilerentnahme durchgeführt. Die Pfeilerbereiche zwischen zwei Behältern können wieder mit einer TSM entnommen werden. Die Sohle wird in diesen Bereichen bis auf das Niveau der Teilstrecken geschnitten. Es verbleibt kein Sockel.

4.5 Entnahme der Behälter

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 und eine Rahmenkonstruktion zum Aufnehmen, Halten und Tragen von Endlagerbehältern mit Lasten von bis zu 65 t ohne das Nutzen der Tragzapfen sowie zu deren Übergabe auf einen Plateauwagen, weiterhin ein Steuerstand und ein Raupenfahrwerk.

Die Rückholungsvorrichtung muss kompakt gebaut sein, um unter Tage 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 Plateauwagen realisieren. Die wesentlichen Vorgaben für den Aufbau der Vorrichtung sind:

- selbstfahrend
- elektrischer Antrieb, Energieversorgung über Schleppkabel
- Hubeinrichtung mit vier Stempeln, maximal aufzunehmendes Gewicht von 65 t über zwei Spindelhubtriebe über Eck
- stufenlose Höhenverstellung soll möglich sein,
- Möglichkeit einer Nachrüstung für den Transport auf dem Plateauwagen
- die Tragzapfen an den Endlagerbehältern können zum Zeitpunkt der Rückholung nicht mehr als tragfähig vorausgesetzt werden. Daher ist hier ein anderes Tragprinzip, zum Beispiel ein Tragrahmen, zu entwickeln.
- Transportbehälter haben eine weitgehend glatte gereinigte zylindrische Oberfläche und sind bezogen auf den Greifvorgang druckbelastbar
- Sicherheitseinrichtungen verhindern Überhitzen und mechanische Überlastung
- die Höhe der Behälterauflagefläche gegenüber der Fahrebene in der Rückholungsstrecke wird gewählt mit 635mm
- Steuerung über Fernbedienung
- fahren in einer aufgefahrenen Strecke im Salz / verfestigten Salzgrus ohne Bodenaufbau
- maximale Temperaturbelastbarkeit von Kabeln/elektrischen Einrichtungen bis 200°C
- Steuerungen müssen gekühlt werden auf ca. 70°C. Die Temperaturverträglichkeit von SPS-Steuerungen ist zu prüfen.

Eine Positionsüberwachung des Gebindes 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.

Im Rahmen der angefertigten Vorstudie zur Machbarkeit der mELVIS finden die KTA-Regeln keine Anwendung, da die potentielle Fallhöhe des Gebindes stets kleiner als 1,0 m ist.

Der Entwurf der Konstruktion erfolgt mit dem Ziel größtmöglicher Zuverlässigkeit der mELVIS. Hierzu wird ein möglichst 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 4-7 veranschaulicht die Konstruktion. Die wesentlichen geometrischen Kenndaten sind in Tabelle 4-1, vergleichend zum bestehenden Prototyp ELVIS, zusammengefasst.

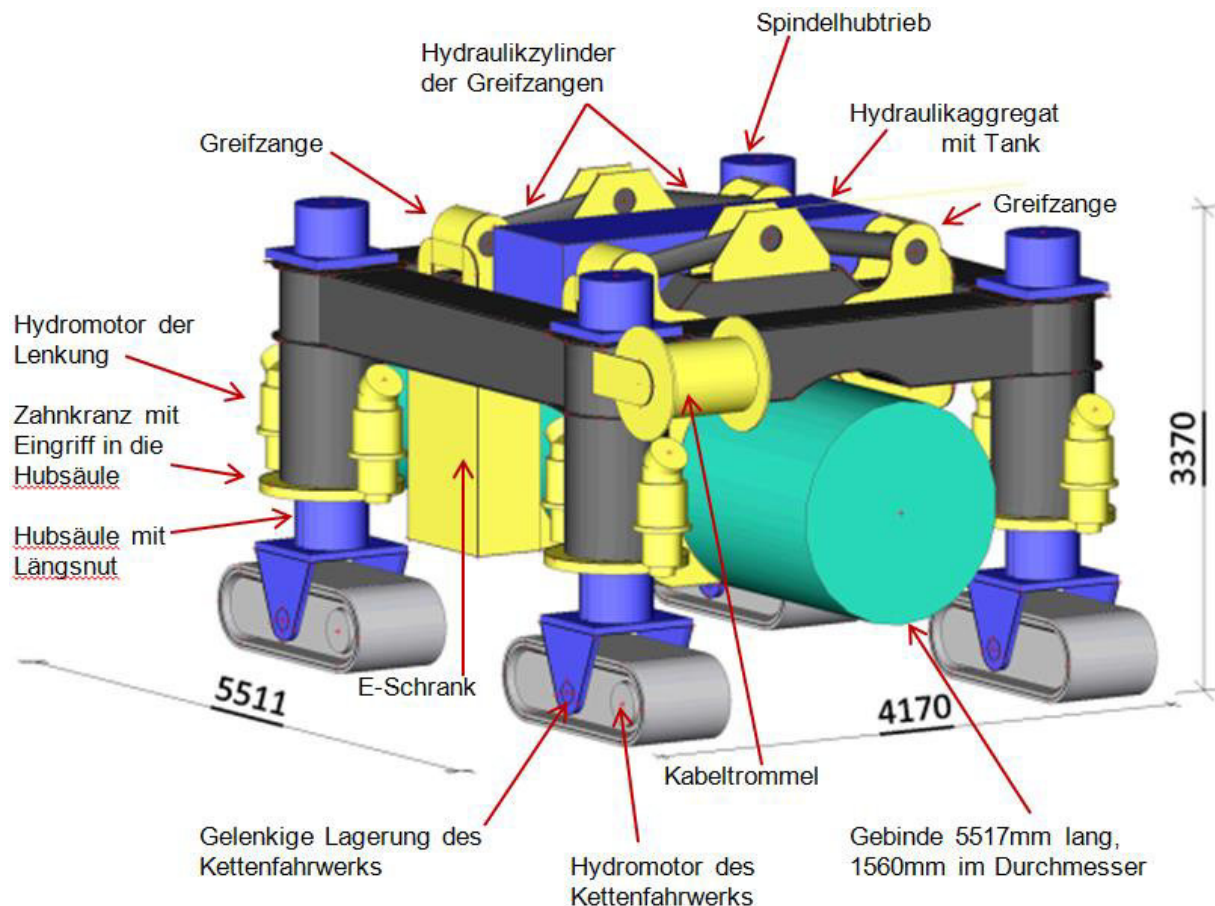


Abbildung 4-7: Darstellung mELVIS im angehobenen Zustand, mit Behälter

Tabelle 4-1: Amessungen 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

Die Vorrichtung fährt von Querschlägen aus in die Rückholungsstrecken und muss dabei die Fahrtrichtung ändern. Jede der vier Fahrwerksgondeln ist um die Achse ihrer Hubsäule drehbar. An den Führungen der Spindelhubtriebe, sind Hydromotoren mit Planetengetrieben und Abtriebsritzel angeordnet. Sie drehen die Hubsäule gegenüber ihrer Führung (Hubsäule). Hierdurch kann zunächst die Fahrtrichtung jeder Fahrwerksgondel unabhängig von den anderen geändert werden. Der Drehantrieb wird über einen Zahnkranz an der Hubsäule ausgebildet. Er ist drehbar am unteren Ende der Hubsäulenführung verlagert und greift mit zwei Knaggen in zwei vertikale Nuten der Hubsäule ein. Die Knaggen können sich beim Heben und Senken der mELVIS in den Nuten der Hubsäule verschieben. Um die Querkrafteinwirkung des Drehantriebes auf die Hubsäule auszuschalten, werden pro Hubsäule zwei gegenüberliegende Hydromotoren mit Planetengetriebe angeordnet. Über eine Steuerung können mit den einzeln unabhängig verdrehbaren Fahrwerksgondeln vier verschiedene Lenkmodi (Frontlenkung, Hecklenkung, Allradlenkung und Hundegang) umgesetzt werden. Jede der vier Kettenfahrwerksgondeln wird separat angetrieben. Die Zielgeschwindigkeit beträgt 0,5 m/s. Die maximal erreichbare Schubkraft der Kettenfahrwerksgondel 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 Absenkung der Fahrgeschwindigkeit unter Erhöhung der Schubkraft wird ermöglicht durch die Neigungsverstellbarkeit des Axialkolbenmotors im Fahrtrieb und durch eine neigungsverstellbare Axialkolbenpumpe. Durch Messung der Stromstärke des elektrischen Antriebs der Pumpe wird ein Ansteigen der Schubkraft erkannt, und über die Neigungen von Pumpe und Motor wird die Antriebsleistung bedarfsgerecht geregelt.

Die mELVIS wird manuell unter Sichtkontrolle mittels Kamera bis ca. 2 m an das Gebinde herangefahren und die Greifzangen geöffnet. Hier findet ein Umschalten von manueller Steuerung auf automatische Steuerung statt. Sensoren erfassen die Position der mELVIS gegenüber dem Behälter und ermöglichen eine Steuerung der Fahrtriebe, der Lenkung und der Spindelhubtriebe.

An der definierten Position am Behälter angekommen, senkt sich der Tragrahmen auf die Höhe, die für das Greifen des Behälters erforderlich ist. Im Rahmen der Vorkonstruktion wurde die Aufnahmeposition bei Unterkannte Gebinde 635 mm über Fahrbahnniveau definiert. Die höchste Hubstellung beträgt 707 mm (Unterkannte Gebinde), bei einer zugehörigen Gesamthöhe von 3.370 mm. Die niedrigste Stellung beträgt 400 mm (Unterkannte Gebinde) mit einer zugehörigen Gesamthöhe von 3.063 mm.

Senken erfolgt mittels an vier Säulen angeordneten Spindelhubelementen. Anschließend greifen zwei von Hydraulikzylindern angetriebene Zangen den Behälter am Behältermantel (vorne und hinten), siehe Abbildung 4-8. Die Zangen sind an zwei zusätzlichen Querträgern des Tragrahmens verlagert.

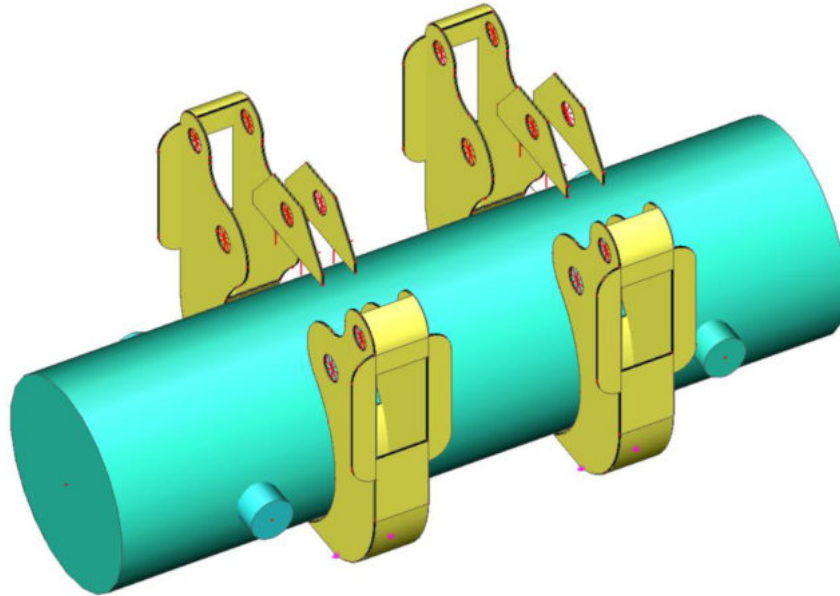


Abbildung 4-8: Lage der Greifzangen in Relation zum Behälter

Die vier aktiven Hydraulikzylinder der Zangen werden über einen Druckkreis angesteuert, so dass letzte Positionstoleranzen in der Positionierung der mELVIS gegenüber dem Gebinde zwangungsfrei ausgeglichen werden können. Der Positionstoleranzausgleich wird realisiert, indem beim Anlegen der Zangen beide Zylinder in einem Druckkreis liegen, vgl. Abbildung 4-9. Es bewegt sich zunächst die Zange mit dem geringsten Widerstand bis sie am Gebinde anliegt und anschließend die gegenüberliegende Zange. Erst nach dem Anliegen beider Zangen baut die Hydraulik den eingestellten Maximaldruck auf. Um eine Bewegung der Zangen im Fahrbetrieb auszuschließen werden die Greifzangen nach dem Anlegen an das Gebinde einzeln hydraulisch abgesperrt.

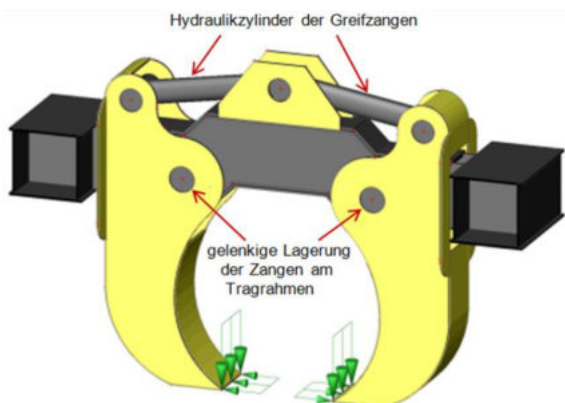


Abbildung 4-9: Konstruktion der Zangen am Querträger im Tragrahmen

Zum Anheben eines Gebindes ist neben der Gewichtskraft des Gebindes auch die Kraft zum Lösen des Gebindes vom angebackenen Salzgrus von der mELVIS aufzubringen. Das Anheben der Behälter erfolgt über die vier Spindelhubtriebe in den Eckstützen des Tragrahmens. Jeder Spindelhubtrieb verfügt über einen Elektroantrieb mit mechanischem Getriebe. Ein grober Lastausgleich zur gleichmäßigen Verteilung der Gesamtlast auf alle vier Spindel-

hubtriebe findet durch den Drehzahlabfall bei zunehmender Laststeigerung der Elektroantriebe statt.

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 Behälter 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 Behälter auf dem Plateauwagen abgelegt. Die mELVIS setzt das Gebinde in die Schalensegmente (s. Abschnitt 4.6) 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.

Zur Energieversorgung der mELVIS werden in den Querschlägen vorhandene Stromanschlüsse genutzt. Der elektrisch Antrieb ist für ein als 400 V Drehstromnetz ausgelegt. Die Energieversorgung wird über ein Schleppkabel realisiert. Ein Umstecken des Schleppkabels, besonders während des Behältertransports, ist zu vermeiden. Der Verbindungspunkt (Stecker) ist am Eingang der Rückholungsstrecke angebracht. Die benötigte Kabellänge richtet sich nach der maximalen Distanz zwischen Übergabestelle und den Rückholungstrecken. Für ein typisches Einlagerungsfeld mit 10 Einlagerungsstrecken beträgt dieser Abstand ca. 340 m. Die Steckbarkeit wird durch Verwendung von einem 63A CEE Stecker gewährleistet. Die mELVIS verfügt über eine angetriebene Trommel mit Spulhilfe, welche die benötigten beim Fahren variierenden Kabellängen zur Verfügung stellt.

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. Zum Auflegen des Behälters auf dem Plateauwagen muss die mELVIS in die höchste Hubposition verfahren. Um dies unter Einhaltung der Sicherheitsabstände realisieren zu können muss der Querschnitt an der Übergabestelle vergrößert werden. Neben einer Fisterhöhung ist auch eine Aufweitung der Streckenbreite nötig, um einen zusätzlichen Fahrweg neben der Übergabestelle zu ermöglichen. Mit ca. 3,8 m Firsthöhe und ca. 7,8 m Sohlbreite entsteht ein Querschnitt von ca. 30 m², siehe auch Abbildung 4-10.

Von der Übergabestelle aus entstehen für die mELVIS für ein typisches Einlagerungsfeld mit zehn Einlagerungsstrecken Fahrwege bis zu 600 m. Die entspricht einer Transportdauer von ca. 20 min für die Leerfahrt von der Übergabe zum Behälter oder dem Transport des Behälters zurück zur Übergabe. Für den Rückholungsprozess inkl. Positionierung über dem Behälter und über dem Plateauwagen wird eine Dauer von bis zu 60 min abgeschätzt. An der festen Übergabestelle finden bis zu 280 Rückholungsvorgänge statt (10 Einlagerungsstrecken à 28 Behälter). Um die Positionierung der mELVIS über dem Plateauwagen zu erleichtern und Schäden am Gleiskörper zu verhindern sind zusätzliche Maßnahmen zur Ertüchtigung der Übergabestelle notwendig. Der Gleiskörper sollte an der Übergabestelle nicht in einem Schotterbett liegen sondern in ein starres Betonbett eingelassen werden. Dies soll Verschiebungen beim Überfahren der mELVIS verhindern, damit Lagestabilität der Gleise verbessern und kontrollierte Bedingungen an der Übergabe schaffen. Die Gleisoberkante muss bündig zur Streckensole abschließen um die notwendige Höhendifferenz zwischen Plateauwagen und Unterkante des Behälters zu ermöglichen.

Der Streckentransport der zurückgeholten Behälter erfolgt gleisgebunden. Das bewährte Zugsystem aus dem Einlagerungsbetrieb wird auch während des Rückholungsbetriebes genutzt. Die Spurweite beträgt 1.435 mm (Normalspur). Der Gleisaufbau und verwendete Schienenprofile (Standardprofil S 54) werden analog zum Einlagerungsbetrieb genutzt.

BGE TEC 2018-09

nen, siehe Abbildung 4-11. Die feste Schale nimmt die Gewichtskraft des Gebindes auf. Die Tragzapfen sollen nicht als Anschlagmittel genutzt werden.

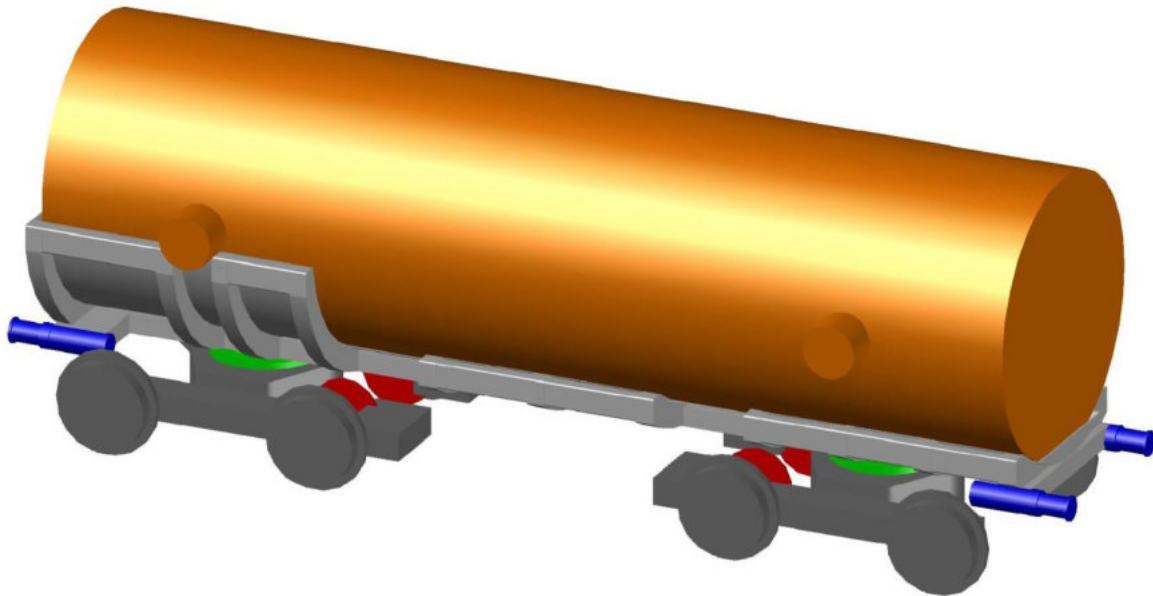


Abbildung 4-11: Konzept Plateauwagen für mELVIS, beladen

Wie in der Spannungsanalyse der Greifzangen an der Rückholungsvorrichtung mELVIS ersichtlich ist, ist ein Fassen des Gebindes mit zwei je 400 mm breiten Greifzangen (in Behälterlängsrichtung gemessen) problemlos realisierbar. Die Position der Greifzangen beim Ablegen ist bei der Konstruktion der Schale durch entsprechende Aussparungen zu berücksichtigen. Die Konstruktion des Plateauwagens muss das Überfahren des Wagens durch die mELVIS bis in die Beladeposition ermöglichen. Die mELVIS setzt in der Beladeposition den Behälter in die Schalensegmente ab. Danach fährt die mELVIS ihre Greifzangen soweit seitlich zurück, dass der Plateauwagen kollisionsfrei unter der mELVIS herausgezogen werden kann bzw. die mELVIS aus der Übergabeposition herausfahren kann. In Hubposition und mit geöffneten Greifzangen kann die mELVIS über den Plateauwagen hinweggefahren werden, ähnlich wie über den Salzsockel von dem der Behälter aufgenommen wurde.

Der Oberwagen des Plateauwagens ist durch eine geteilte Tragschale gekennzeichnet, siehe Abbildung 4-11. Von einer Stirnfläche an wird der POLLUX®-Behälter über eine Länge von ca. 1,6 m mit einer Umschließung von ca. 165° von der Tragschale gehalten. Die Stirnfläche ist über eine Höhe von ca. 0,7 m geschlossen. Die Position der Tragzapfen ist ausgespart. Über die verbleibende Länge wird der Behälter von einer Schale zu ca. 78° umschlossen. An den Absetzpunkten der Greifzangen ist dieser flachere Teil der Tragschale entsprechend ausgespart. Der Winkel der Umschließung an diesen kurzen Aussparungen beträgt noch ca. 50°. Die zweite Stirnfläche ist durch eine 100 mm hohe Barriere gesichert. Die wesentlichen Kenndaten des Plateauwagens sind:

Breite	1.725 mm
Länge	6.090 mm (über Puffer)

Höhe	1.240 mm (unbeladen)
	2.120 mm (beladen)
Ablagehöhe	600 mm
Masse	12 t

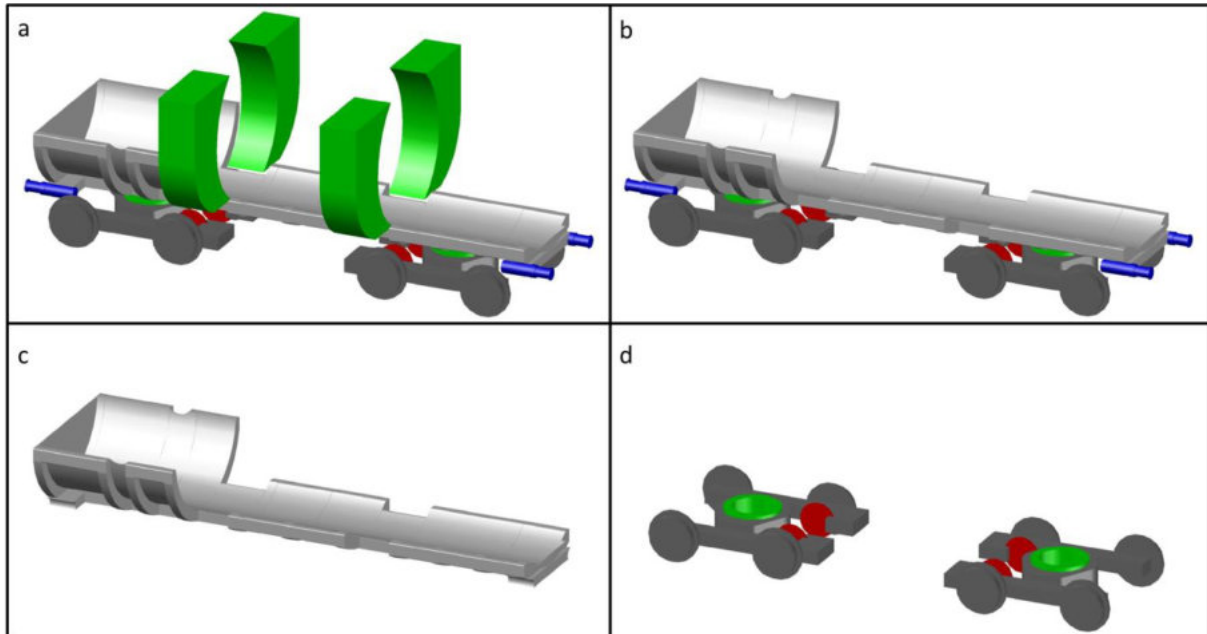


Abbildung 4-12: Konzept Plateauwagen für mELVIS: a – mit Greifzangen des mELVIS, b – unbeladen, c – Oberwagen mit Schale POLLUX®, d – Fahrwerke einzeln

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

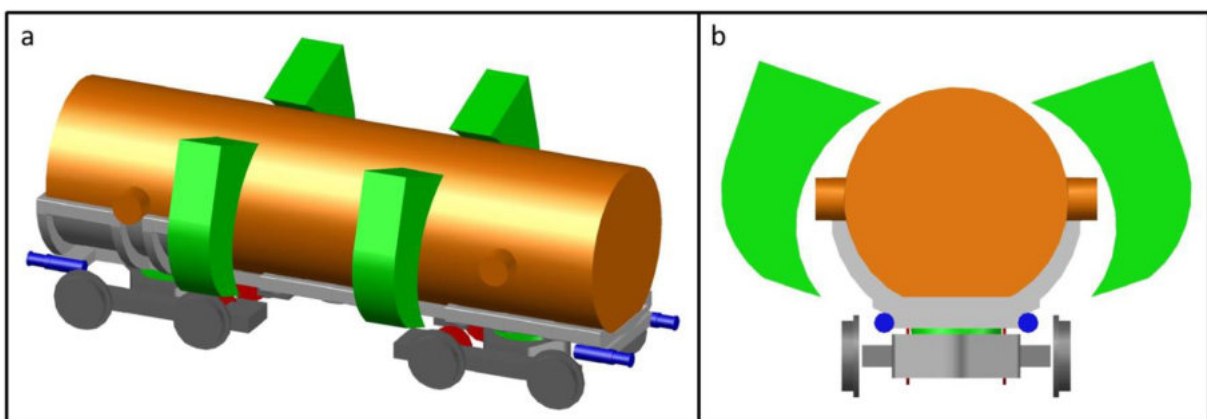


Abbildung 4-13: 19° Öffnungswinkel der Greifzangen erlauben Ausfahrt in beide Richtungen (Tragzapfen sind limitierend)

Die Einrichtungen zur Sicherung des Plateauwagens (z. B. Feststellbremse, Beleuchtung) entsprechen dem Stand der Technik und den Anforderungen, die sich aus dem untertägigen Betrieb in einem Salzbergwerk mit Strahlenschutzanforderungen ergeben.

Für den Transport der ebenfalls rückzuziehenden, wesentlich kleineren CASTOR®-THTR Behälter kann der Plateauwagen mit einem zusätzlichen Einsatz ausgestattet werden, in dem der CASTOR®-THTR abgelegt werden kann, siehe Abbildung 4-14. Die Konstruktion des Einsatzes muss ein Verrutschen desselben und des Behälters in der Tragschale verhindern.

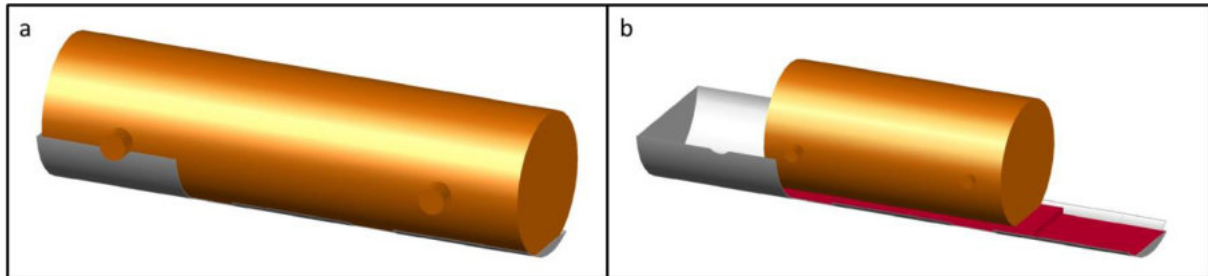


Abbildung 4-14: Schale des Oberwagens mit POLLUX® (links) und Einsatz für CASTOR®-THTR (rechts]

4.7 Automatisierungspotential während der Rückholung mit besonderer Berücksichtigung von Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz

Im Rückholungsbergwerk lassen sich im Grubengebäude außerhalb der Schächte den unterschiedlichen Arbeitsprozessen während der Auffahrung und Rückholung konkrete Maschinentypen zuordnen:

- | | |
|---------------------------------------|--|
| • Auffahrung der Strecken unter Tage: | Teilschnittmaschine |
| • Laden und Fördern des Abraums: | Fahrlader und Bandanlage |
| • Firstsicherung/Setzen von Ankern: | Ankerbohrwagen bzw. Ankerbohrlafette auf TSM |
| • Personentransport/Sondertransport: | andere bereifte Fahrzeuge |
| • Transport der Abfallgebinde: | Elektrolokomotive und angehängter Plateauwagen |
| • Freilegung Abfallgebinde: | Abbruchroboter |
| • Rückholung: | Modifizierte Einlagerungsvorrichtung |

Nach einer kurzen Einführung in das Feld der Automatisierung im Bergbau soll in Abschnitt 4.7.2 für die einzelnen Maschinentypen abgeschätzt werden, welcher Grad der Automatisierung dem heutigen Stand der Technik entspricht. Dieser wird an den in der Bau- und Bergbauindustrie üblichen Maschinen und am Angebot der industriell bedeutenden Zulieferer ermittelt.

Bei der Übertragung des Stands der Technik auf die Bedürfnisse eines Rückholungsbergwerks stellen sich die Fragen, welcher Grad der Automatisierung in diesem Kontext sinnvoll ist und ob der aktuelle Stand der Technik diesen abdeckt oder ob weitere Entwicklung für den jeweiligen Maschinentyp sinnvoll ist. Diese sollen in Kapitel 4.7.3 beantwortet werden. Das Hauptkriterium dabei werden die Auswirkungen auf Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz sein.

4.7.1 Automatisierung im Bergbau

Die grundsätzlich angestrebten Ziele von Automatisierungsprozessen im Bergbau sind:

- Steigerung der Produktivität (konstant hohe Qualität der Arbeit, hoher Zeitgrad),
- Verbesserung der Arbeitssicherheit und des Gesundheitsschutzes
- Reduktion von Lohnkosten durch geringeren Personalbedarf

Es lassen sich zwei große Teilbereiche unterscheiden:

Einerseits ist dies die Automatisierung von Maschinen, die sich in mehrere Stufen unterschiedlichen Automatisierungsgrades gliedert. Grundsätzlich ist natürlich auch eine Kombination dieser Stufen möglich.

In der ersten Stufe der Automatisierung erfolgt die Bedienung über eine Fernsteuerung in Sichtweite der Maschine. Das Gefühl für den Betriebsablauf geht dadurch natürlich in einem gewissen Maße verloren, was häufig mit einem Produktivitätsverlust einhergeht. Aus diesem Grund wird eine Fernsteuerung i.d.R. dann angewandt, wenn die Sicherheit des Maschinenführers so wesentlich gesteigert werden kann. Als Beispiele können Arbeiten zum Berauben der Firste oder das Setzen von Gebirgsankern dienen.

Die zweite Stufe nennt sich Teleoperation. Auch hier ist die Maschine ferngesteuert. Sie ist darüber hinaus mit Videokameras und einer umfangreichen Sensorik ausgestattet. Alle so aufgenommenen Daten werden zu dem Steuerstand transferiert, was dessen Einrichtung in quasi beliebiger Entfernung zur Maschine ermöglicht. Über Bildschirme und Steuereinrichtungen, die denen der Fahrzeugkabine nachempfunden sein können, kann der Maschinenführer in einem vertrauten Führerstand arbeiten, ohne sich den betrieblichen Gefährdungen und (z.B. klimatischen) Unannehmlichkeiten aussetzen zu müssen.

Die vollständige Automatisierung ist die dritte Stufe. Hierbei wird der Maschinenführer durch einen Computer inklusive Software ersetzt, die die Maschine steuert. Weitere Sensorik an der Maschine ist häufig auch nötig, um die Software mit der für sie notwendigen Datenbasis auszustatten. Eine Teilautomatisierung einzelner Prozesse ist ebenfalls möglich. Eine (Fern-) Überwachung mit Interventionsmöglichkeit im Sinne der Teleoperation gehört allerdings immer zur Vollautomatisierung dazu.

Der zweite große Bereich der Automatisierung besteht in der Verfolgung und Steuerung betrieblicher Zustände und Abläufe. Dafür muss ein aufwendiger Abgriff von betrieblichen Informationen in Bergwerken stattfinden, die zentral gesammelt und dargestellt werden, um auf ihrer Basis zügige operative Entscheidungen treffen zu können. Teilweise werden diese von einer Programmierung durchgeführt, teilweise von entsprechend geschultem Personal. Für diese Art der Automatisierung ist eine umfangreiche Ausstattung des Bergwerks, der Betriebsmittel und des Personals mit Sensorik und eine lückenlose Vernetzung dieser mit der verarbeitenden Software auf den Servern unter und über Tage nötig.

4.7.2 Stand der Automatisierungstechnik für Bau- und Bergbaumaschinen

Teilschnittmaschinen (TSM)

Automatisierungsgrad:	Vollautomatisierung mit Überwachung/Quittierung durch Geräteführer vor Ort
-----------------------	--

Der Zweck der Automatisierung einer Teilschnittmaschine (TSM) ist ganz wesentlich in der Erhöhung der Auffahrleistung, der zeitlichen Ausnutzung und der Qualität der geschnittenen Streckenkontur zu sehen. Es lassen sich des Weiteren deutliche Vorteile in Hinblick auf die Betriebssicherheit anführen: Eine (Teil-) Automatisierung entfernt den Maschinenführer aus einem Bereich, in dem eine massive Staubbelastung und die Gefährdung von herabfallendem Gestein vorhanden sind. Auch die Arbeit eines Vermessungstechnikers direkt am Schneidkopf im nicht ausgebauten Streckenbereich zur Vermessung des Sollprofils ist nicht weiter notwendig.

Die Robotisierung der TSM stützt sich zunächst auf eine entsprechende Sensorik, z.B. mit Laser Scannern, die die Position der TSM im Streckenquerschnitt und die relative Position des Schneidkopfes zum Maschinenkörper erkennt. Damit berechnet die Software die Position des Schneidkopfes gegenüber dem Streckenprofil. Mit Hilfe eines CAD-Querschnitts im Steuercomputer ist die TSM selbständig in der Lage, das gewünschte Streckenprofil zu schneiden. Im Falle von einem Ausfall elektronischer Bestandteile oder bei Sonderaufgaben ist ebenfalls eine Fernsteuerung der TSM möglich. (Grimscheid, 2012)

In Deutschland arbeitet z.B. die RAG mit automatisierten Teilschnittmaschinen, die den Eingriff des Maschinenführers nur zu Kontroll- und Korrekturzwecken benötigt. Diese TSM sind in der Lage, die folgenden Aufgaben zu erfüllen:

- Positionserkennung mit Hilfe von Laserscannern und Inklinometern,
- Grenzschichterkennung, ebenfalls mit Laserscannern, die am Schneidarm montiert sind,
- Teilautomatisiertes Schneiden: Bereitstellung von Schneidpfadplanungen, die der Maschinenführer bestätigen oder korrigieren muss, dann selbstständige Durchführung des Schneidprozesses
- Instandhaltungsplanung und
- Funktionsüberwachung, um die Instandhaltungsplanung zu unterstützen. (Falk-Schutte et al., 2012)

Radlader/Schürfraupen

Automatisierungsgrad:	Vollautomatisierung mit Ausnahme des Ladens von Haufwerk; Teleoperation
-----------------------	---

Im Fall von Radladern oder Schürfraupen hat der Stand der Technik noch keine Vollautomatisierung erreicht, auch wenn er nicht weit davon entfernt ist. Eine Vollautomatisierung erscheint auch häufig gar nicht als wünschenswert, da diese Maschinen häufig variable Aufgaben erfüllen müssen, die eine Programmierung schnell überfordern kann. Insbesondere das spontane Reagieren auf betriebliche Situationen erfordert das Eingreifen eines ausgebildeten Maschinenführers. Hat dieser dann nicht direkten Zugriff auf die Radlader, kann die Produktivität einer voll automatisierten Maschine schnell unter diejenige einer menschengesteuerten zurück fallen. Betriebliche Beispiele zum Stand der Technik von Radladern und Schürfraupen sind dementsprechend häufig zwischen einer reinen Teleoperation und der Vollautomatisierung anzusiedeln.

In Codelco's Kupfertagebau Andina in Chile erschweren die Umweltbedingungen die bergmännischen Arbeiten in sehr hohem Maße. Das dortige Wetter auf 4000 m Höhe (ü. N.N.) kann im Winter Temperaturen von -25 °C erreichen. In der Gebirgslage machen steile Formationen das Arbeiten bei widrigen Bedingungen wie Eis, Schnee, Blizzards und schlechter Sicht außerdem zusätzlich so gefährlich, dass der Tagebau im Winter während einiger Monate geschlossen werden muss. Zur Verbesserung des Arbeits- und Gesundheitsschutzes wurde deswegen zunächst der Steuerstand einer Schürfrau in einen gut isolierten und

gegen das Wetter abgeschirmte Innenraum verlegt. Über Kameras und Sensoren wird die Raupe also per Teleoperation in widrigsten klimatischen Bedingungen gesteuert. Codelco hat sich zum Ziel gesetzt, alle Produktionsmaschinen des Bergwerks auf diese Art und Weise zu automatisieren. (Codelco, 2015)

Das schwedische Eisenerzbergwerk Kiruna hat den Ruf, in Bezug auf Automatisierung eines der fortschrittlichsten Bergwerke weltweit zu sein, u.a. in Bezug auf die Steuerung von Radladern unter Tage. Dies ist insbesondere deswegen interessant, da Radlader keine stationär arbeitenden Maschinen sind, wie die TSM, sondern sich durch das Grubengebäude bewegen müssen. GNS (Globale Navigation Satellite) Systeme sind unter Tage natürlich nicht verfügbar. Aus diesem Grund sind die Stöße der Strecken in Kiruna mit Reflektoren bestückt, die von einem Laserscanner auf den Radladern angepeilt werden können. Dies erlaubt den Radladern die automatische Navigation im Bergwerk. Nur ein einziger Arbeitsschritt der Radlader ist nicht vollständig automatisiert: das Laden des Haufwerks. Dafür greift man in Kiruna auf die Technik der Teleoperation zurück. Da nur ein Teil des Radlader- Arbeitsspiels aus dem Ladevorgang besteht, kann ein einzelner Maschinenführer bis zu drei Radlader gleichzeitig steuern, um nur für den Ladevorgang einzugreifen. Die Führerstände für die Radlader sind an der Oberfläche positioniert. Dies wird durch das Glasfasernetzwerk, das die notwendigen Informationen in den Strecken und durch den Schacht transportiert, ermöglicht. (Arvidsson, 2005)

Ankerbohrwagen

Automatisierungsgrad:	Vollautomatisierung des Bohr- und Setzvorgangs; sonst Fernsteuerung
-----------------------	---

Das Setzen von Gebirgsankern ist bis heute nur teilautomatisiert. Aufgrund der komplexen Vorgänge wie Bohren, Einfüllen von Klebstoff, Setzen des Ankers und Aufnahme des nächsten Ankers aus dem Ankermagazin hat sich der Fortschritt weitestgehend auf diese Vorgänge konzentriert. So muss heute kein Bergmann mehr am Bohrkopf unter der ungesicherten Firste arbeiten, sondern kann alle Vorgänge beim Ankersetzen aus seiner Fahrerkabine oder mit einer Fernbedienung steuern. Von diesem industriellen Standard aus scheint die Komplettautomatisierung bzw. Teleoperation von der Oberfläche allerdings nur noch ein verhältnismäßig kleiner Schritt zu sein. (Marek et al., 2012) Es gibt schon Lösungen, die auch das automatische Ankersetzen nach einem festgelegten digitalen Bohrprofil/Ankerschema anbieten. (VMT, 2016) Allerdings haben sich diese scheinbar noch nicht bei den großen Anbietern durchgesetzt.

Gleiches gilt für TSM mit integriertem Manipulator zum Bohren und Setzen von Anker. Das automatisierte Anbringen von Netzen ist allerdings bis dato noch nicht Stand der Technik. Für diese Arbeit muss ein Bergmann immer noch dicht am Stoß arbeiten. Entsprechende Forschungsarbeiten, um auch diese Arbeit zu automatisieren, gibt es allerdings auch schon. (van Duin et al., 2012)

Andere Bereifte Fahrzeuge

Automatisierungsgrad: Vollautomatisierung

Die Automatisierung von SKW (Schwerlastkraftwagen) im Tagebau ist vermutlich am weitesten fortgeschritten von allen Projekten in dieser Richtung. Die Bergbaufirma Rio Tinto betreibt in West- Australien zwei Tagebaue, die seit Mitte 2015 mit vollständig automatisierten SKWs betrieben werden. Die Navigation der SKW funktioniert durch eine genaue 3D Kartierung und digitale Modellierung des gesamten Tagebaus und durch die GNSS Lokalisierung der SKW innerhalb dieses Modells. Über eine zusätzlich integrierte Teleoperation ist die Fahrwegplanung, Überwachung und Übernahme der Steuerung möglich. Die Steuerstände der Teleoperation befinden sich im ca. 1300 km vom Tagebau entfernten Perth. (ABC, 2015)

Für untertägige Anwendungen gibt es bereits namhafte Hersteller, die ähnlich leistungsfähige Lösungen versprechen. Dazu gehört z.B. SANDVIK mit der AUTOMINE Produktlinie. (Sandvik, 2015) Zusätzlich ist die Automatisierung von PKW interessant, die unter Tage zum Einsatz kommen. In den USA gibt es schon weit fortgeschrittene Projekte, in denen PKW selbstständig mit Autopilot auf öffentlichen Straßen fahren. Dieser Autopilot greift ebenfalls auf GNSS, umfangreiche Umgebungsscans zur Abstandshaltung und eine komplizierte Steuerungssoftware zurück. Frei erhältlich sind bislang Systeme, die in bestimmten Situationen, etwa im Stau, als Autopilot die Steuerung des Fahrzeugs übernehmen.

Züge

Automatisierungsgrad: Vollautomatisierung

Automatisierte Züge sind Stand der Technik und werden weltweit eingesetzt, vor allem in Großstädten in Europa und Asien. Die Überwachung der Züge eines Zugnetzes erfolgt über einen zentralen Steuerstand. Die Steuerung selbst ist durch eine entsprechende Sensorik im Zug und im Streckennetz möglich. Über die Gleise, Induktionsschleifen, Magnete und Funk können die beiden Systeme miteinander kommunizieren. Der Steuercomputer an Bord des Zuges verarbeitet diese Daten und steuert den Zug entsprechend. Für den Notfall sind Hilfsfahrstände in die Züge integriert. Insgesamt lassen sich drei funktionale Baugruppen einer Zugautomatisierung unterscheiden:

- Die automatisierte Sicherheitsvorrichtung vermeidet z.B. Kollisionen, überwacht Ampeln und Geschwindkeitsbegrenzungen. Im Notfall greift sie etwa durch eine Notbremsung ein.
- Die automatisierte Fahrsteuerung ersetzt den Fahrer und übernimmt alle seine Aufgaben.
- Die automatisierte Zugkontrolle koordiniert den Zug mit dem Fahrplan, der Route und dem übrigen Schienenverkehr.

Abbruchroboter

Automatisierungsgrad: Fernsteuerung

Ferngesteuerte Abbruchroboter sind im Bauwesen Stand der Technik. Die raupengetriebenen Fahrzeuge mit schwenkbarem Oberbau können mit verschiedenen Werkzeugen bestückt werden, die über den Ausleger in Position gebracht werden können. Zudem bieten sie die Möglichkeit, vier Stützausleger auszufahren. So bildet der Abbruchroboter ein Widerlager gegen die Reaktionskräfte der Abbrucharbeit. Bei marktüblichen Modellen ist die Automatisierung allerdings auf die Fernsteuerung durch einen Bediener in direkter Nähe des Abbruchroboters beschränkt.

Betriebsüberwachung

Die Betriebsüberwachung nach heutigem Stand der Technik gliedert sich in mehrere Ebenen:

Die erste Ebene bezieht sich auf die Erfassung von Daten unter Tage. Dort werden durch Sensorik verschiedenste Informationen über die Betriebssituation eingeholt, z.B. die Position aller Betriebsmittel und des Personals oder Leistungsdaten von Vortriebsmaschinen, Bandanlagen, Gewinnungsmaschinen usw. Diese Daten werden in ein Glasfasernetzwerk eingespeist und über die zweite Ebene, der Netzwerk Ebene, mit der übertägigen IT verbunden. Die IT Infrastruktur inklusive der Datenverarbeitung (3. Ebene) ermöglicht schließlich die Darstellung aller Daten für die Betriebsüberwachung und das Management (4. Und 5. Ebene). Diese Darstellung erfolgt einerseits ohne nennenswerte Verzögerung, was eine direkte Überwachung der Aktivitäten unter Tage ermöglicht. Andererseits werden z.B. die Leistungsdaten auch statistisch ausgewertet und die Ergebnisse dann periodisch in Tabellen hinterlegt.

Durch diese Datensammlung ist unter Zuhilfenahme des markscheiderischen Risswerks ebenfalls möglich, das gesamte Grubengebäude als 3D Modell darzustellen und betriebliche Informationen an den entsprechenden Betriebspunkten einzublenden. (Kipp et al., 2014)

4.7.3 Beurteilung des Automatisierungspotentials mit besonderer Berücksichtigung der Betriebssicherheit

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

Nach (BMU, 2010) ist in einem Endlager für radioaktive Abfälle weiterhin die Handhabung von Abfallgebinden von den bergmännischen Arbeiten möglichst vollständig zu trennen. Diese Sicherheitsanforderung ist sinngemäß auch in einem Rückholungsbergwerk anwendbar, auch wenn das Re-mining Konzept bergtechnische Arbeiten in der Nähe der Abfallgebinde zwingend erfordert. Auch bei der Betrachtung des Automatisierungspotentials der Maschinen

im Rückholungsbergwerk fällt diese Trennung ins Gewicht. Die entsprechende Beurteilung fällt in Hinblick auf die bergtechnischen und die direkt an der Freilegung und Handhabung der Gebinde beteiligten Maschinen recht unterschiedlich aus. Dies hat zwei wesentliche Gründe: Im bergtechnischen Umfeld sind häufig manuelle Arbeiten nötig, die grundsätzlich Personal erfordern, unabhängig vom Automatisierungsgrad der Hauptmaschine der Baustelle. Damit kann Personal nur begrenzt durch Automatisierung aus der direkten Baustellenumgebung entfernt werden. Bei der Handhabung von Abfallgebinden sind die Handhabungsschritte sehr klar definiert, was das Automatisierungspotential erhöht. Außerdem steht im Vordergrund, die Strahlenbelastung für das Personal auch unterhalb der Grenzwerte zu minimieren (StrlSchV, 2017).

Teilschnittmaschinen

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

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

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

Fahrlader

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

Voraussetzung für eine sinnvolle Automatisierung der Radlader ist deswegen, dass die Teilschnittmaschinen über ihren Ausleger nicht sofort die Bandanlage mit Abraum bedienen,

sondern ein Radlader diesen aufnimmt und zur Bandanlage transportiert. Gerade innerhalb der verhältnismäßig kurzen Querschläge könnte diese Lösung sinnvoller sein, als die Bandanlage inklusive Übergabestelle in die Querschläge hineinzubauen. Falls sich die Radladerschaufel dabei nie im Eingriff in loses Haufwerk befindet, sondern unter dem Auslegerende der TSM zur Abraumaufnahme positioniert wird, fällt auch die größte Schwierigkeit im Automatisierungsprozess eines Radladers weg. Mit einer Kombination von Reflektoren an der TSM und Sensoren am Radlader sollte es so möglich sein, auch das Laden des Radladers zu automatisieren. Diese Art von Radladerbetrieb ist also vollständig autonom möglich und wird nur über einen Steuerstand über Tage mit integrierter Teleoperation kontrolliert. Ein Geräteführer könnte durchaus mehrere Radlader gleichzeitig überwachen.

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

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

Ankerbohrwagen

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

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

Für den Fall einer systematisch in jeder Strecke stattfindenden Verankerung wird diese vernünftigerweise in den Vortrieb integriert. Ausgesprochen günstig stellt sich die Kombination

des Ankerbohrwagens mit der TSM dar, die in diesem Fall über eine eigene Ankerbohrlafette verfügt. Auch eine Automatisierung des Ankersetzens über ein digitales Ankerschema ist zur Qualitätssicherung sehr sinnvoll. Sowohl der Nachschub von Verbrauchsmitteln, als auch das Anbringen von Netzen an Firste und Stößen, muss allerdings nach heutigem Stand von Personal realisiert werden. Für die Steuerung der Maschine gilt gleiches wie in der Beschreibung zur TSM.

Grundsätzlich ist Teleoperation eines Ankerbohrwagens von der Oberfläche oder dem Infrastrukturbereich aus vorstellbar. Manuelle Arbeiten, wie das Nachladen von Verbrauchsmaterial, könnten weitestgehend im Infrastrukturbereich erledigt werden. Da allerdings im Vortrieb immer auch manuelle Arbeit anfällt, rechtfertigt der Aufwand den Nutzen nicht.

Andere Bereifte Fahrzeuge

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

Abbruchroboter

Ein Abbruchroboter käme zur Freilegung der Abfallgebinde bei Rückholung in der Variante Streckenlagerung zum Einsatz. Aufgrund der direkten Nähe zu den Gebinden ist die Anwesenheit von Personal zu vermeiden. Eine Fernsteuerung aus begrenzter Entfernung wäre möglich, eine Steuerung per Teleoperation aber noch deutlich günstiger („ALARA“ Prinzip). Ein vollautomatischer Betrieb brächte keine nennenswerten Sicherheitsvorteile und wäre überdies schwierig zu programmieren, da der Roboter den Salzgruß entfernen und den POLLUX®-Behälter erkennen muss, um ihn nicht zu beschädigen. Demnach ist eine Weiterentwicklung herkömmlicher, ferngesteuerter Abbruchroboter hin zu teleoperierten empfehlenswert.

Züge

In allen betrachteten Einlagerungsvarianten erfolgt der Transport der Abfallgebinde unter Tage gleisgebunden. POLLUX®-Behälter werden auf einem geeigneten Plateauwagen von einer angekoppelten elektrischen Lokomotive bewegt. Der Gleisverlauf bleibt dabei über längere Zeit konstant, da die Lokomotive nur zwischen Gebindetransportschacht und Eingang Rückholungsstrecke pendeln muss. Ziel jeglichen Umgangs mit den Abfallgebinden muss ein Maximum an Betriebssicherheit sein. Daran hat sich auch der Automatisierungsgrad zu messen. In einer Betriebsart, in der der Geräteführer jegliche Fahrbefehle steuert, ist ein Fehler des Geräteführers direkt ein potentieller Unfall. Bei Vollautomation ist die menschliche Fehleranfälligkeit eliminiert. Eine Kombination aus menschlicher Überwachung und automa-

tisierter Überwachung und Steuerung wie im zivilen Zugverkehr ermöglicht ein Höchstmaß an betrieblicher Sicherheit. Möglich wäre z.B., dass der Beladevorgang des Plateauwagens sowohl durch die Automatik gesteuert, als auch aus der Ferne nach dem Prinzip der Teleoperation vom Geräteführer überwacht wird. Erst wenn die Automatik den Beladevorgang des Plateauwagens als abgeschlossen meldet, kann der Geräteführer den Fahrbefehl für die Lokomotive geben. Diese fährt dann selbstständig zum Schacht, wobei der Geräteführer, der über Kameras die gesamte Gleisstrecke gleichzeitig im Blick behält, jederzeit durch Teleoperation eingreifen kann. Die Automatik muss mit redundanten Sicherheitssystemen ausgerüstet sein, um alle denkbaren Unfälle in eine beherrschbare Betriebssituation überführen zu können.

Modifizierte Einlagerungsvorrichtung in Streckenlagerung (mELVIS)

Die in (DEAB, 1995) in den Stand der Technik überführte Einlagerungsvorrichtung in Streckenlagerung ELVIS steht Pate für eine modifizierte Rückholungsvorrichtung. Die wichtigste Änderung in Bezug auf das Automatisierungspotential ist das Fehlen von Gleisen in den Einlagerungsstrecken zum Zeitpunkt der Rückholung. Diese werden aus Gründen des Strahlenschutzes auch nicht wieder errichtet. Deshalb ist die mELVIS mit einem Raupenfahrwerk ausgestattet. Bei der ELVIS erfolgt die Bedienung mit einer Fernsteuerung in Sichtweite. Zur weiteren Minimierung der Strahlenexposition wäre eine größere Entfernung des Bedieners zur Vorrichtung, und damit eine Teleoperation, sinnvoll. Diese könnte ermöglicht werden durch eine Überwachung der mELVIS mit Videokameras, die ihre Daten per Kabel (z.B. durch ein Datenkabel, das in die Isolation des Stromkabels integriert ist) oder Funk versenden können.

Bei einer Vollautomatisierung wären die wesentlichen Aufgaben der Orientierung der mELVIS im Grubengebäude und das automatisierte Erkennen des Abfallgebindes zu lösen.

Einzig zum Verlegen der Stromversorgung in der Einlagerungsstrecke und zum Anschließen der mELVIS an das Stromnetz ist Personal im Regelbetrieb in der Einlagerungsstrecke notwendig. Diese Arbeiten sollten für den jeweiligen Streckenabschnitt abgeschlossen sein, bevor das Abfallgebinde freigelegt wird.

Betriebsüberwachung

Die Gesamtüberwachung des Endlagerbergwerks mitsamt jedem Mitarbeiter unter Tage ist aus mehreren Gründen empfehlenswert.

Zum einen erleichtert dies die Kontroll- und Überwachungsaufgaben des Managements und der bestellten Aufsichtspersonen über sämtliche Betriebsprozesse. Das bedeutet, dass jeder Betriebspunkt und jede Maschine Statusmeldungen an das Leitsystem abgeben müssen. Dies betrifft mindestens alle in diesem Kapitel 4.7.3 aufgeführten Maschinen und die Schachtförderanlagen.

Zum anderen ist die kurzfristige Planung von Betriebsmitteleinsätzen so effizienter möglich. Der wichtigste Vorteil besteht allerdings im Bereich der Betriebssicherheit und des Strahlenschutzes: Durch die Positionsanzeige jedes einzelnen Mitarbeiters unter Tage ist im Ernstfall ein sehr zielgerichtetes Notfallmanagement möglich. Dieses kann die Verteilung und mögli-

che Nutzung von Personal und Betriebsmitteln direkt einbeziehen, z.B. für einen Verletzten-transport. Auch sind der Eintritt, der Aufenthalt und das Verlassen von Strahlenschutzbereichen so gut zu überwachen. Es kann also sichergestellt werden, dass sich nur befugtes Personal an entsprechenden Betriebspunkten aufhält. Gleiches kann für das Bedienen von untertägigem Gerät gelten. Hier sollten Mitarbeiter über bspw. Transponder an der Maschine registriert werden. Nur, entsprechend geschultes Personal dürfte so die fragliche Maschine bedienen. Bei nicht autorisierten Mitarbeitern würde sie keine Befehle annehmen (außer Bremsen und Ausschalten).

4.7.4 Zusammenfassung des Automatisierungspotentials im Rückholungsbergwerk

Grundsätzlich lassen sich in einem Rückholungsbergwerk viele maschinelle Abläufe in Teilen oder sogar in Gänze nach aktuellem Stand der Technik automatisieren. Grundsätzlich wäre eine Vollautomatisierung 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 Abfallgebinde ginge es darum, Personal vor Strahlung zu schützen.

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

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

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.

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

4.8 Betriebsstörungsanalyse

Die Zielsetzung der Betriebsstörungsanalyse ist die Identifizierung von Betriebsstörungen beim Rückholungs- bzw. Einlagerungsprozess, die sich aus dem Versagen einzelner Komponenten oder Bauteile ergeben können und in deren Folge es zu potenziellen Auswirkungen auf das aus POLLUX[®]-Behälter, Plateauwagen und mELVIS bestehende Gesamtsystem sowie zu radiologischen Konsequenzen für das Betriebspersonal kommen kann. Daraus sind Anforderungen an Komponenten und Systeme bzw. an den Rückholungs- bzw. Einlagerungsprozess abzuleiten, um Beschädigungen der technischen Einrichtungen des Gesamtsystems und Gefährdungen des Betriebspersonals vermeiden bzw. sicher ausschließen zu können.

Der im Hinblick auf die möglichen Betriebsstörungen zu betrachtende Rückholungsprozess beginnt mit dem der Anfahrt des POLLUX[®]-Behälters in der Rückholungsstrecke und endet mit dem Abtransport des mit dem POLLUX[®]-Behälter beladenen Plateauwagens. Der Einlagerungsprozess beginnt mit der Anfahrt des auf dem Plateauwagen liegenden POLLUX[®]-Behälters und endet mit der Ausfahrt der mELVIS aus der Einlagerungsstrecke. Der mELVIS kann sowohl im Automatikbetrieb als auch manuell gefahren werden. Aus diesem Grund sind im Rahmen der Betriebsstörungsanalyse Störungen infolge des Ausfalls von Überwachungselementen zu unterstellen. Ebenso zu unterstellen sind Betriebsstörungen, die ihre Ursache zum Beispiel im mechanischen Versagen, in einer Motorüberlastung oder im Stromausfall von Antriebselementen haben. Betriebsstörungen infolge des Versagens (Zerstörung durch Bruch) von im Kraftfluss liegenden Bauteilen oder Komponenten werden ebenfalls berücksichtigt.

Die Betriebsstörungsanalyse für den mELVIS wurde in Anlehnung an die FMEA "Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse" Methode durchgeführt. Hierbei wurden die einzelnen Komponenten entsprechend ihrer Funktion auf mögliche Störungen während des Betriebsablaufes hin untersucht. Den einzelnen Komponenten wurden potentielle Ausfallursachen zugeordnet. Entsprechend der Ursache wurden die möglichen Folgen der Betriebsstörung abgeschätzt. Die gefundenen Betriebsstörungen können entsprechend dem zu erwartenden Folgen in charakteristische Gruppen zusammengefasst werden. Den einzelnen Betriebsstörungen konnten außerdem wirksame Gegenmaßnahmen zur Vermeidung, Eingrenzung oder Behebung der Störung zugeordnet werden, so dass für eine weitere Auslegung der mELVIS relevante Anforderungen identifiziert werden können.

Da bei der Betriebsstörungsanalyse die Komponenten untersucht werden, sind hier die Betriebsabläufe der Einlagerung identisch mit denen der Rückholung nur in umgekehrter Reihenfolge. Der Betriebsablauf der Rückholung ist in Kapitel 4.5 und der Betriebsablauf für eine mögliche gleislose Einlagerung ist in Kapitel 4.9.3 beschrieben.

Die Komponenten der mELVIS sind in Abbildung 4-7 dargestellt. Zusätzlich zu diesen Komponenten sind noch die folgenden Komponenten bei der Betriebsstörungsanalyse betrachtet worden:

- Allradlenkung (manuell/automatisch)
- Steuerungssoftware
- Sensoren
- Kamera

Die im Rahmen der hier durchgeführten Analyse ermittelten Störungen werden wie folgt bewertet:

A) zulässiger Systemzustand

Dies ist ein vom normalen Betriebszustand im Hinblick auf relative Positionen einzelner Komponenten zueinander nicht abweichender Zustand des Gesamtsystems, bei dem die primäre Störung selbst zu keinem Gefahrenzustand führt und in dessen Folge auch keine Beschädigung oder Zerstörung weiterer Komponenten oder Bauteile erfolgen kann. Eine zusätzliche Strahlenexposition für das Betriebspersonal bei der Behebung von Betriebsstörungen tritt nicht auf, da ein Austausch bzw. eine Reparatur von Antriebselementen in Abwesenheit des beladenen Transferbehälters oder bei bereits entladene Transferbehälter durchgeführt werden können.

B) unzulässiger Systemzustand

Dies ist ein vom normalen Betriebszustand im Hinblick auf relative Positionen einzelner Komponenten zueinander abweichender Zustand des Gesamtsystems, bei dem die primäre Störung selbst zu keinem Gefahrenzustand führt, in dessen Folge jedoch eine Beschädigung oder Zerstörung weiterer Komponenten oder Bauteile erfolgen kann, die zu keinem Gefahrenzustand führen. Hieraus ergeben sich zusätzlich Anforderungen an die Überwachung der Arbeitsbewegungen der Einlagerungsvorrichtung hinsichtlich des Weges und der Endlagen einzelner Komponenten oder Bauteile mit Validierung der Position für die SPS, um Beschädigungen oder Zerstörungen zu vermeiden. D.h., ein Folgeschritt kann durch einen Schaltvorgang der positionsüberwachenden Elemente nur dann eingeleitet werden, wenn die Komponente oder das Bauteil eine bestimmte vorgesehene Position eingenommen hat und ein entsprechendes, unverwechselbares Signal an die SPS geliefert worden ist, nachfolgend "positiv schlüssige Überwachung" genannt. Eine Redundanz oder Diversität bei Überwachungselementen ist nicht erforderlich. Ein gleiches Sicherheitsniveau kann durch mechanische Verriegelung erreicht werden.

C) Gefahrenzustand (Aktivitätsfreisetzung und/oder unabgeschirmte Direktstrahlung)

Dies ist ein vom normalen Betriebszustand im Hinblick auf relative Positionen einzelner Komponenten zueinander abweichender Zustand des Gesamtsystems, bei dem die primäre Störung entweder selbst bzw. unmittelbar zu einer Gefährdung durch Aktivitätsfreisetzung und/oder Direktstrahlung führt oder in dessen Folge eine Beschädigung oder Zerstörung weiterer Komponenten oder Bauteile erfolgen kann, die zu einer Gefährdung durch Aktivitätsfreisetzung und/oder Direktstrahlung führt. Hieraus ergeben sich im Hinblick auf die Überwachung der Arbeitsbewegungen der Einlagerungsvorrichtung über die aus der Vermeidung

unzulässiger Systemzustände resultierenden Anforderungen hinaus Anforderungen im Hinblick auf Redundanz oder Diversität bei der Überwachung der Wege und Endlagen einzelner Komponenten oder Bauteile, um Gefahrenzustände sicher auszuschließen. D.h., ein Folgeschritt kann nur dann eingeleitet werden, wenn beide Überwachungselemente ein entsprechendes Signal über die eingenommene vorgesehene Position einer Komponente oder eines Bauteils an die SPS übermitteln.

In der Tabelle 4-2 wird eine Übersicht über die möglichen Betriebsstörungen der mELVIS dargestellt. Bei dem derzeitigen Planungsstand der Arbeiten ist es im Augenblick nicht möglich, das Brandereignis oder die mechanische Einwirkung auf den Behälter zu identifizieren, welche auslegungsbestimmend sind. Aus diesem Grund wurden all diese Ereignisse als auslegungsbestimmend bewertet. Bei den potentiellen Störungsursachen wird zu den Wartungsfehlern auch das Nicht-Erkennen von Verschleiß gezählt.

Tabelle 4-2 Übersicht über die Betriebsstörungen

System/Komponente	Funktion	Potenzielle Störung	Potenzielle Störungsursache (Beispiele)	Potenzielle Folgen	Bewertung		Gegenmaßnahme/Beurteilung
Kettenfahrwerk 4 Stück	Transport	Verkanten einer Kette	Technisches Versagen, Fahrfehler, Wartungsfehler	Fahruntüchtigkeit, Unterbrechung Rückholung	B ¹	A ²	Reparatur vor Ort, mit (1) und ohne (2) Behälter möglich, es ist zu prüfen wie eine Reparatur möglich ist
		Bruch einer Kette	Technisches Versagen, Fahrfehler, Wartungsfehler	Fahruntüchtigkeit, Unterbrechung Rückholung	B ¹	A ²	Reparatur vor Ort, mit (1) und ohne (2) Behälter möglich, es ist zu prüfen wie eine Reparatur möglich ist
		Bruch eines Antriebsritzels	Technisches Versagen, Fahrfehler, Wartungsfehler	Fahruntüchtigkeit, Unterbrechung Rückholung	B ¹	A ²	Reparatur vor Ort, mit (1) und ohne (2) Behälter möglich, es ist zu prüfen wie eine Reparatur möglich ist
		Bruch einer Führungsrolle	Technisches Versagen, Fahrfehler, Wartungsfehler	Fahruntüchtigkeit, Unterbrechung Rückholung	B ¹	A ²	Reparatur vor Ort, mit (1) und ohne (2) Behälter möglich, es ist zu prüfen wie eine Reparatur möglich ist
Hydromotor des Kettenfahrwerks	Antrieb Kettenfahrwerk	Ausfall	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Fahruntüchtigkeit, Unterbrechung Rückholung	B ¹	A ²	Reparatur vor Ort, mit (1) und ohne (2) Behälter möglich, es ist zu prüfen wie eine Reparatur möglich ist
		Leckage	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Fahruntüchtigkeit, Unterbrechung Rückholung	B ¹	A ²	(1) Behälter ist gegriffen: Rückholung beenden, danach Werkstattreparatur, (2) ohne Behälter: direkt Werkstattreparatur
		Überhitzung	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Brand – thermische Einwirkung	C		Auslegungsbestimmendes Brandereignis
Gelenkige Lagerung des Kettenfahrwerks 4 Stück	Lenkung Kettenfahrwerks	Bruch eines Bolzens	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Fahruntüchtigkeit, Unterbrechung Rückholung	B ¹	A ²	Reparatur vor Ort, mit (1) und ohne (2) Behälter möglich, es ist zu prüfen wie eine Reparatur möglich ist

System/Komponente	Funktion	Potenzielle Störung	Potenzielle Störungsursache (Beispiele)	Potenzielle Folgen	Bewertung		Gegenmaßnahme/Beurteilung
Hydromotor der Lenkung	Antrieb der Lenkung	Ausfall	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Fahruntüchtigkeit, Unterbrechung Rückholung	B ¹	A ²	Reparatur vor Ort, mit (1) und ohne (2) Behälter möglich, es ist zu prüfen wie eine Reparatur möglich ist
		Leckage	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Fahruntüchtigkeit, Unterbrechung Rückholung	B ¹	A ²	(1) Behälter ist gegriffen: Rückholung beenden danach Werkstattreparatur, (2) ohne Behälter: direkt Werkstattreparatur
		Überhitzung	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Brand – thermische Einwirkung	C		Auslegungsbestimmendes Brandereignis
Zahnkranz mit Eingriff in die Hubsäule 4 Stück	Lenkung	Bruch	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Fahruntüchtigkeit, Unterbrechung Rückholung	B ¹	A ²	Reparatur vor Ort, mit (1) und ohne (2) Behälter möglich, es ist zu prüfen wie eine Reparatur möglich ist
Allradlenkung manuell	Transport	Ausfall	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Fahruntüchtigkeit, Unterbrechung Rückholung	B ¹	A ²	Reparatur vor Ort, mit (1) und ohne (2) Behälter möglich, es ist zu prüfen wie eine Reparatur möglich ist
		Zusammenstoß	Fahrfehler	Unfall – mechanische Einwirkung	C		Auslegungsbestimmendes Ereignis für den Behälter, MELVIS ist mit Sensoren zur Vermeidung eines Zusammenstoßes auszurüsten
Allradlenkung automatisch	Transport	Ausfall	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Fahruntüchtigkeit, Unterbrechung Rückholung	A		Umschalten auf Allradlenkung manuell
		Zusammenstoß	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Unfall – mechanische Einwirkung	C		Auslegungsbestimmendes Ereignis für den Behälter, MELVIS ist mit Sensoren zur Vermeidung eines Zusammenstoßes auszurüsten

System/Komponente	Funktion	Potenzielle Störung	Potenzielle Störungsursache (Beispiele)	Potenzielle Folgen	Bewertung		Gegenmaßnahme/Beurteilung
Hubsäule mit Längsnut und Hubspindel 4 Stück	Anheben/Senken	Ausfall	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Anheben/Absenken Behälter nicht möglich, Unterbrechung Rückholung	B ¹ C ²	A ³	(1) mit Behälter: Beendigung der Rückholung, danach Werkstattreparatur, (2) mit Behälter aber Beendigung der Rückholung nicht möglich, Reparatur vor Ort, Fall sollte vermieden werden, (3) ohne Behälter : direkt Werkstattreparatur
Spindelhubantrieb 4 Stück	Antrieb Heben/Senken	Ausfall eines Antriebs	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Anheben/Absenken Behälter nicht möglich, Unterbrechung Rückholung	B ¹	A ²	Reparatur vor Ort, mit (1) und ohne (2) Behälter möglich, es ist zu prüfen wie eine Reparatur möglich ist
		Ausfall mehrerer Antriebe	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Schiefelage des Behälters, Anheben/Absenken Behälter nicht möglich, Unterbrechung Rückholung	C ¹	A ²	Reparatur vor Ort, mit (1) und ohne (2) Behälter möglich, kann bei Schiefelage des Behälters zu dessen Absturz führen, dies ist zu verhindern, es ist zu prüfen wie eine Reparatur möglich ist

System/Komponente	Funktion	Potenzielle Störung	Potenzielle Störungsursache (Beispiele)	Potenzielle Folgen	Bewertung	Gegenmaßnahme/Beurteilung
Greifzangen 2 Stück	Greifen Behälter	Bruch einer Zange	Herstellungsfehler, Technisches Versagen	Absturz eines Behälters – mechanische Einwirkung	C	Ist über Qualitätssicherung bei der Fertigung und Wartung auszuschließen
		Zangen öffnen/schließen nicht	Hydraulikzylinder defekt	Behälter kann nicht gegriffen/abgesetzt werden, Schiefelage des Behälters, Absturz Behälters	C ¹ A ²	Reparatur vor Ort, mit (1) und ohne (2) Behälter möglich, kann bei Schiefelage des Behälters zu dessen Absturz führen, dies ist zu verhindern, es ist zu prüfen wie eine Reparatur möglich ist
		Zange öffnet sich bei gegriffenen Behälter	Sperrung Hydraulikzylinder defekt	Absturz eines Behälters – mechanische Einwirkung	C	Auslegungsbestimmendes Ereignis für den Behälter, Öffnen der Zangen bei gegriffenen Behälter muss ausgeschlossen werden, mechanische Verriegelung sollte zusätzlich eingebaut werden
Hydraulikzylinder Greifzangen 4 Stück	Antrieb Greifzangen	Ausfall eines Druckkreises	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Behälter kann einseitig nicht gegriffen werden, Schiefelage des Behälters, Behälter kann nur einseitig abgesetzt werden, Absturz eines Behälters, Unterbrechung Rückholung	C ¹ A ²	Reparatur vor Ort, mit (1) und ohne (2) Behälter möglich, kann bei Schiefelage des Behälters zu dessen Absturz führen, dies ist zu verhindern, es ist zu prüfen wie eine Reparatur möglich ist

System/Komponente	Funktion	Potenzielle Störung	Potenzielle Störungsursache (Beispiele)	Potenzielle Folgen	Bewertung		Gegenmaßnahme/Beurteilung
		Ausfall beider Druckkreise	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Behälter kann nicht gegriffen werden, Absturz eines Behälters, Behälter kann nicht abgesetzt werden, Unterbrechung Rückholung	C ¹	A ²	Reparatur vor Ort, mit (1) und ohne (2) Behälter möglich, kann zum Absturz des Behälters führen, dies ist zu verhindern, zusätzliche mechanische Verriegelung ist vorzusehen, es ist zu prüfen wie eine Reparatur möglich ist
		Leckage	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Druck wird nicht aufgebaut, Zangen Öffnen/Schließen nicht	C ¹	A ²	Reparatur vor Ort, mit (1) und ohne (2) Behälter möglich, kann bei Schiefelage des Behälters zu dessen Absturz führen, dies ist zu verhindern
Sperrung Hydraulikzylinder	Verriegelung Greifzangen	Ausfall eines Zylinders	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Öffnen einer Greifzange, Schiefelage eines Behälters, Absturz eines Behälter	C		Reparatur vor Ort, kann bei Schiefelage des Behälters zu dessen Absturz führen, dies ist zu verhindern, zusätzliche mechanische Verriegelung ist vorzusehen, es ist zu prüfen wie eine Reparatur möglich ist
		Ausfall mehrere Zylinder	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Absturz eines Behälter – mechanische Einwirkung	C		Auslegungsbestimmendes Ereignis für den Behälter, Öffnen der Zangen bei gegriffenen Behälter muss ausgeschlossen werden, mechanische Verriegelung sollte zusätzlich eingebaut werden

System/Komponente	Funktion	Potenzielle Störung	Potenzielle Störungsursache (Beispiele)	Potenzielle Folgen	Bewertung		Gegenmaßnahme/Beurteilung
Hydraulikaggregat mit Tank	Antrieb Hydraulik	Ausfall	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Unterbrechung Rückholung, Öffnen der Greifzangen	C ¹	A ²	Reparatur vor Ort, mit (1) und ohne (2) Behälter möglich, kann zum Öffnen der Greifzangen und damit zum Absturz des Behälters führen, mechanische Verriegelung sollte zusätzlich eingebaut werden, es ist zu prüfen wie eine Reparatur möglich ist
		Überhitzung	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Brand – thermische Einwirkung	C		Auslegungsbestimmendes Brandereignis
		Leckage	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Unterbrechung Rückholung, Öffnen der Greifzangen	C ¹	A ²	Reparatur vor Ort, mit (1) und ohne (2) Behälter möglich, kann zum Öffnen der Greifzangen und damit zum Absturz des Behälters führen, mechanische Verriegelung sollte zusätzlich eingebaut werden, es ist zu prüfen wie eine Reparatur möglich ist
Kabeltrommel	Stromversorgung	Kabel wickelt nicht richtig auf/ab	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Unterbrechung Rückholung	B ¹	A ²	Reparatur vor Ort, mit (1) und ohne (2) Behälter möglich, es ist zu prüfen wie eine Reparatur möglich ist

System/Komponente	Funktion	Potenzielle Störung	Potenzielle Störungsursache (Beispiele)	Potenzielle Folgen	Bewertung		Gegenmaßnahme/Beurteilung
E-Schrank	Stromversorgung, Elektrik	Stromausfall	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Unterbrechung Rückholung	B ¹	A ²	Reparatur vor Ort, mit (1) und ohne (2) Behälter möglich, bei einem Stromausfall muss auf jeden Fall sichergestellt sein, dass der gegriffene Behälter nicht abstürzt durch Öffnen der Greifzangen, es ist zu prüfen wie eine Reparatur möglich ist
		Ausfall SPS	Externe Einflüsse	Unterbrechung Rückholung	B ¹	A ²	Reparatur vor Ort, mit (1) und ohne (2) Behälter möglich, SPS muss gegen Spannungsschwankungen geschützt sein
		Brand	Überhitzung	Brand – thermische Einwirkung	C		Auslegungsbestimmendes Brandereignis
Steuerungssoftware	Steuerung	Ausfall	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Unterbrechung Rückholung	A		Reparatur vor Ort
		Programmierfehler	Herstellungsfehler	Kann zum Absturz eines Behälters führen	C		Software ist vor dem Betrieb zu testen, Fehler sind auszuschließen
Sensoren	Überprüfung Funktion mELVIS	Ausfall, Defekt	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Unterbrechung Rückholung, mechanische Einwirkung aufgrund Unfall	C		Kann zu einem Zusammenstoß führen, Sensoren sind so auszulegen, dass ein Ausfall eines Sensors erkannt wird und dann sofort repariert wird, Ausfall eines Sensors sollte zum Stillstand der mELVIS führen

System/Komponente	Funktion	Potenzielle Störung	Potenzielle Störungsursache (Beispiele)	Potenzielle Folgen	Bewertung	Gegenmaßnahme/Beurteilung
Kamera	Überwachung	Ausfall, Defekt	Technisches Versagen, Wartungsfehler	Unterbrechung Rückholung, mechanische Einwirkung aufgrund Unfall	C	Kann zu einem Zusammenstoß führen, Bei Ausfall der Kamera ist der mELVIS anzuhalten/abzuschalten, der Behälter muss ggf. weiter gegriffen sein, Reparatur vor Ort

Das Ergebnis der Betriebsstörungsanalyse zeigt, dass die Sperrung der Hydraulikzylinder der Greifzangen nicht nur hydraulisch erfolgen kann. Eine zusätzliche mechanische Verriegelung sollte integriert werden, damit es auf keinen Fall zum unfreiwilligen 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 entwickeln. Sie sind wichtig, um Unfälle und damit mechanische Einwirkungen auf die mELVIS und das Gebinde zu verhindern. Bei Ausfällen von Sensoren bzw. Kameras ist die mELVIS sofort stillzusetzen, damit kein Unfall passiert. Bei einigen Komponenten, z.B. dem Kettenfahrwerk, ist eine einfache und schnelle Reparatur bzw. ein Austausch wichtig, um die Strahlenexposition des Betriebspersonals zu reduzieren. Diese Anforderung ist bei der weiteren Planung der mELVIS zu berücksichtigen.

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 im nächsten Schritt der Planung umgesetzt werden können. Mit der Umsetzung dieser Vorschläge wird sich somit die Bewertung der Störungen z.T. verändern.

4.9 Übertragung der mELVIS auf die Einlagerung

Die modifizierte Einlagerungsvorrichtung in Strecken (mELVIS) basiert auf der Konstruktion des existierenden und bereits erprobten Prototyps der Einlagerungsvorrichtung in Strecken. Die im Einlagerungsbetrieb genutzten Schienen werden nach der Einlagerung und vor dem Versatz geraubt. Diese Maßnahme soll die Rückholung erleichtern. Ein erneuter Aufbau der Schienen während des Rückholungsbetriebes ist in den Richtstrecken bis zum Übergabepunkt vorgesehen, nicht aber in den Querschlägen und Einlagerungsstrecken, da Arbeiten der Belegschaft in direkter Nähe zu den Behältern zur Reduzierung der radiologischen Belastung soweit möglich vermieden werden sollen. Als Alternative zu einem gleisgebundenen Fahrwerk wird die Rückholungsvorrichtung mELVIS deshalb mit einem Raupenfahrwerk ausgerüstet.

Die Vorteile eines gleislosen Antriebs könnten theoretisch auch bei der Einlagerung genutzt werden. Eine Übertragung des gleislosen Systems auf die Einlagerung stellt eine mögliche Optimierung der bestehenden Einlagerungstechnik dar. Mit dem Einsatz einer selbstfahrenden Einlagerungsvorrichtung würden, analog zur Rückholung, der Gleisbau sowie das spätere Rauben innerhalb der Einlagerungsstrecken entfallen. Damit sinken der betriebliche Aufwand und die radiologische Belastung der Belegschaft während des Einlagerungsbetriebes.

Der Einsatz der mELVIS ist aber nicht direkt auf die Einlagerung übertragbar. Die Konstruktion des mELVIS erfolgte mit dem Ziel, die generelle Machbarkeit aufzuzeigen und gleichzeitig eine größtmögliche Zuverlässigkeit der Vorrichtung zu erreichen. Eine Optimierung der Baugröße stand nicht im Vordergrund. Es wurde ein möglichst einfacher und robuster Aufbau der Struktur mit einer auf das Notwendigste reduzierten Zahl von beweglichen Elementen angestrebt. Dort wo bewegliche Komponenten erforderlich sind, wurde angestrebt, bewährte Serienbauteile zu verwenden. Die Konstruktion orientiert sich an am bereits bestehenden Prototyp der Einlagerungsvorrichtung in Strecken (ELVIS). Die mELVIS ist in ihren Abmessungen

größer als dieser Prototyp. Mit den im Rahmen der durchgeführten Machbarkeitsstudie ermittelten Abmessungen könnte die mELVIS in tiefster Transportposition gerade noch in die Einlagerungsstrecke fahren, vgl. dazu Abbildung 4-15. Die Sicherheitsabstände zu den Stößen und der Firste werden aber nicht mehr eingehalten. Die maximale Hubposition kann ebenfalls nicht erreicht werden. Weiterhin ist zu beachten, dass der aktuelle Entwurf der mELVIS dazu konzipiert ist, den Behälter von einem Salzsockel aufzunehmen. Die Aufnahme direkt von der Sohle und damit auch das Ablegen auf der Sohle sind mit der gegenwärtigen Konstruktion nicht möglich.

Für den Einsatz der mELVIS während der Einlagerung müssen weitere konzeptionelle Anpassungen vorgenommen werden. Zusätzlich ist auch eine Anpassung des Querschnitts der Einlagerungsstrecke möglich.

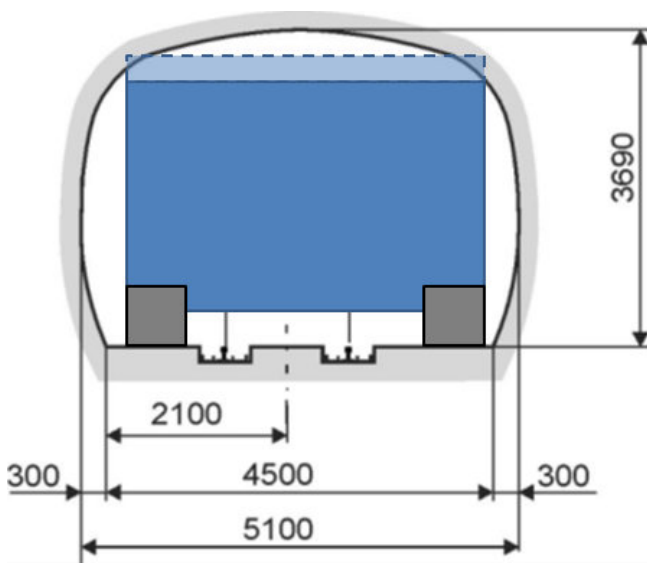


Abbildung 4-15: mELVIS im Querschnittprofil der Einlagerungsstrecke

4.9.1 Anpassung Streckenquerschnitt

Die mELVIS in ihrer aktuellen Konzeption ist zum einen in ihren Abmessungen zu groß für die Einlagerungsstrecke. Zum anderen kann die Vorrichtung den Behälter nicht direkt auf der Sohle ablegen. Die mELVIS ist für die Aufnahme eines Behälters von einem Salzsockel und seiner Ablage auf dem Plateauwagen konstruiert.

Mit der Entwicklung des ursprünglichen Einlagerungskonzeptes wurde eine Minimierung des Einlagerungsquerschnittes angestrebt. Der unkomprimierte Versatz als Salzgrus mit anfänglich hoher Porosität weist gegenüber dem Gebirge ungünstigere Wärmeleiteigenschaften auf. Kleine Streckenquerschnitte begünstigen damit die Ableitung der Nachzerfallswärme über den Versatz ins Gebirge, führen zu einer beschleunigten Kompaktion des Versatzes durch die Streckenkonvergenz (kleiner Querschnitt und höhere Konvergenz durch wärmeres Gebirge). Daraus resultieren ein frühzeitiger Einschluss der Behälter/Abfälle im Gebirge und eine frühzeitige Funktionsfähigkeit des passiven Sicherheitssystems. Die Hohlraumminimierung führt auch zu grundsätzlich günstigeren gebirgsmechanischen Verhältnissen im Endlager. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten können außerdem mit kleinen Streckenquerschnitten die Auffahrungskosten, die benötigte Haldenkapazität und auch die Versatzkosten

reduziert werden. Im Gegensatz dazu kann ein kleiner Streckenquerschnitt die Einlagerungs- und Versatztätigkeit erschweren bzw. gesonderte konstruktive Maßnahmen bei der Ausgestaltung der Vorrichtungen erfordern. (DBE, 1995) (DEAB T60)

Aus der Auslegungsanforderung einer Rückholbarkeit nach (BMU, 2010) resultieren auch an den Streckenquerschnitt veränderte Anforderungen. Eine Minimierung des Querschnittes ist weiterhin anzustreben, dies muss aber unter der Maßgabe einer möglichen Rückholung erfolgen. Die technische Umsetzung der Auslegungsanforderung Rückholbarkeit führt wie bereits erläutert zu einer Modifizierung der Einlagerungsvorrichtung als Vorrichtung zur Rückholung, was mit einer Vergrößerung des Mindestquerschnitts während der Rückholung verbunden ist. Diese Querschnittserhöhung ist für die Rückholung tolerierbar, da entsprechend der getroffenen Annahmen die Räumung des gesamten Endlagers unterstellt wird und damit Anforderungen an die Langzeitsicherheit entfallen. Aus betrieblicher/wirtschaftlicher Sicht ist dies, neben den bereits genannten Vorteilen, mit einem erhöhten Auffahrungsaufwand, zusätzlicher Haldenkapazität und einem erhöhten Versatzaufwand verbunden.

Der Sicherheitsaspekt eines möglichst zügigen Einschlusses der Behälter durch kleine Querschnitte, gute Wärmeanbindung und hohe Konvergenzraten hat weiterhin Bestand. Durch aktuelle Forschungsarbeiten zur Analyse radiologischer Konsequenzen wird die zwingende Notwendigkeit einer Querschnittsminimierung allerdings relativiert. Verfüllung und Verschluss als Gesamtsystem zur langzeitsicheren Abtrennung der Abfälle von der Biosphäre werden von mehreren, voneinander unabhängigen Parametern charakterisiert. Analysen dieses Gesamtsystems im Rahmen radiologischer Konsequenzenanalysen (GRS, 2018) zeigen, dass einige Parameter besonders sensitiv für die Einschlusswirksamkeit sind. Dies sind besonders stark die Diffusionsrate und im Vergleich dazu schwächer die Endporosität des Versatzes sowie die Löslichkeitsgrenze. Die Trockenkonvergenzrate sowie die Erhöhung der Konvergenz durch Feuchtigkeit und die Anfangsfeuchtigkeit weisen eine geringe Sensitivität auf das Gesamtsystem auf. Vergleichsrechnungen zeigen außerdem, dass verlängerte Transportwege einer vermeintlich schlechten (hohen) Durchlässigkeit im Versatz entgegenwirken.

In ähnlicher Weise zeigten auch die im Rahmen der Vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) (GRS, 2013) durchgeführten radiologischen Konsequenzenanalysen, dass die Versatzkompaktion in den heißen und trockenen Einlagerungsstrecken vergleichsweise sehr schnell abgeschlossen ist und der Versatz in diesem Bereich sehr schnell seine Barrierefunktion erfüllen kann. In den ebenso untersuchten Alternativszenarien mit defekten Behältern und verminderter Barrierefunktion hat die Behälterlage bzw. die daraus resultierende Transportlänge bis zur Grenze des ewGs einen entscheidenden Einfluss auf die erwartete Freisetzung, charakterisiert durch den radiologischen Geringfügigkeitsindex (RGI).

Ein vergrößerter Querschnitt der Einlagerungsstrecken steht damit nicht unbedingt im Widerspruch zur Einhaltung der Sicherheitsanforderungen. Eine negative Beeinflussung des sicheren Einschlusses ist nicht zwingend gegeben bzw. kann durch andere Maßnahmen kompensiert werden.

Für die Anpassung des Streckenquerschnitts sind die Abmessungen der mELVIS und die relevanten Sicherheitsabstände zu den Stößen bzw. der Firste zu berücksichtigen. Von bisher ca. 17 m² Querschnitt mit 4,5 m Sohlbreite und 3,7 m Höhe müsste der Querschnitt auf ca. 21 m² vergrößert werden, vgl. dazu Abbildung 4-16. Die Sicherheitsabstände wurden nach DIN EN 349 mit 200 mm zur Firste und 500 mm zum Stoß gewählt. In der ursprünglichen Planung nach (DBE, 1995) wurde ein Mindestabstand zur Firste von 100 mm berücksichtigt.

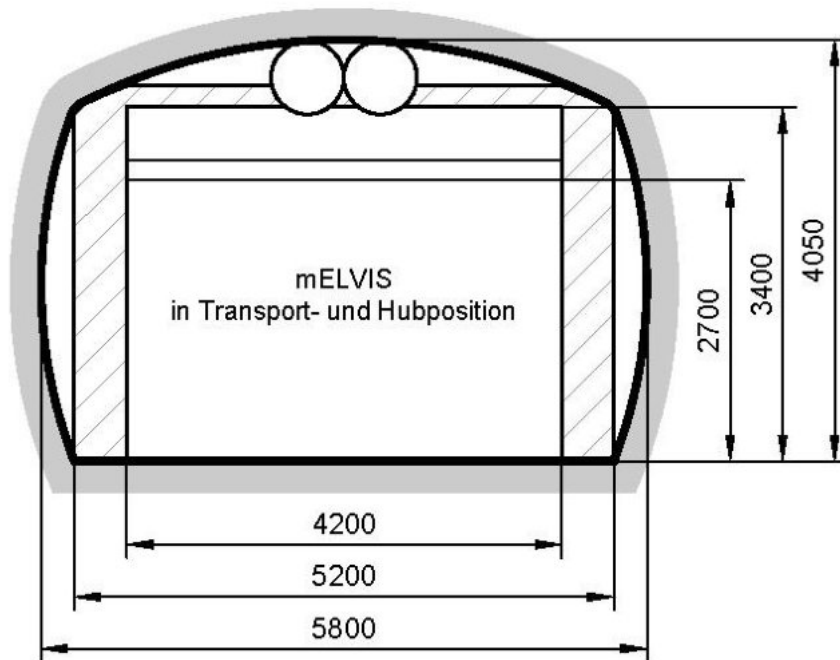


Abbildung 4-16: Möglicher Querschnitt Einlagerungstrecke, angepasst an die Abmessungen der mELVIS

Mit der Annahme die mELVIS in ihrer bestehenden Konstruktion zu nutzen, müsste neben der Querschnittsvergrößerung auch ein Salzsockel zur Ablage der Behälter in den Einlagerungstrecken geschaffen werden. Grundsätzlich stehen dafür folgende Methoden zur Verfügung:

- A) Freischneiden des Sockels aus der Sohle
- B) Installation des Sockels nach der Auffahrung der Einlagerungstrecke
- C) Einlagerung von Sockel und Behälter in einem Schritt

Das Freischneiden des Sockels und auch die Installation eines Sockels nach der Auffahrung, beispielsweise aus geschnittenen Salzformsteine/-elementen, Ort beton (Salz beton), Betonformsteinen (Salz beton) oder Naturstein führen zu einem erheblichen betrieblichen Mehraufwand während der Einlagerung. Dies steht dem Ziel, den betrieblichen Aufwand durch den Gleisbau zu vermeiden, entgegen. Die Einlagerung der Behälter zusammen mit einer Sockelkonstruktion erfordert eine weitere Anpassung der Einlagerungsvorrichtung. Die Anforderungen an die Behälteraufnahme ändern sich. Die geforderte Nutzlast steigt deutlich. Für einen Sockel aus mit dem Steinsalz vergleichbarem Material und Abmessungen ähnlich dem

Sockel während der Rückholung würde die Nutzlast um ca. 15 Tonnen auf rund 80 Tonnen steigen. Es wird daher keine der genannten Möglichkeiten als geeignet eingeschätzt und weiter betrachtet. Um die Ablage der Behälter auf der Streckensohle zu gewährleisten muss die Konstruktion der mELVIS angepasst werden.

4.9.2 Konstruktive Anpassungen der mELVIS

Die aktuelle Konstruktion der mELVIS repräsentiert eine erste Machbarkeitsstudie der gleislosen Rückholung und veränderten Behälteraufnahme. Wie bereits einleitend erläutert, lag der Fokus auf der Entwicklung einer möglichst einfachen, robusten und zuverlässigen Konstruktion. Weitere Optimierungen sind im Rahmen detaillierter Planungen der Vorrichtung möglich. So zeigte auch die durchgeführte Betriebsstörungsanalyse, dass die Konstruktion weiter zu optimieren ist. Ziel der in diesem Abschnitt untersuchten Optimierung ist es, das Ablegen der Behälter auf der Streckensohle und damit eine Erhöhung des Hubwegs zu ermöglichen. Dem gegenüber sollen die Abmessungen der mELVIS aber nicht weiter vergrößert werden. Eine Anpassung des Streckenquerschnittes ist grundsätzlich möglich (siehe vorheriger Abschnitt), soll aber möglichst gering ausfallen.

Die Unterkante der Greifzangen muss Hubhöhen zwischen 0 mm (Sohle) und 707 mm (entsprechend der Machbarkeitsstudie mELVIS) realisieren. *"...das maximal durchfahrbare Lichtraumprofil von der Einlagerungsvorrichtung abhängig. Je größer der Weg ist, den die Einlagerungsvorrichtung den Behälter nach dem Abheben vom Plateauwagen absenken muss, umso höher baut sie. Die Bauhöhe erhöht sich dabei systembedingt jeweils um den doppelten Betrag des zusätzlichen Absenkweges."* (DBE, 1988) Die Bauhöhe der Teleskopstützen wird durch die Konstruktion der Raupenfahrwerke und die Konstruktion der Spindelhubwerke definiert. Die Raupenfahrwerke im aktuellen Entwurf der mELVIS inklusive der Verbindungselemente zu den Spindelhubwerken sind 790 mm hoch.

Mit der Forderung, die Behälter vom Plateauwagen aufnehmen und auf der Sohle ablegen zu können, steigt der Hubweg der Spindelhubwerke von 307 mm auf 707 mm. Aus dem Aufbau der Spindelhubwerke resultiert damit eine Mindestbauhöhe von 1.900 mm im eingefahrenen Zustand. Die Teleskopstütze als Kombination aus Raupenfahrwerk und Spindelhubwerk hat damit eine Mindestbauhöhe von 2.690 mm, siehe Abbildung 4-17. In der höchsten Hubposition entspricht dies einer Höhe von 3.400 mm und ist damit vergleichbar zur Konstruktion der mELVIS.

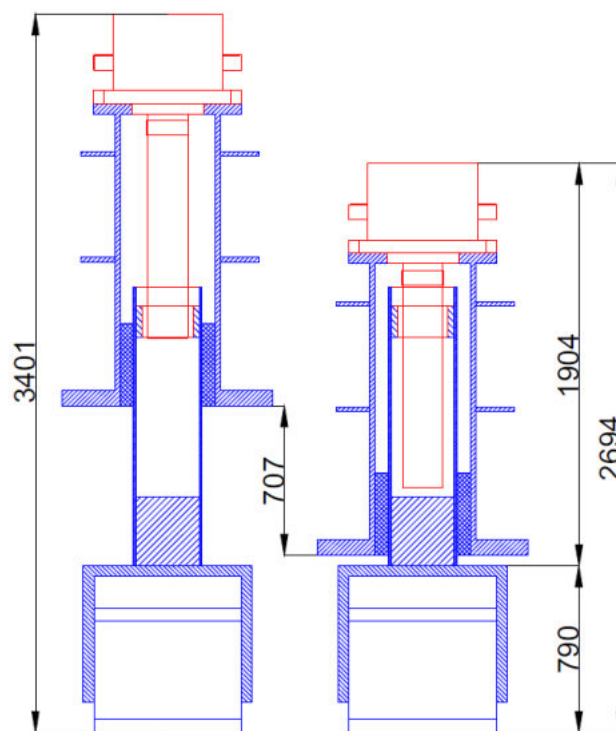


Abbildung 4-17: Entwurf Teleskopstütze mit Hubhöhe 707 mm

Die Baugröße der mELVIS wird neben den Teleskopstützen auch von der Konstruktion der Behälteraufnahme und ihrer Verlagerung beeinflusst. Die Behälteraufnahme besteht aus den wesentlichen Baugruppen der Greifzangen, dem Querträger zur Verlagerung und den Hydraulikzylindern zum Öffnen und Schließen der Zangen. Die Gestaltung der Greifzangen erlaubt das Aufnehmen der Behälter von der Sohle bzw. einem Salzsockel innerhalb der Rückholungsstrecke. Eine Ablage auf der Sohle ist mit der gegebenen Geometrie ebenso möglich. Die Zangen und die Hydraulikzylinder sind an einem Querträger verlagert. Dieser ist entsprechend dem Zangendesign und der für die Rückholung benötigte Ablage- und Aufnahmehöhe am Kopfbereich der Teleskopstützen mit dem Tragrahmen verbunden. Aus dieser Position und der Anordnung der Hydraulikzylinder definiert sich die maximale Baugröße der mELVIS. Die Ablage- und Aufnahmehöhe der Vorrichtung kann über einen veränderten Anschlagpunkt der Querträger und auch des Tragrahmens an den Teleskopstützen beeinflusst werden. Um den Behälter von der Sohle aufnehmen zu können müssen die Querträger 400 m unter ihrer bisherigen Position verlagert werden, vgl. Abbildung 4-18. Mit dieser Anpassung wandern auch die Verlagerungen der Hydraulikzylinder nach unten. Die Baugröße der Vorrichtung wird somit ausschließlich von den bereits beschriebenen, angepassten Teleskopstützen bestimmt.

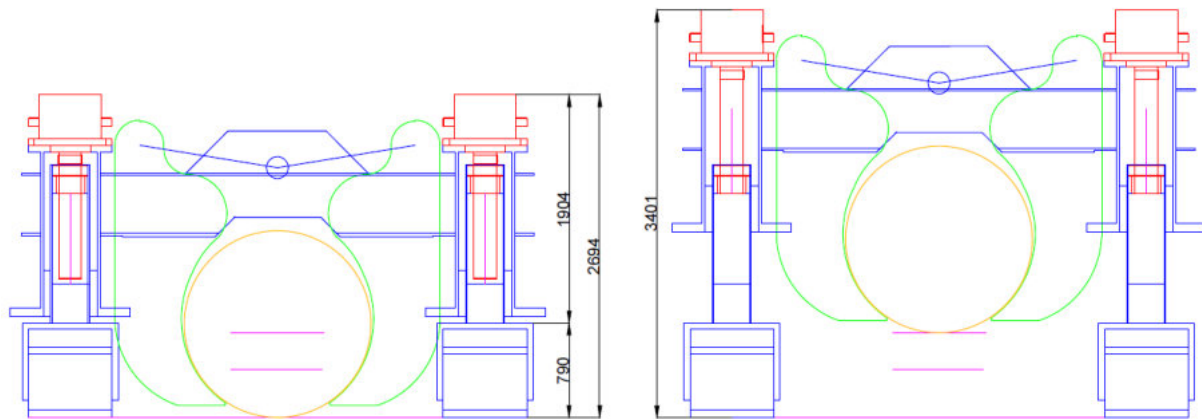


Abbildung 4-18: für die Einlagerung optimierte mELVIS in Ablageposition (links) und höchster Hubposition (rechts)

Aus der Kombination der einzelnen Anpassungen ergeben sich für die in ihrer Hubhöhe optimierte mELVIS folgende Abmessungen:

Höhe Ablageposition Sohle	2.694 mm
Höhe Ablageposition Sockel	3.294 mm
Höhe Transportposition	3.094 mm
Höhe maximal	3.401 mm

Eine Anpassung der mELVIS an die Anforderungen der gleislosen Einlagerung ist damit möglich. Gegenüber der ersten Machbarkeitsstudie der mELVIS würde die beschriebene Anpassung zu einer Vergrößerung der Baugröße um ca. 30 mm führen. Es wird erwartet, dass durch eine weitere Optimierung bzw. vertiefende Planung der mELVIS und insbesondere der Raupenfahrwerke die Baugröße der Vorrichtung verringert werden kann.

4.9.3 Beschreibung der Betriebsabläufe bei der gleislosen Einlagerung

Die Betriebsabläufe bei der gleislosen Einlagerung von über Tage bis zum Querschlag sind identisch mit den Betriebsabläufen des POLLUX®-Behälters bei der gleisgebundenen Einlagerung.

Die detaillierten Betriebsabläufe für die gleislose Einlagerung von POLLUX®-Behältern bestehen aus den folgenden Arbeiten:

- Manuelle Einfahrt der mELVIS in den Querschlag
- Wechsel zu Automatikbetrieb
- Automatische Positionierung über dem mit dem POLLUX®-Behälter beladenen Platteauwagen mithilfe von sensorgesteuerter Fahr- und Lenkregelung
- Absenken der Tragrahmen
- Greifen des POLLUX®-Behälters mittels der Greifzangen
- Verriegelung der Hydraulikventile der Greifzangen im geschlossenen Zustand
- Heben der Tragrahmen und dadurch Anheben des POLLUX®-Behälters
- Wechsel zum Manuellen Betrieb

- Manuelle Fahrt zum Einlagerungsort
- Wechsel zum Automatikbetrieb
- Automatische Positionierung der mELVIS an der Einlageposition
- Senken der Tragrahmen und Absetzen des POLLUX[®]-Behälters auf der Strecke
- Lösen der Verriegelung der Hydraulikventile der Greifzangen
- Öffnen der Greifzangen
- Greifzangen in Ruheposition fahren
- Wechsel zum Manuellen Betrieb
- Ausfahrt der MELVIS in den Querschlag
- Versetzen des POLLUX[®]-Behälters mit Salzgrus

4.9.4 Bewertung der betrieblichen Sicherheit und übergeordnete Sicherheitsaspekte

Aus der Betriebsstörungsanalyse der mELVIS (s. Kapitel 4.8) ergaben sich keine Störungen, die eine gleislosen Einlagerung ausschließen. Gleichwohl wurden aber verschiedene Punkte identifiziert, die im Rahmen konkretisierender Planungen weiterzuentwickeln sind. Dies gilt für beide Fälle, gleislose Rückholung und gleislose Einlagerung.

5 Thermomechanische Simulation der Standsicherheit der Rückholungsstrecke

5.1 Ausgangsdaten

5.1.1 Geologie

Im Rahmen der VSG (GRS, 2012) wurde für den Standort Gorleben eine Endlagerauslegung für das Einlagerungskonzept der Streckenlagerung erarbeitet. Diese dient für das Vorhaben ERNESTA als Referenzkonzept für die Entwicklung eines Rückholungskonzepts. Aus diesem Grund bilden die geologischen Daten des Standorts Gorleben die Grundlage für die Erarbeitung eines generischen Modells für die vorliegende Analyse.

Die Geologie des Standorts Gorleben wurde ausführlich im Arbeitspaket 6 der "Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben" beschrieben (GRS, 2012). Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass der Einlagerungsbereich im Hauptsalz z2HS liegt. Die Einlagerungssohle befindet sich in einer Teufe von 870 m unter GOK. Der Grundspannungszustand ist lithostatisch isotrop. Die Dichte von Steinsalz beträgt 2.200 kg/m^3 . Auf der Einlagerungssohle wirkt ein Überlagerungsdruck von 18,8 MPa. Das geomechanische Temperaturfeld im Standort Gorleben ist durch einen vertikalen Temperaturgradient von $2,35 \text{ K/100 m}$ gekennzeichnet. Das führt zu einer Gebirgstemperatur im Einlagerungsbereich von ca. $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

5.1.2 Endlagerbehälter

Das Referenzkonzept sieht die Einlagerung der Brennstäbe ausgedienter Brennelemente in POLLUX[®]-10 Behältern vor. Dieser Behältertyp wird deshalb für die vorliegende Analyse zugrunde gelegt.

Der POLLUX[®]-10 besteht aus einem Innen- und einem Außenbehälter. Der Innenbehälter besteht aus Feinkornbaustahl (Werkstoff 1.6210), hat eine Wandstärke von 160 mm und wird durch einen geschraubten Primärdeckel und einen geschweißten Sekundärdeckel dicht verschlossen. Der Innenraum ist in fünf Kammern unterteilt, in die je eine Brennstabbüchse mit Brennstäben von 2 Druckwasserreaktoren (DWR)-Brennelementen oder 6 Siedewasserreaktor (SWR)-Brennelementen eingesetzt werden kann. Unter geometrischen Gesichtspunkten können die Brennstabbüchsen auch die gezogenen Brennstäbe von 5 WWR-Brennelementen aufnehmen. In der innen angeordneten, quadratischen Büchse können anstatt der Brennstäbe gepresste Strukturelemente eingebracht werden. In Abbildung 5-1 ist beispielhaft ein POLLUX[®]-Behälter mit gezogenen Brennstäben aus 10 DWR-Brennelementen dargestellt.

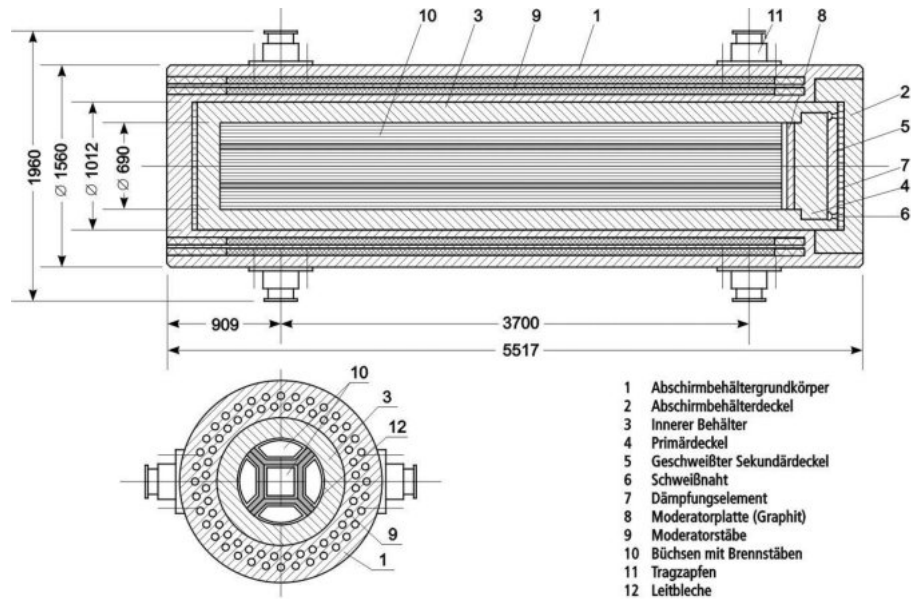


Abbildung 5-1: POLLUX®-Behälter (GRS, 2012)

Der äußere Abschirmbehälter ist wie der Primär- und Sekundärdeckel aus Sphäroguss (Werkstoff 0.7040) hergestellt und hat eine Wandstärke von ca. 270 mm. Dieser Abschirmbehälter hat keine Dichtfunktion zu übernehmen und wird mit einem verschraubten Deckel verschlossen. Im Mantel sind in radial verteilten Bohrungen Stäbe aus Polyethylen zur Verringerung der Neutronendosisleistung der Abfallbehälter eingesetzt.

5.1.3 Wärmeleistung einzelner Brennelemente

Die POLLUX®-10-Behälter können wahlweise mit den Brennstäben von 10 Brennelementen aus Druckwasserreaktoren westlicher Bauart (DWR), von 30 Brennelementen aus Siedewasserreaktoren westlicher Bauart (SWR) oder von 25 Brennelementen aus Druckwasserreaktoren russischer Bauart (WWER) beladen werden. Die unterschiedliche Behälterbeladung lässt sich damit begründen, dass die Brennstäbe aus SWR-Brennelementen um zwei Drittel kürzer sind, als die DWR-Brennstäbe und so eine dreifache Beladung in einem Behälter möglich ist. Die WWER-Brennstäbe sind dünner als ihr westliches Pendant, was eine zweieinhalbfache Beladung ermöglicht.

Den Berechnungen liegt das Abfallmengengerüst gemäß (GRS, 2011b) zugrunde. In den Reaktoren westlicher Bauart DWR und SWR wurden als Brennstoffe Uranoxid- (UO_2) und Mischoxidbrennelemente (MOX) jeweils auf Basis der Nuklide Uran 235 und Plutonium eingesetzt. In den Reaktoren russischer Bauart kamen nur UO_2 -Brennstoffe zum Einsatz. Die Nachzerfallswärme dieser Brennstoffe wurde entsprechend den in (GRS, 2011b) beschriebenen Abbrandberechnungen übernommen. Die Abbrandberechnungen gelten für jeweils eine charakteristische Nachzerfallswärme pro Abfallart ohne Berücksichtigung von Abbrand und Anreicherung der Brennelemente.

Für die Einlagerung von MOX-Brennelementen, die im Vergleich zu UO_2 -Brennelementen eine hohe Wärmeproduktion aufweisen, wurde eine Behälterbeladung entwickelt, die zum

überwiegenden Anteil aus den Brennstäben von UO_2 -BE besteht und zu einem geringen Anteil aus denen der MOX-BE (DBE TEC, 2005). Das in (GRS, 2012) verwendete Verhältnis in der Behälterbeladung von 89 % UO_2 -Anteil und 11 % MOX-Anteil entspricht dem Mischungsverhältnis, welches sich aus dem Verhältnis der Gesamtmengen von DWR- UO_2 -BE und DWR-MOX-BE ableitet.

In Abbildung 5-2 ist die thermische Leistung der einzelnen Brennelementtypen in einer zur Beladung mit DWR-BE äquivalenten Bestückung dargestellt. Die gemischte Beladung mit 89% UO_2 und 11% MOX deckt die Wärmefreisetzung der UO_2 -Brennelemente aus DWR-Reaktoren und SWR bzw. WWER-Reaktoren konservativ ab. Die Wärmeleistung für reine Beladungen aus MOX-Brennelementen ist auch in der Abbildung zu sehen. Behälter mit solcher Beladung sind theoretisch möglich, unter Einhaltung einer Auslegungstemperatur von 200°C im Steinsalz praktisch aber nicht umsetzbar.

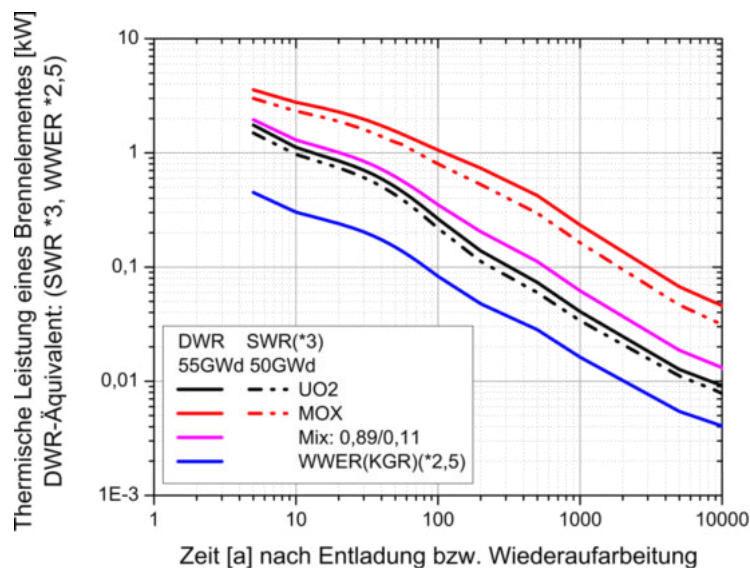


Abbildung 5-2: Thermische Leistung eines Brennelementes in Abhängigkeit von der Zeit, beladungsäquivalent zu einem DWR-BE

Im Abschlussbericht der "Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe" (Kommissionsbericht, 2016) wird ein frühester Einlagerungsbeginn frühestens für das Jahr 2045 angenommen. Die Zwischenlagerzeit der radioaktiven Abfälle beträgt zu diesem Zeitpunkt je nach Abfallart und Entstehungszeitpunkt ca. 60 Jahre. Für die thermo-mechanischen Berechnungen wird konservativ die kürzeste Zwischenlagerzeit von 57 Jahren mit dem dazu gehörigen Abklingen der Wärmeleistung angenommen. (GRS, 2012) geht von einem Einlagerungsbeginn 2035 und einer Zwischenlagerzeit von 49 Jahren aus. Aus der verlängerten Zwischenlagerzeit resultiert eine verringerte thermische Leistung der Brennelemente.

Die einzulagernden Behälter weisen zum Zeitpunkt ihrer Einlagerung bereits eine erhöhte Ausgangstemperatur auf. In den Berechnungen wird – wie auch in (GRS, 2012) – angenommen, dass die Ausgangstemperatur 70 °C beträgt. Die Größe dieser Ausgangstempera-

tur hat auf die einzelnen Temperaturmaxima, insbesondere auf die zeitlich späten Maxima, keinen Einfluss.

5.2 Modellbildung

5.2.1 Berechnungsmodell

Das Berechnungsmodell, als Abbildung des Endlagers, muss thermische Überlagerungen und daraus resultierende Temperaturerhöhungen abbilden. Eine solche Abbildung kann prinzipiell unter Berücksichtigung von thermischen Symmetrierandbedingungen als Viertelmodell eines Behälters, das in einem Viertelmodell des Gebirges eingebettet ist, realisiert werden. Dadurch können ein horizontal beliebig großes Einlagerungsfeld mit dem Einlagerungsraster aus Behälter- und Streckenabstand simuliert werden. In einem solchen Modell entspricht der Abstand der Strecke zum Modellrand dem halben Streckenabstand. Die dadurch zu erwartenden, thermischen Überlagerungen sind konservativ und können nur bei Einlagerungsfeldern mit sehr langen Einlagerungsstrecken und einer großen Anzahl an Einlagerungsstrecken auftreten. Eine solche Modellbildung hat den Vorteil, dass das ganze Endlager nicht modelliert werden muss, was den zeitlichen und numerischen Aufwand auf ein Minimum reduziert.

Das in den vorangegangenen Abschnitten beschriebene Rückholungskonzept erfordert eine zeitlich versetzte Auffahrung der beiden Teilstrecken. Dieses Auffahrungskonzept führt zu einer asymmetrischen Belastung des umgebenden Gebirges, die mit einem doppelsymmetrischen Viertelmodell nicht berücksichtigt werden kann. Aus diesem Grund kann nur die Symmetriebedingung entlang der Streckenachse zum Vorteil genutzt werden. Das Berechnungsmodell ist somit als Halbmodell aufgebaut. Neben der Beobachtungsstrecke besteht das Berechnungsmodell aus zwei weiteren Einlagerungsstrecken (Nebenstrecken), die einen halben Streckenabstand zum Modellrand haben. Dadurch können thermische Überlagerungseffekte simuliert werden. Die Modellbildung einer einzigen Strecke mit halbem Streckenabstand zu den Modellrändern hätte den entscheidenden Nachteil, dass Randeffekte den Spannungszustand um die Strecke beeinflussen würden. Das fertige Modell ist in Abbildung 5-3 dargestellt.

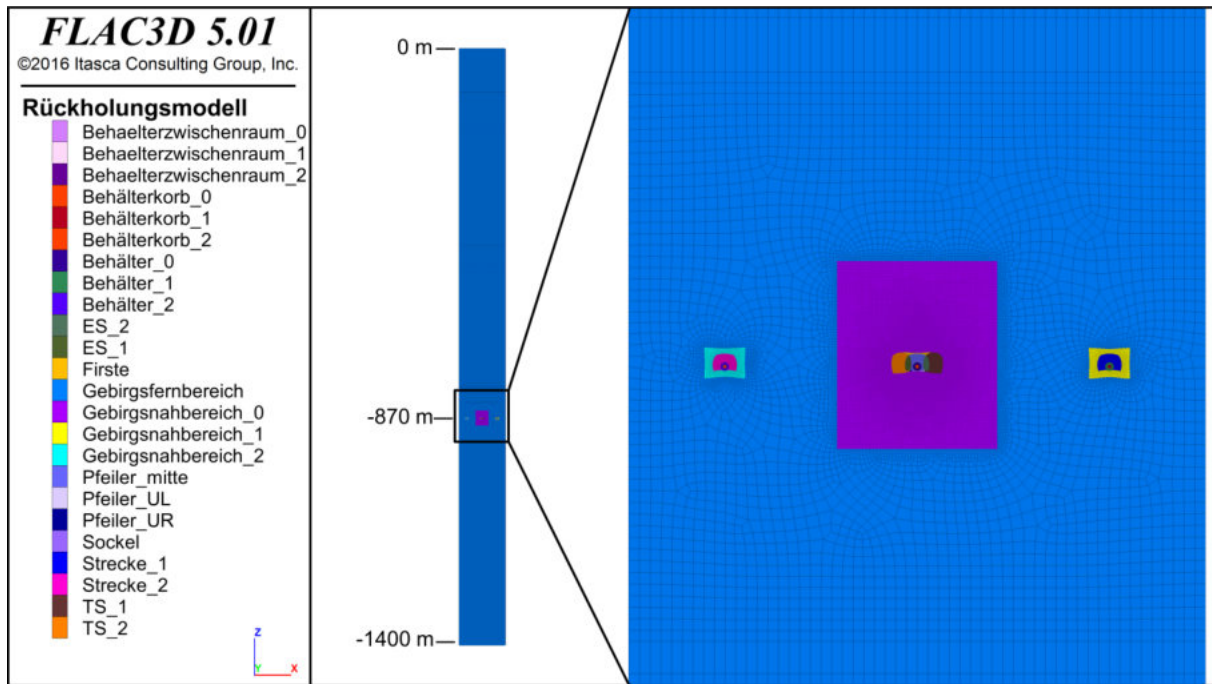


Abbildung 5-3: Berechnungsmodell

Das Berechnungsmodell erstreckt sich über 108 m in der Breite, 1400 m in der Teufe und 4,05 m in der Tiefe. Die Einlagerungssohle entspricht einer Teufe von 870 m Sohle (GRS, 2012).

Das Modell ist so aufgebaut, dass die Einlagerungsstrecke und die Rückholungstrecke sich in einem Körper überlagern, vgl. Abbildung 5-4. Dadurch können alle Auffahrungs- und Verfüllungsvorgänge durch Aktivierung und Deaktivierung ("birth-death-process") von Geometrie Komponenten simuliert werden.

Die Einlagerungsstrecke hat eine Sohlbreite von 4,5 m und eine Höhe von 3,69 m. Die Teilstrecken werden links und rechts der Behälter so aufgefahren, dass ein Pfeiler mit einer mittleren Breite von 2,3 m um den Behälter übrig bleibt. Sie haben eine Höhe von 3,7 m und eine Breite von 3,0 m.

Der POLLUX[®]-10 Behälter wird diskret in zwei Komponenten modelliert. Die erste Komponente besteht aus den Büchsen mit Brennstäben. Sie werden weiter als Behältermaterial bezeichnet. Die restlichen Bauteile des POLLUX[®]-10 (siehe Abbildung 5-4) werden in eine zweite Komponente vereint, der Moderatorzone. Die Tragzapfen werden vernachlässigt. Der Außendurchmesser des Behälters wird mit 1,56 m modelliert, die Behälterlänge mit 5,52 m. Der Durchmesser und die Länge (D x L) des innen liegenden Abfalls betragen 0,69 m mal 4,4 m. Zur besseren Ablage des Behälters auf der Streckensohle, insbesondere aber zur besseren thermischen Anbindung an das Wirtsgestein, wird der kreisrunde POLLUX[®]-Behälter in eine flache Mulde mit einer Kontaktlänge von 0,8 m abgelegt.

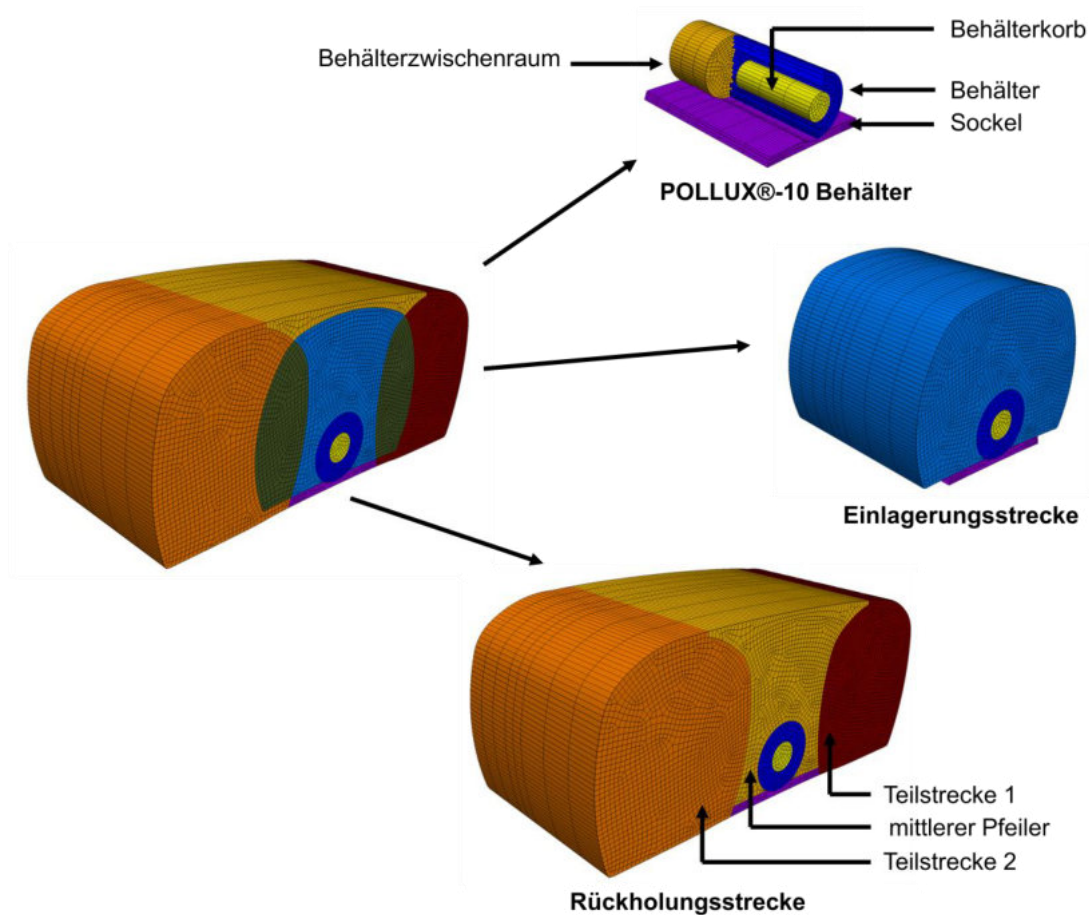


Abbildung 5-4: Modell des Rückholungsquerschnittes im Detail

Alle Strecken befinden sich in einem rechteckigen Gebirgsbereich mit feinerem Netz (vgl. Abbildung 5-3). Diese lokale Vernetzung beschränkt die Elementanzahl im Modell. Die kleinste Elementkante im Modell wird durch die kleinen Abmessungen des Behälters im Vergleich zur Ausdehnung des Gebirges und durch seine diskrete Modellierung in zwei Komponenten bestimmt. Sie beträgt ca. 5 cm. In Streckenlängsrichtung besteht der Brennelementkorb aus drei Elementen, die Moderatorzone aus zwei und der Behälterzwischenraum aus drei weiteren Elementen. Somit ist das Modell in dieser Richtung in acht Scheiben unterteilt. Dieser Diskretisierungsansatz ist für die Modellierung der Wärmeübertragung in Streckenlängsrichtung ausreichend genau, da nur mindestens zwei Elemente erforderlich sind, um eine lineare Temperaturänderung bei Wärmeleitungsprozessen abbilden zu können. Insgesamt besteht das Modell aus knapp 255.000 finiten Elementen.

Es werden die üblichen Randbedingungen verwendet. Unter Ausnutzung der Symmetrieverhältnisse an der Behälterquerschnittsfläche wird nur die halbe Behälterlänge und der halbe Zwischenraum zwischen zwei Behältern modelliert. Eine Spiegelung des Modells an den Stirnseiten erlaubt somit die Darstellung eines Ganzen bzw. eines weiteren Behälters in der Strecke. An den Außenflächen gelten thermisch adiabate Randbedingungen, sowie eine fixierte Normalverschiebung und reibungsfreie Tangentialverschiebung von dem oberen horizontalen Modellrand. Es werden keine zusätzlichen Spannungsrandbedingungen auf dem Modell aufgebracht.

5.2.2 Auffahrungskonzept

Um den Rückholungsvorgang genauer abbilden zu können, ist es erforderlich die Spannungs- und Verformungsgeschichte während des Einlagerungsbetriebs zu erfassen. Aus diesem Grund müssen alle bergbaulichen Tätigkeiten simuliert werden.

Die Simulation beginnt mit der Initialisierung des Primärspannungszustandes. Anschließend wird die Einlagerungsstrecke aufgefahren, vgl. Abbildung 5-5-a. Der Einlagerung des POLLUX®-Behälters, vgl. Abbildung 5-5-b, ist eine vierzigtägige Phase der Spannungsumlagerungen und der freien Gebirgskonvergenz vorgeschaltet. Die Verfüllung der Einlagerungsstrecke mit Salzgrus schließt sich unmittelbar an die Einlagerung an, vgl. Abbildung 5-5-c. Anschließend beginnt die thermische Phase einer 30 Jahre andauernden Einlagerung.

Der Rückholungsvorgang beginnt 30 Jahre nach Einlagerung des Behälters. Dafür wird zunächst eine der Teilstrecke aufgefahren, vgl. Abbildung 5-5-d. Eine Phase der freien Konvergenz wird nachgeschaltet. Diese Phase dauert 60 Tage und entspricht der benötigten Zeit für die Auffahrung der gesamten Teilstrecke. Die Auffahrung der zweiten Teilstrecke erfolgt nach demselben Prinzip, vgl. Abbildung 5-5-e. Die bergmännischen Arbeiten mit der gleichzeitig erfolgenden Konvergenzphase betragen auch hier 60 Tage. Anschließend wird der Pfeiler aufgefahren und der Behälter freigelegt, vgl. Abbildung 5-5-f. Die benötigte Zeit zur Rückholung der Behälter und für die dafür benötigten Arbeiten wird auf 60 Tage festgelegt. Dies entspricht der Rückholung aller 28 Behälter in einer Einlagerungsstrecke.

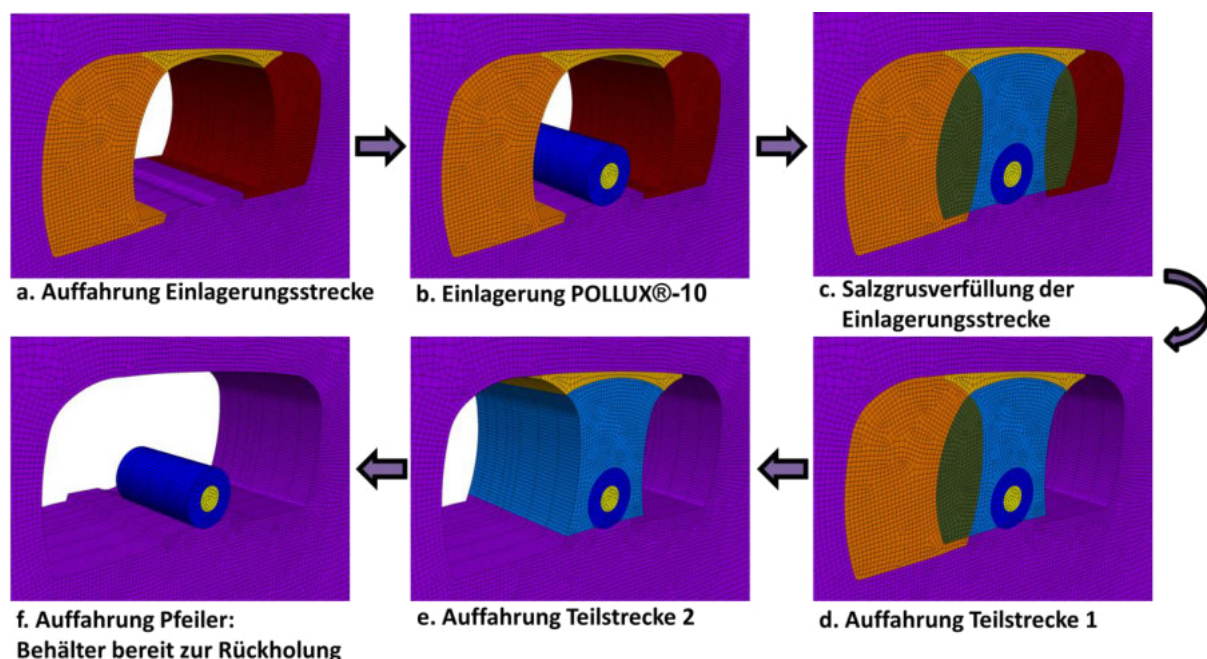


Abbildung 5-5: Simulationsablauf

5.2.3 Berechnungsprogramm

Die Berechnungen wurden mit Hilfe des Programms FLAC3D in der Version 5.1 durchgeführt. Flac3D ist ein Programm zur Berechnung von dreidimensionalen Multiphysics-Modellen auf der Basis der Finite-Differenzen-Methode. Aktuell ist es in der Lage, thermisch (T), mechanisch (M) und hydraulisch (H) gekoppelte Systeme zu modellieren. Innerhalb der Elemente wird ein linearer Ansatz vergleichbar mit der Finite-Elemente-Methode verwendet. Die Lösung des Gleichungssystems erfolgt auf der Basis eines expliziten Zeitschrittverfahrens.

5.3 Materialverhalten

5.3.1 Mechanisches Materialverhalten

Für die vorliegende Analyse werden alle Materialgruppen als schädigungsfrei, homogen und isotrop angenommen.

Das komplexe Verformungsverhalten von Steinsalz ergibt sich aus der additive Zerlegung des Verzerrungstensor in einen elastischen, einen viskosen und einen plastischen Verzerrungsanteil und wird von den Einflussgrößen Spannung, Zeit, Temperatur und Feuchtigkeit geprägt. Üblicherweise werden der viskose und plastische Anteil in einer viskoplastischen Komponente zusammengefasst.

Zur Beschreibung des viskoplastischen Verhaltens von Steinsalz wird das BGR_{EB1}-Stoffmodell der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe verwendet (GRS, 2012)]. Dieser Ansatz berücksichtigt allein das stationäre Kriechen von Steinsalz. Die Kriechfähigkeit unterschiedlicher Steinsalze wird durch einen Vorfaktor $V_K = 2^K / 2^5$ berücksichtigt. Die Kriechklasse K ist ein Maß für die Kriechfähigkeit des Gesteins und beträgt für die Hauptsalze z2HS1 bis z2HS3 $K = 6$. Die Formulierung des BGR_{EB1}-Stoffmodelles ist in Tabelle 5-1 zu finden. In der Tabelle sind auch die Dichte und die elastischen Materialparameter für Steinsalz angegeben.

Mit dem verwendeten Stoffmodell können Rissbildungen durch Zug- und Scherversagen nicht simuliert werden. Für diesen Zweck wurde spannungsbasierten Kriterien entwickelt, die ausgehend von dem Spannungszustand den Risszustand im Modell bestimmen. Es handelt sich um das Dilatanzkriterium und das Kurzzeitfestigkeitskriterium. Während das Dilatanzkriterium bei der Langzeitsicherheit eine Rolle spielt wird zur Bewertung der Arbeitssicherheit das Kurzzeitfestigkeitskriterium herangezogen. Dieses findet deshalb in dieser Analyse Verwendung, um den Risszustand infolge Scherbeanspruchung im Gebirge während der Rückholung zu bestimmen. Es ist wie folgt formuliert:

$$\text{zul.} \frac{\tau}{\sigma_*} \leq b \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_*} \right)^p \cdot \frac{2k}{(1+k) + (1-k) \cdot J_m} \quad [2-15]$$

$$b = 2,7$$

$$p = 0,65$$

$$k = 0,74$$

$$J_m = \frac{m \cdot (9 - m^2)}{(3 + m^2)^{3/2}}$$

$$m = 1$$

$$\tau = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

$$\sigma = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

$$\sigma_* = 1$$

$$\tau, \sigma \text{ und } \sigma_* \text{ in [MPa]}$$

Salzgrus wird hier als kompaktionsfähiges, elastisch- viskoplastisches Material modelliert. Das Materialverhalten von Salzgrus beschreibt einen kontinuierlichen Übergang zwischen einem anfänglich sehr weichen Material hin zu einem steifen Materialverhalten vergleichbar mit Steinsalz nach vollständiger Kompaktion. Aus diesem Grund variieren die Dichte und das E-Modul von Salzgrus nichtlinear von jeweils 1.430 kg/m³ und 1 GPa am Anfang der Kompaktion zu 2.200 kg/m³ und 25 GPa am Ende, siehe Tabelle 5-1. Die numerische Implementierung dieses Materialverhaltens erfolgt in FLAC3D mithilfe des Stoffmodells CWIPP. Die Kompaktion hängt bei diesem Modell allein vom hydrostatischen Spannungszustand ab. Für diese Analyse wird ein modifizierter Ansatz dieses Stoffmodells aus (GRS, 2013) verwendet, siehe Tabelle 5-1.

Da die maschinenbauliche Auslegung des Behälters nicht Gegenstand dieser Arbeit ist, wird der Behälter linear elastisch simuliert und die diskreten Komponenten des Behälters werden als ein Material modelliert. Die Dichte des Behälters beträgt 7.000 kg/m³ und die elastischen Parameter sind $E_{Ca} = 150 \text{ GPa}$ und $\nu_{Ca} = 0,25$.

Tabelle 5-1: mechanische Materialparameter und Stoffmodelle

Material	Dichte	Elastisches Verhalten	Viskoplastisches Verhalten
Steinsalz	2200	$E_{RS} = 25 \text{ GPa}$ $\nu_{CS} = 0,27$	$\hat{\varepsilon}_{RS}^{vpl} = V_K A_0 \left(A_1 e^{-\frac{Q_1}{RT}} + A_2 e^{-\frac{Q_2}{RT}} \right) \left(\frac{\hat{\sigma}}{\bar{\sigma}} \right)^n$ Mit: V_K : Kriechklassenanpassung A_0 : Multiplikator $A_0 = 5,872$ A_1, A_2 : Strukturfaktoren $A_1 = 2,3 \cdot 10^{-4} \frac{1}{d}$ $A_2 = 2,1 \cdot 10^6 \frac{1}{d}$ Q_1, Q_2 : Aktivierungsenergien $Q_1 = 42 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ $Q_2 = 113,4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ R : Universelle Gaskonstante $R = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ T : absolute Temperatur n : Spannungsexponent $n = 5$ $\hat{\sigma}$: Von Mises-Vergleichsspannung $\bar{\sigma}$: Bezugsspannung $\bar{\sigma} = 1 \text{ MPa}$
Salzgrus, trocken	1430- 2200	$E_{CS} = E_{CS,f} \cdot e^{-c_E \frac{\eta}{1-\eta_0}}$ Mit: $E_{CS,f}$: E-Modul bei vollständiger Kompaktion $E_{CS,f} = E_{RS}$ c_E : Materialparameter $c_E = \frac{\eta_0 - 1}{\eta} \cdot \ln \left(\frac{E_{CS,0}}{E_{CS,f}} \right)$ $E_{CS,0}$: Anfangs-E-Modul $E_{CS,0} = 1 \text{ GPa}$ η : aktuelle Porosität η_0 : Anfangsporosität $\eta_0 = 0,28$ $\nu_{CS} = 0,27$	$\varepsilon_{0,CS}^{vpl} = A_0 e^{-\frac{Q}{RT}} \frac{e^{B_2 \rho}}{\rho} \left(1 - e^{-(B_3 + B_4 \sigma_0) \sigma_0} \right)$ Mit: A_0 : Strukturfaktor $A_0 = 1,909 \cdot 10^{13} \text{ 1/d}$ $B_{2..4}$: Materialparameter $B_2 = -19,5 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{kg}$ $B_3 = 0,833 \text{ 1/MPa}$ $B_4 = 18,2 \cdot 10^{-3} \text{ 1/MPa}^2$ $\varepsilon_{CS}^{vpl} = (1 - \eta) A_0 e^{-\frac{Q}{RT}} \left(\frac{\hat{\sigma}}{\bar{\sigma}} \right)^n$
POLLUX®	7000	$E_{Ca} = 150 \text{ GPa}$ $\nu_{Ca} = 0,25$	–

5.3.2 Thermisches Materialverhalten

Die Wärmeübertragung im Modell wird allein durch die Wärmeleitung simuliert. Die Konvektion und die Wärmestrahlung wurden schon bei der Bestimmung der Materialparameter berücksichtigt (GRS, 2013). Es wird von einem isotropen Materialverhalten aller Materialgruppen im Modell ausgegangen.

Die Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz hängt von der Temperatur ab. Bei höher werdenden Temperaturen verschlechtert sich die Wärmeleitfähigkeit. Sie beträgt $2,6 \text{ W}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ bei Raumtemperatur und nur noch $1,95 \text{ W}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ bei 200 Grad. Die Funktion zur Beschreibung der Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz ist in Tabelle 5-2 zu finden. Die spezifische Wärmekapazität von Steinsalz beträgt $864 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.

Salzgrus zeigt ein ausgeprägt nicht lineares Verhalten hinsichtlich seiner thermischen Eigenschaften. Die Wärmeleitfähigkeit von Salzgrus hängt nicht nur von der Temperatur ab wie bei Steinsalz, sondern ist auch von seiner momentanen Porosität abhängig. Der aus zahlreichen Versuchen ermittelte Ansatz zur Erfassung der Wärmeleitfähigkeit von Salzgrus ist in Tabelle 5-2 zu finden. Die spezifische Wärmekapazität von Salzgrus ist von der Porosität abhängig. Die mathematische Beschreibung dieses thermischen Parameters ist in Tabelle 5-2 angegeben.

Für den Behälter werden entsprechend seiner diskreten Modellierung unterschiedliche thermische Materialparameter für die Moderatorzone und für das Behältermaterial eingesetzt. Diese können der Tabelle 5-2 entnommen werden.

Tabelle 5-2: thermische Materialparameter

Material	Wärmeleitfähigkeit [W/(kg.K)]	Massespez. Wärmekapazität [J/(kg*K)]
Steinsalz	$\lambda_{RS} = \frac{\lambda_{0,RS}}{1 + c_{T,RS} \cdot \vartheta}$ Mit: $c_{T,RS}$: Temperaturparameter $c_{T,RS} = 0,0045 \frac{1}{K}$ $\lambda_{0,RS}$: Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{0,RS} = 6,1 \frac{W}{kg \cdot K}$ ϑ: Temperatur [°C]	$c_{p,RS} = 864 \frac{J}{kg \cdot K}$
Salzgrus, trocken	$\lambda_{CS} = \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right)^m \cdot \lambda_{RS} + \frac{\eta}{\eta_0} \cdot \lambda_G$ Mit: m: Funktionsparameter $m = 1,14$ η: aktuelle Porosität η_0: Anfangsporosität	$c_{p,RS} = c_{p,RS}(1 - \eta)$

Material	Wärmeleitfähigkeit [W/(kg.K)]	Massespez. Wärmekapazität [J/(kg*K)]
	$\eta_0 = 0,28$ λ_G : Anfangswärmeleitfähigkeit $\lambda_G = \lambda_{0,CS} + c_{T,CS} \cdot \vartheta$ $\lambda_{0,CS} = 0,42 \frac{W}{kg \cdot K}$ $c_{T,CS} = 0,0027 \frac{W}{kg \cdot K^2}$	
Behältermaterial	$\lambda_{Ca} = 5,9 \frac{W}{kg \cdot K}$	$c_{p,Ca} = 515 \frac{J}{kg \cdot K}$
Moderatorzone	$\lambda_{MZ} = 13 \frac{W}{kg \cdot K}$	$c_{p,Ca} = 320 \frac{J}{kg \cdot K}$

5.3.3 Thermomechanische Kopplung

In einer thermomechanisch gekoppelten Berechnung wirkt die Temperaturänderung der thermischen Seite über die thermische Expansion auf die Spannungsänderung der mechanischen Seite. Der Koppelparameter zwischen den beiden Seiten ist der thermische Ausdehnungskoeffizient, der hier als isotrop angenommen wird. Der für diese Analyse verwendete, thermische Ausdehnungskoeffizient für Steinsalz und Salzgruß ist $\alpha_T = 4 \cdot 10^{-5}$. Die thermische Expansion des Behälters wird hier nicht berücksichtigt, da die mechanische Auslegung des Behälters nicht Gegenstand dieser Analyse ist.

5.4 Ergebnisse und Bewertung

5.4.1 Simulation des Einlagerungsvorgangs

Der Behälter wird für eine Dauer von 30 Jahren eingelagert. Während dieser Zeit heizt sich das Gebirge auf, was zu Spannungsumlagerungen und Verformungsprozesse führt. Das Verhalten des Gebirges während der Einlagerungsdauer wird im Folgenden analysiert.

Wärmeausbreitung im Gebirge

Abbildung 5-6 zeigt die Ausbreitung der Wärme im Gebirge in verschiedenen Zeitpunkten während der Einlagerungsdauer. Die Temperatur im Gebirge beträgt vor der Einlagerung 40°C, vgl. Abbildung 5-6-a. Ein Jahr nach Einlagerung des Behälters und Verfüllung der Strecke konzentriert sich die Wärme im umgebenden Bereich des Behälters. Die Temperatur im Behälter erreicht schon ca. 450 °K (ca. 180°C). Eine genaue Betrachtung der Abbildung 5-6-b zeigt auch, dass die Wärme durch die Sohle schneller als durch die Firste abfließt. Dies ist ein Indiz für die dämmende Wirkung des Salzgruses. Die Wärme kann wegen des direkten Kontakts mit dem Gebirge auf der Sohle schneller abfließen. 5 Jahre nach Einlagerung ist die Überlagerung der Wärme aus benachbarten Behältern festzustellen. Die Isothermen, die in Abbildung 5-6-b noch kreisförmig waren, haben jetzt eine elliptische Form, vgl. Abbildung 5-6-c. Dieser Effekt intensiviert sich in den weiteren Jahren, so dass 30 Jahre

nach Einlagerung, alle Isothermen horizontal sind, vgl. Abbildung 5-6-d bis e. Zudem ist das Temperaturfeld im Gebirge im Einlagerungshorizont 30 Jahre nach Einlagerung uniform.

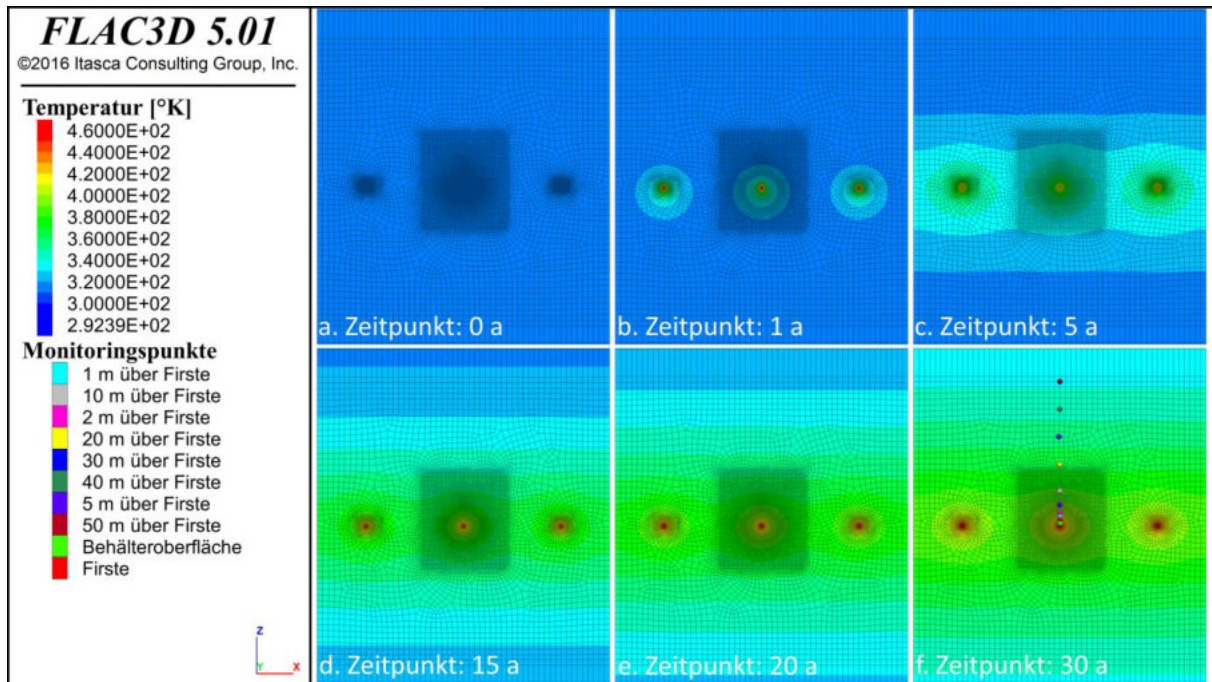


Abbildung 5-6: Wärmeentwicklung im Gebirge

Um eine quantitative Auswertung der Wärmeausbreitung im Gebirge zu erhalten wurde in vertikaler Richtung über den Behältern in bestimmten Abständen die Temperatur beobachtet, vgl. Abbildung 5-6-f. Die Temperaturbeobachtungen wurden über die Einlagerungsdauer (Abbildung 5-7, links) und über den Abstand vom Behälter 30 Jahre nach Einlagerung (Abbildung 5-7, rechts) ausgewertet.

Aus Abbildung 5-7, links ist ersichtlich, dass die maximale Temperatur an der Oberfläche des Behälters 178°C 30 Jahre nach Einlagerung beträgt. Dieses Temperaturmaximum verletzt nicht das Temperaturkriterium für Steinsalz, das bei 200°C liegt. Der Temperaturverlauf an der Behälteroberfläche ist durch zwei Temperaturpeaks charakterisiert. Der erste Peak wird wenige Jahren nach der Einlagerung erreicht und lässt sich erklären durch die Dämmwirkung des Salzgruses. Die Wärmeproduktion aus dem Nachzerfall der Brennstoffe ist höher als die Wärmemenge die das Gebirge und der Salzgrus pro Zeiteinheit abführen können. Dies führt zu einem Wärmestau, der durch den ersten Peak charakterisiert ist. Dieser Peak beträgt hier ca. 170°C. Durch die Kompaktion und damit Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Salzgruses wird der Peak langsam abgebaut. Bei vollständiger Kompaktion hat die Temperatur einen ähnlichen Verlauf wie die Messpunkte tiefer im Steinsalzgebirge. Der zweite Peak kommt durch die Überlagerung der Wärmeproduktion aus benachbarten Strecken zustande. Sie ist somit von dem Strecken- und Behälterabstand abhängig. Bei der gewählten Konfiguration ist der zweite Peak nach 30 Jahren noch nicht erreicht. Die Temperaturverläufe der Messpunkte im Gebirge zeigen alle eine transiente Phase mit starkem Temperaturanstieg, die in eine stationäre Phase mit annähernd konstanter Temperaturanstiegsrate übergeht.

Das ermöglicht die Temperaturen im Gebirge über die Simulationsdauer hinaus zu prognostizieren.

Die Auswertung der Temperatur nach 30 Jahren über den Abstand vom Behälter in vertikaler Richtung in Abbildung 5-7, rechts, zeigt, dass die Salzgrusverfüllung wegen seiner im Vergleich zu Salz schlechtere Wärmeleitfähigkeit die Temperatur um 30°C absenkt. An der Firste beträgt die Temperatur nur noch 145°C. Das heißt, die Rückholung wird in einem Milieu stattfinden, in dem Temperaturen um die 150 °C vorherrschen. Im Gebirge nimmt die Temperatur mit größer werdendem Abstand nichtlinear ab. Sie beträgt 15 m vom Behälter immer noch knapp über 100°C. 50 m über der Firste beträgt die Temperatur ca. 60°C.

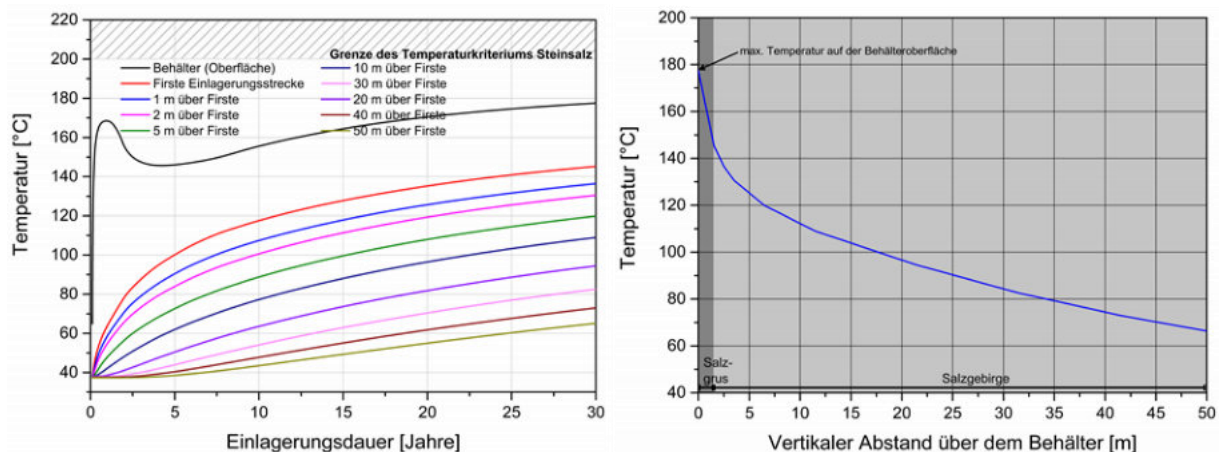


Abbildung 5-7: Temperatur über die Zeit (links), Temperatur über dem Behälterabstand (rechts)

Spannungen und Verformungen

Für die Bewertung des Spannungszustands im Gebirge wird die σ_3 -Komponente des Hauptspannungstensors herangezogen. Es handelt sich um die betragsmäßig kleinste Hauptspannung nach der üblichen Konvention der technischen Mechanik: negatives Vorzeichen für Druck, positives Vorzeichen für Zug.

Die Spannungsentwicklung während der Einlagerungsdauer ist in Abbildung 5-8 dargestellt. Die Auffahrung der Strecke führt zu einer Spannungsentlastung im konturnahen Bereich mit einer eingehenden Reduzierung der kleinsten Hauptspannung, vgl. Abbildung 5-8-a. In der 40-tägigen Dauer der freien Konvergenz findet eine Spannungsumlagerung statt. Die Spannungsentlastung weitet sich aus, vgl. Abbildung 5-8-b. Nach Verfüllung der Strecke mit Salzgrus, konvergiert das Gebirge wegen der Kriechfähigkeit von Steinsalz weiter. Das Kriechen wird von dem Steifigkeitsunterschied zwischen Steinsalz und Salzgrus und von der Wärmeentwicklung beschleunigt. Diese Konvergenzen führen zu einer Druckeinspannung des Versatzmaterials, was wiederum eine Kompaktion des Salzgruses hervorruft, vgl. Abbildung 5-8-c und d. 5 Jahre nach Einlagerung ist die Druckspannung im Versatz schon vergleichbar mit dem Spannungszustand im umgebenden Gebirge, vgl. Abbildung 5-8-e. Am Ende der Simulation ist der Primärspannungszustand wieder hergestellt, vgl. Abbildung 5-8-f.

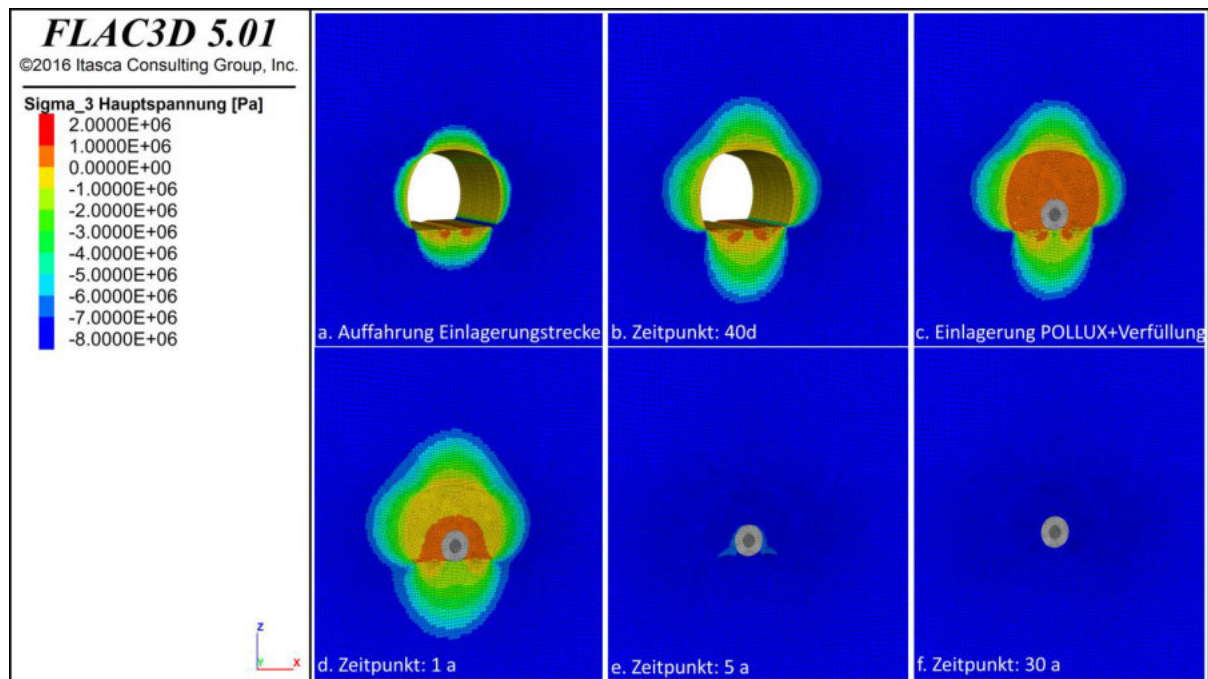


Abbildung 5-8:

Spannungsentwicklung während der Einlagerungsphase

Verformungen

Während der Simulation des Einlagerungsvorgangs wurde die Verschiebung von Punkten auf der Sohle gemessen. Grund für diese Messung war zu überprüfen, ob die auffahrungsbedingte Hebung der Sohle zu einer signifikanten Änderung der Teufenlage des Einlagerungsbehälters führen würde. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Abbildung 5-9 dargestellt. Gemessen wurden unter dem Behälter und auf den Sohlen der zukünftigen Teilstrecken der Rückholungsstrecken. Letztere dienen der Kontrolle. Man stellt fest, dass der Behälter 30 Jahre nach Einlagerung um ca. 80 cm nach oben gewandert ist, während die Kontrollpunkte sich um 50 cm verschoben haben. Diese Verformungen können in der Abbildung betrachtet werden, in der das verformte Modell der Rückholungsstrecke ohne Überhöhungsfaktor im Hintergrund dargelegt ist. Die unterschiedlichen Verformungen dieser drei Messpunkte zeigen, dass die höheren Temperaturen unterhalb des Behälters zu einer stärkeren Sohlhebung an dieser Stelle führen. Eine Veranschaulichung der Ergebnisse dieser Messungen implizieren, dass die neue Teufe des Einlagerungshorizonts 869,20 m anstatt 870 m beträgt. Diese Erkenntnis muss bei der Auffahrung der Rückholungsstrecke Berücksichtigung finden.

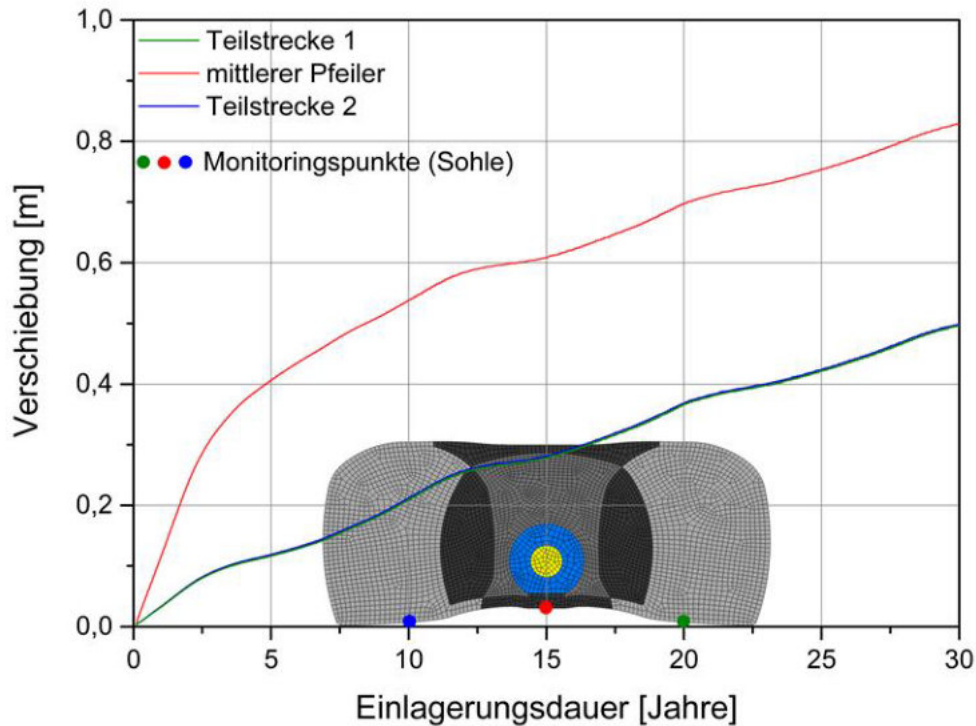


Abbildung 5-9: Verschiebung von Messpunkten auf der Sohle über die Einlagerungsdauer

5.4.2 Simulation des Rückholungsvorgangs

Nach 30 Jahren Einlagerungsdauer beginnt die Rückholung des POLLUX®-Behälters. Der Rückholungsvorgang wurde schon im Abschnitt 5.2.2 beschrieben und skizzenhaft mithilfe der Abbildung 5-5 erläutert. Es ist anzumerken, dass die geplante Dauer der freien Gebirgskonvergenz von jeweils 60 Tagen nach jedem Auffahrungsabschnitt numerisch nicht realisiert werden konnte. Grund dafür sind die starken auftretenden Verformungen, die eine Neuvernetzung des Berechnungsmodells unter Beibehaltung des Spannungszustandes und während der Simulation erfordert hätten. Der Berechnungscode Flac3D ist mit so einem "Remeshing"-Tool nicht ausgestattet. Als Abhilfemaßnahme wurde nach jeder Auffahrung die freie Konvergenzphase begrenzt. Als Begrenzung wurde die maximal mögliche Dauer der freien Konvergenz bis zur numerischen Instabilität gewählt. Numerische Instabilität tritt auf, wenn ein finites Hexaederelement sich so stark verformt, bis die Hexaederform sich in einem Tetraeder oder einer Fläche umwandelt. Somit beträgt die Dauer der freien Konvergenz nach Auffahrung der zweiten Teilstrecke und des Pfeilers jeweils 30 und 50 Tage. Die freie Konvergenzphase nach Auffahrung der ersten Teilstrecke wurde konservativ auf 62 Tage festgelegt.

Spannungen

Die Spannungsentwicklung während des Rückholungsvorgangs ist in Abbildung 5-10 dargestellt. Als Spannungsgröße zur Bewertung wird hier wieder die kleinste Hauptspannung σ_3 herangezogen.

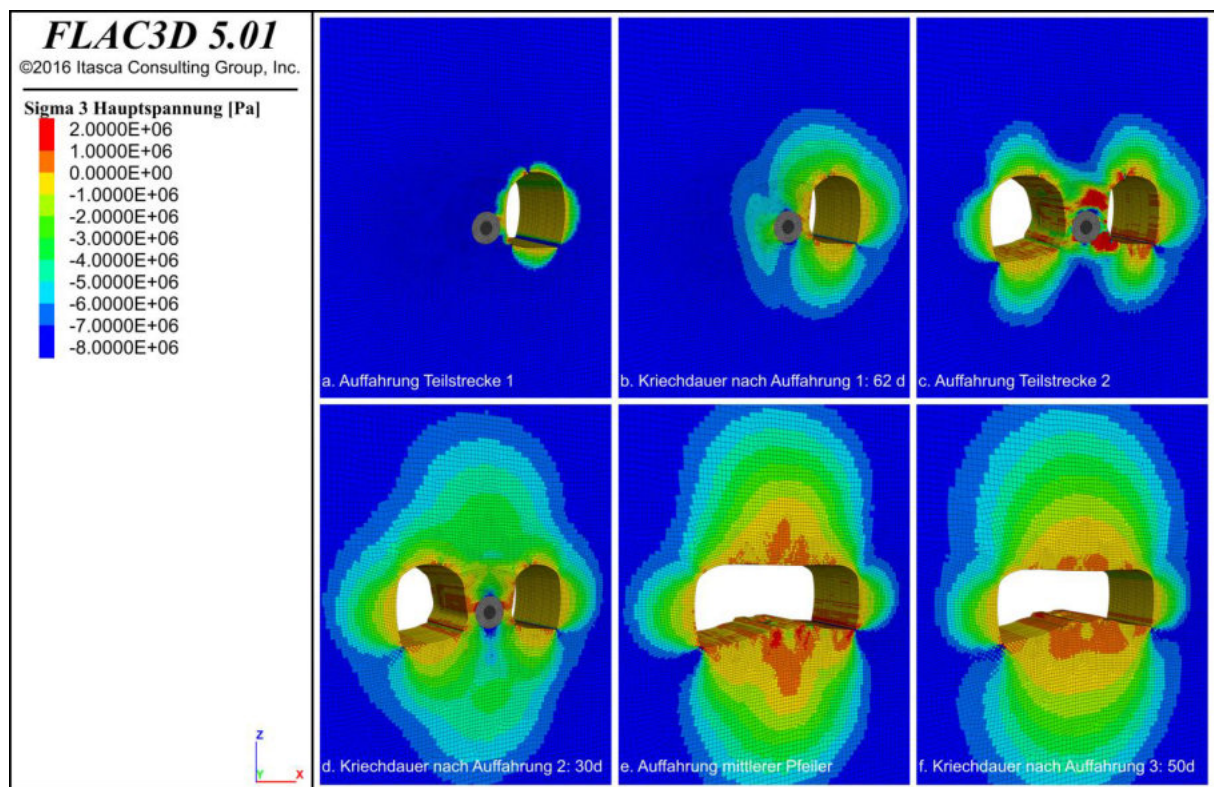


Abbildung 5-10: Spannungsentwicklung im Gebirge während der Rückholung

Nach Auffahrung der ersten Teilstrecke gibt es eine Spannungsentlastung im konturnahen Bereich, vgl. Abbildung 5-10-a. 62 Tage nach der Auffahrung findet eine Spannungsumlagerung im Gebirge statt. Insbesondere der spätere mittlere Pfeiler, der den Behälter umgibt, ist weitgehend einseitig entlastet, vgl. Abbildung 5-10-b.

Nach Auffahrung der zweiten Teilstrecke entlastet sich das Gebirge auf dieser Seite. Die Konturen der ersten Teilstrecke weisen in Teilbereichen der Firste und der Sohle Zugspannungen in der Größenordnung von 1 bis 2 MPa aus. Diesem Wertebereich entspricht auch die Zugfestigkeit von Steinsalz. Deshalb können Brüche infolge von Scherrissen nicht mehr ausgeschlossen werden, vgl. Abbildung 5-10-c. Dies hat Auswirkungen auf die Betriebssicherheit. Zur Sicherung der Strecke ist eine geeignete Kontursicherung einzubringen. Der Spannungszustand im Bereich des mittleren Pfeilers hat sich in den positiven Zugbereich verlagert, vgl. Abbildung 5-10-c. Dieses Ergebnis lässt sich durch die asymmetrischen Beanspruchungen des Pfeilers erklären und ist die Folge der Fortschreitung der Spannungsentlastung an dieser Stelle, die schon während der freien Konvergenz der ersten Teilstrecke (Abbildung 5-10-b) stattfand.

Während der 30-tägigen Phase der freien Konvergenz nach Auffahrung der zweiten Teilstrecke findet eine weitreichende Spannungsumlagerung im Gebirge statt. Bis zu 7 m ober- und unterhalb der Strecke sind Bereiche mit Spannungsentlastung festzustellen. Dabei werden die Spannungsspitzen im Bereich des mittleren Pfeilers durch das Kriechen von Steinsalz abgebaut, vgl. Abbildung 5-10-d.

Nach Auffahrung des Pfeilers findet eine Verlagerung des Spannungszustands im Gebirge in den positiven Zugbereich statt, vgl. Abbildung 5-10-e. Insbesondere weist das Gebirge einen Bereich mit Zugspannungskonzentrationen auf, der bis zu 4 m unterhalb der Sohle reicht. Dieser Zugspannungsbereich resultiert aus den großen Deformationen, die infolge Sohlhebung nach Erweiterung der Strecke stattfindet. Dort sind Zugspannungen bis 1,5 MPa zu erwarten. Da das verwendete Stoffmodell nicht in der Lage ist, die Bruchprozesse im Steinsalz abzubilden, werden die Zugspannungsspitzen während der nachfolgenden 50-tägigen Dauer der freien Konvergenz durch Kriechen abgebaut, vgl. Abbildung 5-10-f.

Abbildung 5-10-e zeigt auch, dass der Firstbereich der Rückholungsstrecke sich in den Zugbereich verlagert hat. Die Tiefe des Zugbereichs beträgt hier ca. 2,5 m.

Verformungen

Zur Bewertung des Verformungszustands im Gebirge wurden an der Kontur der Rückholungstrecke Messpunkte erstellt, in denen die Verschiebungen in vertikaler Richtung gemessen wurden. Die Messpunkte befinden sich jeweils auf den Firsten und auf den Sohlen der zwei Teilstrecken und des mittleren Pfeilers. Das Ergebnis dieser Auswertung ist in Abbildung 5-11 und Abbildung 5-12 dargestellt.

Abbildung 5-11 zeigt die Verschiebungen der Messpunkte über die Rückholdauer. Die Positionen der Messpunkte sind in der Abbildung angegeben. Aus der Abbildung geht hervor, dass die Verschiebungsverläufe ein quasi lineares Verhalten zeigen. Zudem steigen die Verschiebungsraten nach jedem Auffahrungsschritt an. Dieser Anstieg deutet auf einen Steifigkeits- und Tragfähigkeitsverlust im Gebirge. Die Verschiebungen sind am größten auf der Kontur der ersten Teilstrecke. Die maximalen Verschiebungswerte betragen 55 cm an der Firste bzw. 45 cm an der Sohle dieser Strecke am Ende der Simulation. Im Allgemeinen liegen die Verformungen der Sohle und der Firste auf einem vergleichbaren Niveau.

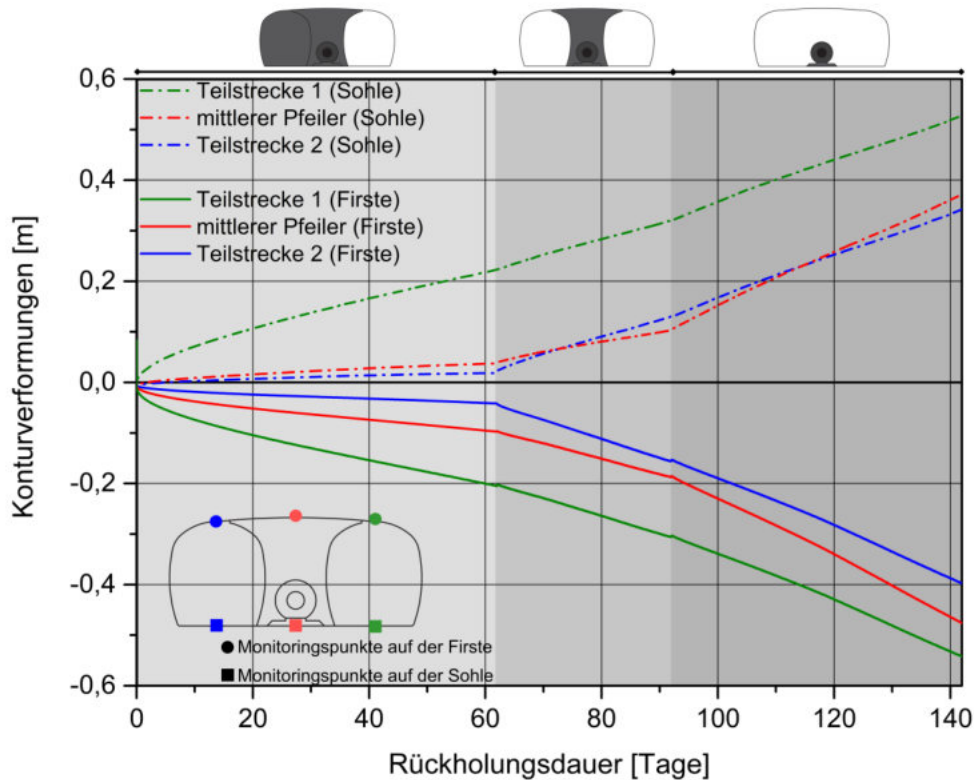


Abbildung 5-11: Konturverformungen über die Rückholdungsdauer

Abbildung 5-12 zeigt die aus Abbildung 5-11 errechneten Konvergenzen für die Teilstrecken und den mittleren Pfeiler. Die Positionen der Konvergenzmesstrecken sind auch dort abgebildet. Da die Verschiebungsverläufe linear sind, wurden die Konvergenzraten errechnet. Die Abbildung zeigt, dass die maximalen Konvergenzen am Ende der Simulation einen Meter in der ersten Teilstrecke überschreiten. Sie betragen jeweils ca. 70 cm und über 85 cm in der zweiten Teilstrecke und im Bereich des mittleren Pfeilers. Bei einer Streckenhöhe von 3,7 m des Rückholungsquerschnitts entsprechen die errechneten Konvergenzen eine Verringerung der Lichthöhe des Rückholungsquerschnitts von 29%. Die Streckenkonturen müssen deshalb nachgeschnitten werden.

Die errechneten Konvergenzraten sind auch in der Abbildung angegeben. Die Raten steigen von 5,2 mm pro Tag bzw. 0,7 mm pro Tag nach Auffahrung der ersten bzw. der zweiten Teilstrecke auf ca. 9 mm pro Tag. Die maximale Konvergenzrate wird nach Auffahrung des mittleren Pfeilers erreicht. Sie beträgt 11 mm pro Tag. Die Konvergenzraten erlauben auch, die Bestimmung des Verformungsverhaltens des Gebirges über die Simulationsdauer hinaus abzuschätzen. Die Bestimmung der Gesamtverformungen im Modell über die ursprünglich angedachten 180 Tage, die für die Rückholung nötig ist, ist deshalb jetzt möglich. Die Konvergenzen nach 180 Tagen betragen jeweils 1,2 m, 1 m und 1 m im Bereich der Teilstrecke 1, der Teilstrecke 2 und des mittleren Pfeilers. Ohne Nachschnitt würde die lichte Höhe in der Rückholungsstrecke somit auf 1,8 m reduziert.

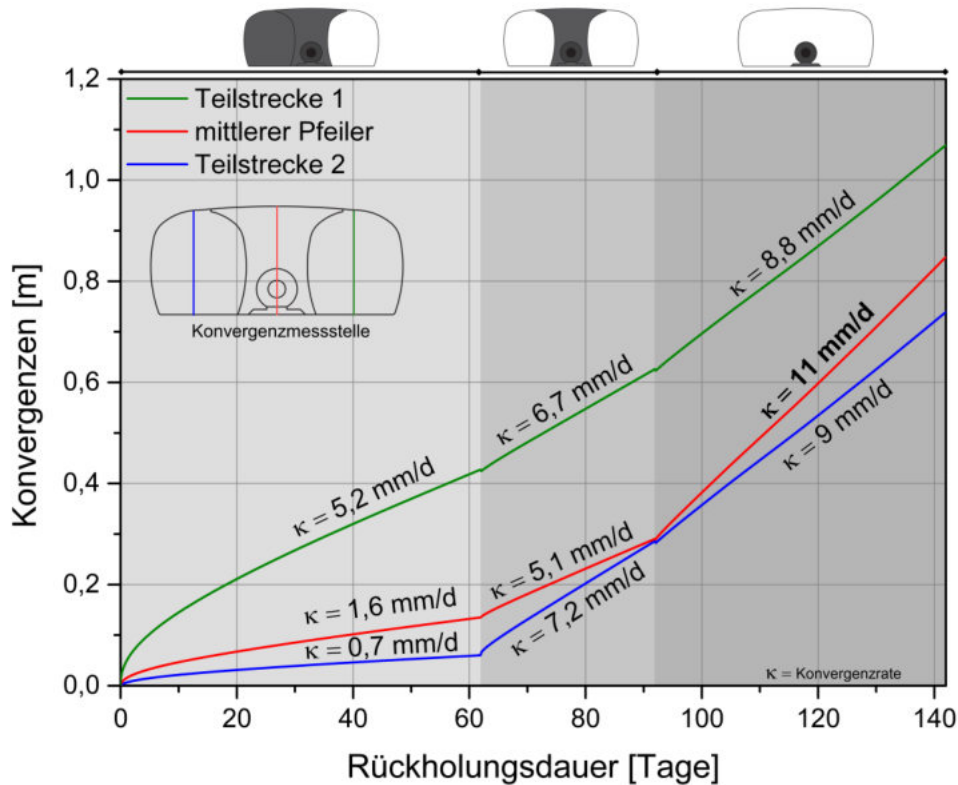


Abbildung 5-12: Konvergenzen und Konvergenzraten während der Rückholung

Bruch infolge Scherbeanspruchung

Zur Bewertung des Risszustandes im Modell wurde das Kurzzeitfestigkeitskriterium ausgehend von dem Spannungszustand ausgewertet. Die Berechnung des Spannungszustands wurde vereinfacht durchgeführt, indem eine freie Konvergenzphase von 6 Stunden nach Auffahrung jedes Teilquerschnitts berücksichtigt wurde. Diese Zeitspanne entspricht in etwa der geplanten Auffahrungsdauer je Teilquerschnitt. Dadurch kann der sofortigen Entlastung des Gebirges, das durch das kontinuierliche Fräsen des Querschnittes mit einer Teilschnittmaschine stattfindet, Rechnung getragen werden. Die Auffahrung der Teilquerschnitte erfolgt instantan. Eine Vergleichsberechnung mit einer schichtweisen Auffahrung führte zu ähnlichem Ergebnis. Dies wird hier nicht dargestellt.

Der Ausnutzungsgrad des Kurzzeitfestigkeitskriteriums wird in einer Skala von 0 auf 1 bewertet. Gebirgsbereiche mit Werten über 1 weisen auf eine Überschreitung des Kriteriums hin. Sie werden deshalb als nicht tragfähig angesehen. Da dieses Kriterium nur für Steinsalz gilt, werden die Zonen mit Salzgrus nicht ausgewertet. Das Ergebnis dieser Auswertung ist in Abbildung 5-13 zu finden.

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 an, dass der Rückholquerschnitt standsicher ist. Aufgrund einer Tragreser-

ve von 20% und der Abbau von Spannungsspitzen infolge des Kriechens ist keine Verankerung der Strecke vorzusehen.

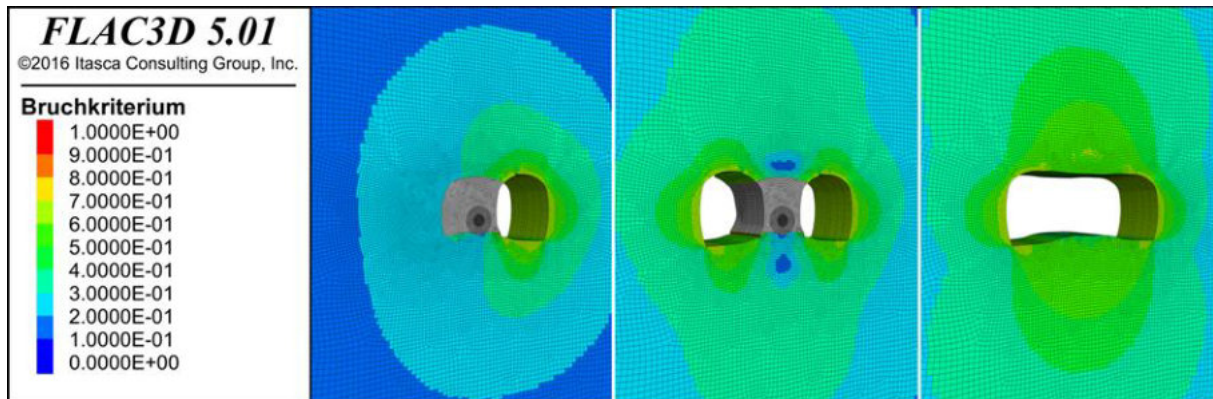


Abbildung 5-13: Auswertung der Kurzzeitfestigkeitskriteriums im Modell

5.5 Erkenntnisse aus der thermomechanischen Simulation

Die Simulation des Einlagerungsprozesses 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 Temperaturen von ca. 150 bis 120°C. Aufgrund der thermischen Expansion ist am Behälter eine vertikale Verschiebung von bis zu 0,8 m zu erwarten. Diese Verschiebung muss durch die Erkundung validiert und bei der Errichtung der Teilstrecken berücksichtigt werden.

Die thermo-mechanischen Modelle zeigen zum einen, dass während der Auffahrung der Teilstrecken mit einer Schädigung des konturnahen Bereichs zu rechnen ist. Das Bruchkriterium ist an allen Firstbereichen der Teilstrecken und des Pfeilers überschritten. Eine Gebirgssicherung zur Gewährleistung der Betriebssicherheit wird damit unerlässlich. Die Durchführung dieser Sicherungsmaßnahmen reduziert die Vortriebsleistung.

Zum anderen 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 mehr als 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.

5.6 Optimierung der Endlagerkonfiguration

Die zu erwartenden hohen Konvergenzen und die daraus resultierende drastische Minderung der Vortriebsleistung erfordert eine Anpassung der Endlagerkonfiguration, um die technische Machbarkeit einer Rückholung von POLLUX®-Behältern aus den Einlagerungsstrecken zu gewährleisten. Dafür wurden eine thermische und mechanische Optimierung der Parameter der Endlagerauslegung durchgeführt, die im Folgenden vorgestellt werden.

5.6.1 Thermische Optimierung des Endlagers

Eine der größten Herausforderungen bei der Rückholung Endlagerbehältern in Strecken ist die hohe Temperatur, in der gearbeitet werden muss. Eine Rückholung lässt sich nur im Einklang mit der Klimabergverordnung – KlimaBergV bringen, wenn die Temperatur im Endlager auf ein vertretbares Niveau gesenkt wird. Um dies zu realisieren, wurde eine Sensitivitätsstudie mit 100 Berechnungen durchgeführt. In jeder Berechnung wurden der Streckenabstand und die Beladung variiert. Der Behälterabstand wurde auf den in der VSG errechneten Wert von 2,63 m festgelegt. Die maximale Temperatur im Endlager am Aufpunkt des Behälters als auch die Temperatur an der Kontur der ersten Teilstrecke wurden ausgewertet. Die Letztere ist für die Wettersimulation in der Strecke und die Ermittlung der Temperatur während der Rückholung nötig, vgl. Abbildung 5-14.

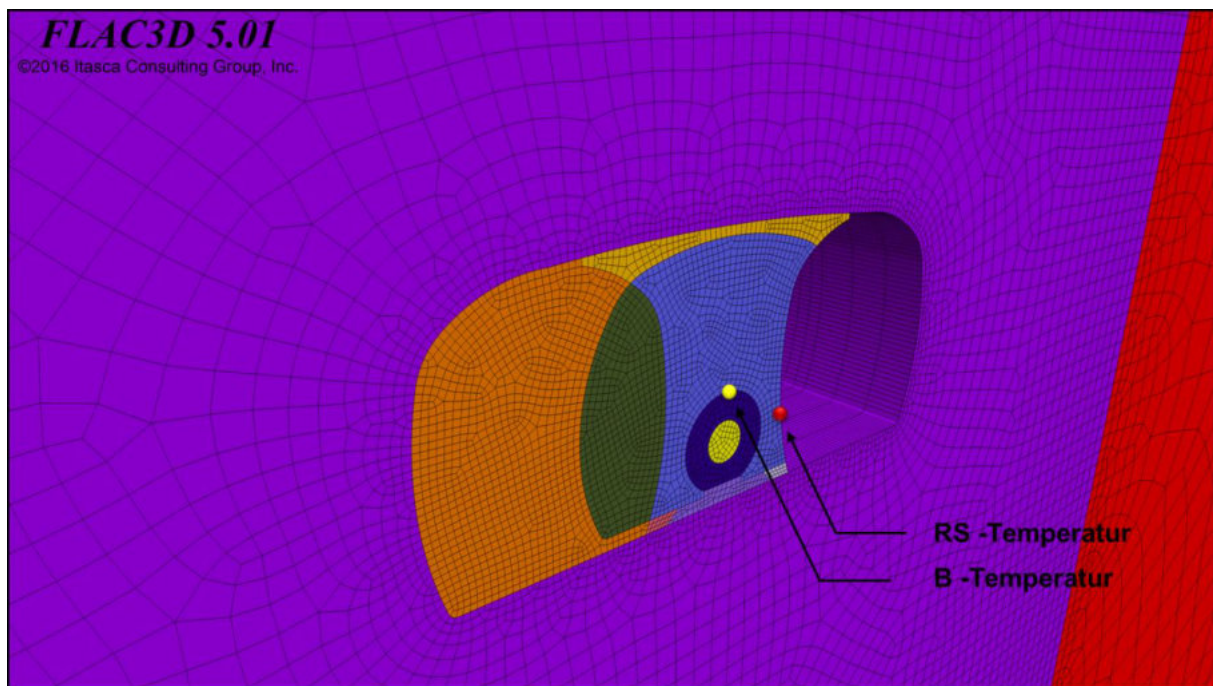


Abbildung 5-14: Thermische Auswertungspunkte in der Rückholungsstrecke

Das Berechnungsmodell, als Abbildung des Endlagers, muss thermische Überlagerungen und daraus resultierende Temperaturerhöhungen abbilden. Eine solche Abbildung kann unter Berücksichtigung von thermischen und mechanischen Symmetrierandbedingungen als Viertelmodell eines Behälters, das in einem Teilmodell des Gebirges eingebettet ist, realisiert werden. Dadurch kann ein horizontal beliebig großes Einlagerungsfeld mit dem Einlage-

rungsraaster aus Behälter- und Streckenabstand simuliert werden. In einem solchen Modell entspricht der Abstand der Streckenachse zum Modellrand in Streckenquerrichtung dem halben Streckenabstand und der Abstand der Behälterstirnfläche zum Modellrand in Streckenrichtung dem halben Behälterabstand. Die dadurch zu erwartenden, thermischen Überlagerungen sind konservativ und können nur bei Einlagerungsfeldern mit sehr langen Einlagerungsstrecken und einer großen Anzahl an Einlagerungsstrecken auftreten. So eine Modellbildung hat den Vorteil, dass das ganze Endlager nicht modelliert werden muss, was den zeitlichen und numerischen Aufwand auf ein Minimum reduziert. Die geometrische Situation im Nahfeld ist in Abbildung 5-15 dargestellt. Der Einlagerungsbehälter ist in einer mit Salzgrus verfüllten Strecke zu erkennen. Der POLLUX®-Behälter wird diskret in zwei Komponenten modelliert. Die erste Komponente besteht aus den Büchsen mit Brennstäben oder aus den Kokillen aus der Wiederaufarbeitung. Die restlichen Bauteile des POLLUX®-Behälters werden in einer zweite Komponente vereint, dem eigentlichen Behälter. Die Auswertepunkte sind im Berechnungsmodell dargestellt.

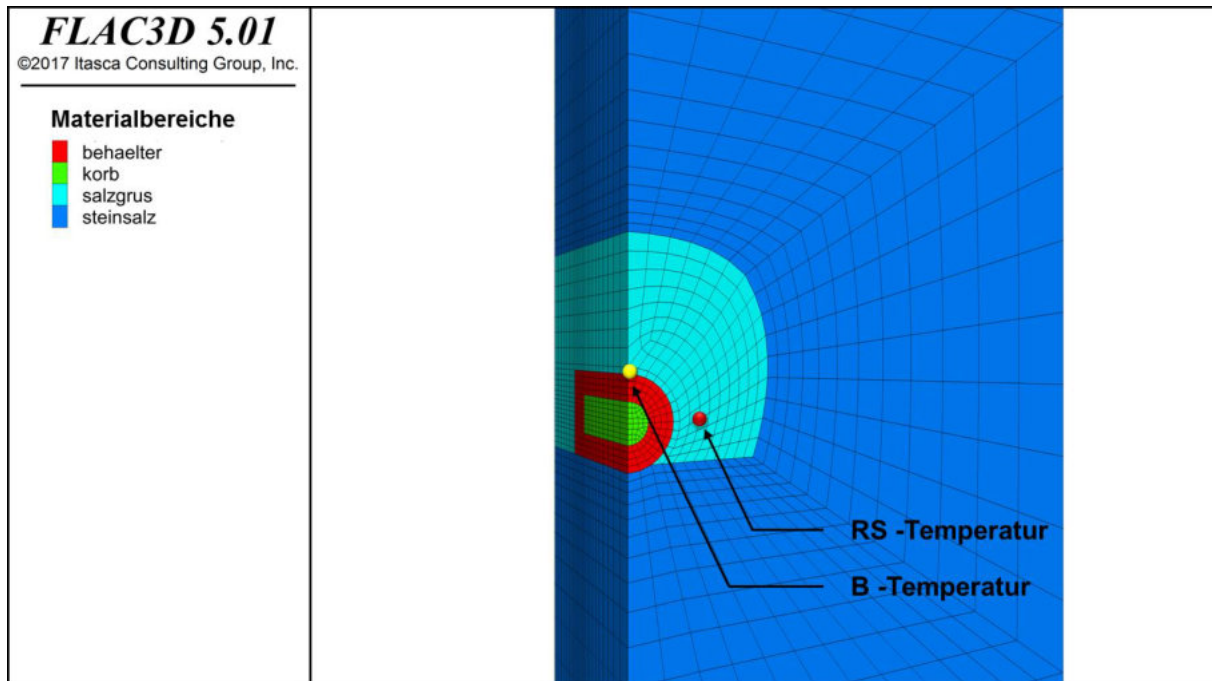


Abbildung 5-15: Berechnungsmodell für die thermische Optimierung

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind in Abbildung 5-16 und Abbildung 5-17 dargestellt. Die Abbildungen zeigen die maximal erreichte Temperatur während der Berechnungsdauer von 30 Jahren an den Auswertepunkten in Abhängigkeit der Eingangsparameter (Beladung und Streckenabstand). Die Temperaturergebnisse sind als dunkle Punkte in den Diagrammen eingetragen, vgl. Abbildung 5-16, links, Abbildung 5-17, links. Die Interpolation zwischen den Temperaturpunkten ergibt eine dreidimensionale Antwortfläche. Aus dieser Fläche können Temperatur-Isolinien abgeleitet werden, die für die Neubemessung des Endlagers je nach Zieltemperatur verwendet werden können, vgl. Abbildung 5-16, rechts, Abbildung 5-17, rechts.

Die maximale Temperatur am Aufpunkt des Behälters wird bei höheren Streckenabständen durch die Beladung des Behälters mit radioaktivem Material bestimmt. Ab ca. 40 m Streckenabstand steigt die Temperatur am Auslegungspunkt 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. Die Antwortfläche ist im gesamten Wertebereich (ausgenommen ab 65 m Streckenabstand) nichtlinear. Ein Temperatur-Plateau bildet sich bei Streckenabständen ab 65 m aus.

Die vorliegenden Ergebnisse werden dazu genutzt, das Endlager neu auszulegen. Sie dienen als Grundlage für die Wettersimulation in der Rückholstrecke.

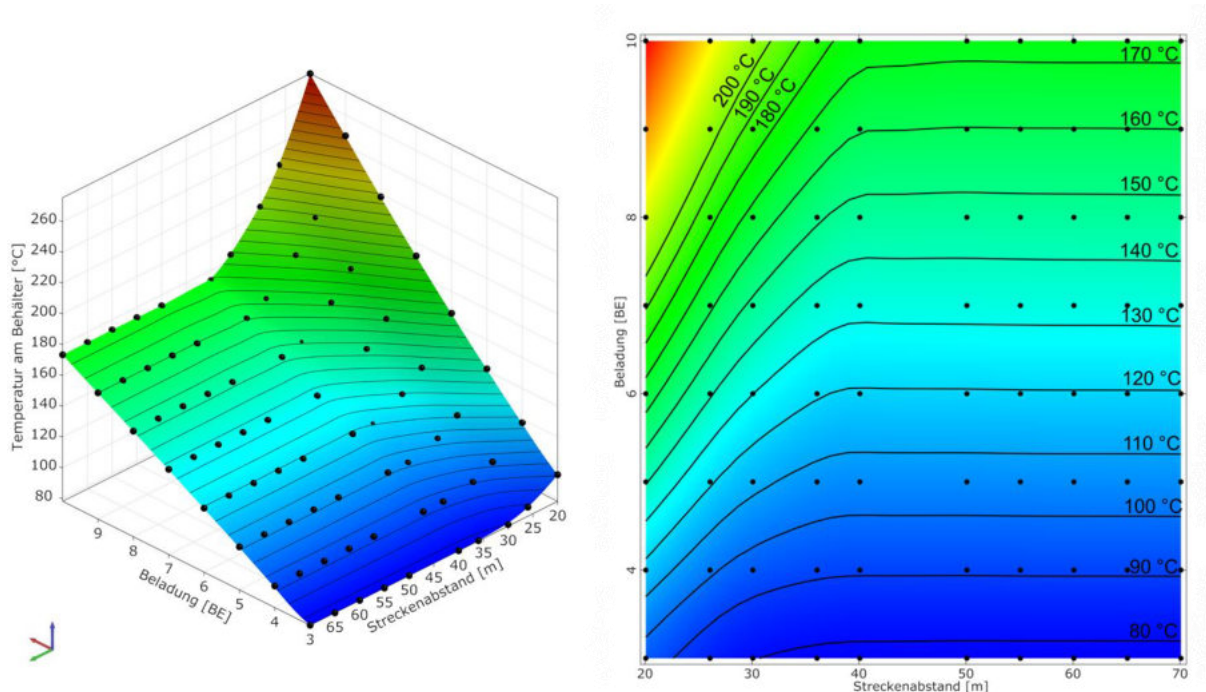


Abbildung 5-16: Temperatur-Antwortfläche am Aufpunkt des Behälters

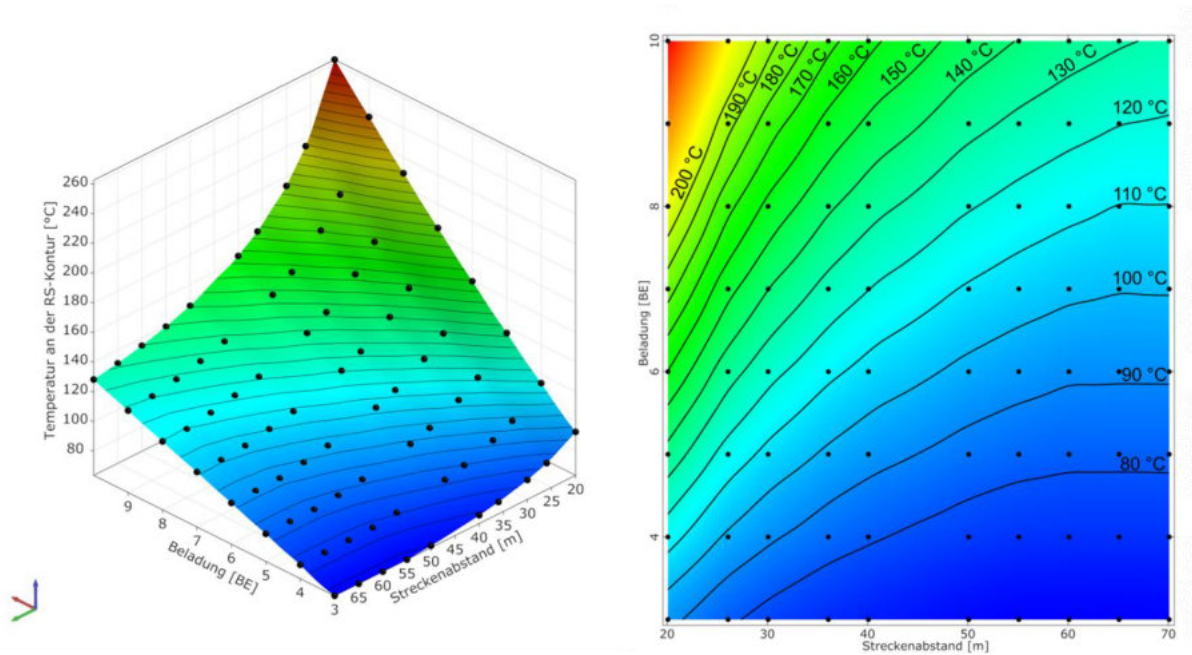


Abbildung 5-17: Temperatur-Antwortfläche an der Kontur der Rückholstrecke

5.6.2 Mechanische Optimierung des Rückholvorgangs

Basierend auf den Ergebnissen der thermischen Optimierung und der Wettersimulation wurden verschiedenen Endlagerkonfigurationen für weitere mechanische Analysen ausgewählt. Endlager mit Streckenabständen von 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. Die Letztere 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 Rückholstrecke. Die Berechnungen erfolgen analog zu Abschnitt 5.4.2. Der Berechnungsablauf und die Berechnungsannahmen sind in Abschnitt 5.4.2 schon beschrieben. Die Ergebnisse der Konvergenzberechnungen für alle Endlagerkonfigurationen sind in Abbildung 5-18 zu finden. Es werden nur die maximal auftretenden Konvergenzen in der Rückholstrecke dargestellt. Die maximalen Konvergenzen des Referenzmodells aus Abbildung 5-12 werden zu Vergleichszwecken mit dargestellt.

Die Konvergenzen nehmen mit größer werdenden Streckenabständen rapide 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 1,1 m nach 140 Tagen ermittelt. Bei der 100°C-Konfiguration liegen die Konvergenzen bei 20 cm. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Rückholbarkeit mit einem bergtechnisch vertretbaren Aufwand möglich ist, wenn die Einlagerungsparameter optimiert werden. Diese sind vor allem der Streckenabstand der Einlagerungsstrecken und die Behälterbeladung.

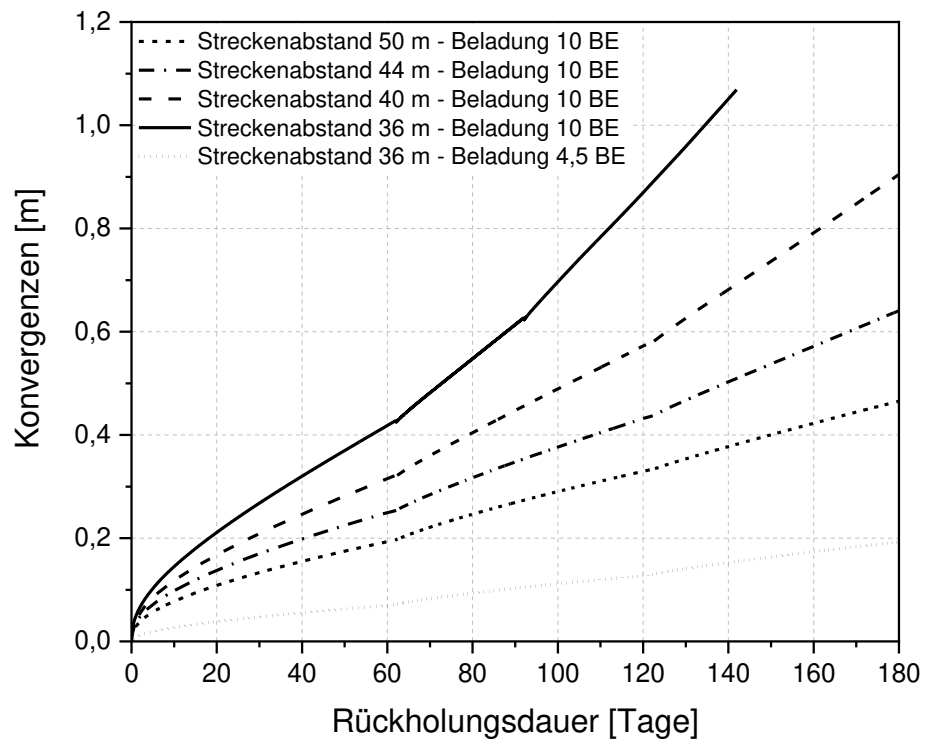


Abbildung 5-18: Konvergenzentwicklung über die Rückholungsdauer für verschiedene Endlagerkonfigurationen

6 Bewetterung und Klimavorausberechnung

6.1 Bewetterungssystem

Die Bewetterung des Grubengebäudes ist für die Versorgung aller Grubenbaue mit Frischluft und der Abführung belasteter Wetter unerlässlich. Im Einzelnen muss durch die Bewetterung die Atemluft für die Belegschaft bereitgestellt, der Sauerstoffbedarf von Verbrennungsmotoren gedeckt, giftige, explosive oder sonst wie gefährliche Gase ausreichend verdünnt bzw. abgeführt, Staubkonzentrationen verdünnt bzw. abgeführt und ein günstiges Grubenklima geschaffen werden. Diese Aufgaben können durch die Konzeption eines geeigneten Bewetterungssystems erfüllt werden.

Das bestehende Endlagerkonzept der Streckenlagerung von POLLUX[®]-Behältern in Salzformationen beinhaltet eine einsöhlige Wetterführung. Die Versorgung des Grubengebäudes mit Frischwetter soll allein über die für die Einlagerung notwendigen Strecken erfolgen. Die frischen Wetter ziehen über den einziehenden Schacht der zentralen Doppelschachanlage in das Grubengebäude. Wetterströme können innerhalb des Endlagers durch Wetterbauwerke gesteuert und Blindstrecken durch Sonderbewetterung versorgt werden. Das erlaubt eine ausreichende Versorgung aller Betriebspunkte. Alle Abwetterströme werden gesammelt und in der zweiten Richtstrecke zum ausziehenden Schacht geleitet. Es entsteht eine rückläufige Wetterführung. Die Abwetter sollen nicht über Bohrungen und eine zusätzliche Sohle, wie beispielsweise der ehemaligen Erkundungssohle, abgeführt werden. Mit dem Verzicht einer zusätzlichen Abwettersohle und Wetterbohrlöcher zur Verbindung beider Sohlen reduziert sich der Auffahrungsaufwand während der Betriebszeit deutlich. Damit wird entsprechend der Sicherheitsanforderungen des BMU *"die Durchörterung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches mit Schächten, Auffahrungen oder Bohrungen"* (BMU, 2010) minimiert.

Weiterhin wird unterstellt, dass die eingelagerten Behälter gemäß den gestellten Anforderungen gas- und aerosoldicht sind. Dementsprechend treten aus den Behältern im Normalbetrieb sowie im Störfall keine Gase oder Aerosole aus bzw. sind diese durch geeignete Maßnahmen von der Umgebungsluft abgetrennt. Der zeitnahe Versatz der Behälter beispielsweise trennt diese vom Grubengebäude und der Bewetterung. Die radiologische Belastung im Umfeld und eine mögliche Kontaminationsverschleppung nach der Einlagerung werden auf ein Minimum reduziert. Der POLLUX[®]-Behälter im Konzept der Streckenlagerung ist selbstabschirmend.

Die in (GRS, 2012) durchgeführten Wetternetzberechnungen für den Einlagerungsbetrieb untersuchen im Wesentlichen die Durchführbarkeit einer rückläufigen, einsöhligen Wetterführung. Mit diesen Untersuchungen wurde gezeigt, dass dieses Konzept für den Betrieb des Endlagers geeignet ist. Das Bewetterungssystem ermöglicht die Bereitstellung ausreichender Volumenströme an den jeweiligen Betriebspunkten. Aspekte der Klimatisierung wurden dabei weitgehend ausgeklammert. Während der Einlagerung stellen der natürliche Wärmeeintrag des Gebirges und der künstliche Wärmeeintrag der Maschinen die wesentlichen Wärmequellen dar. Die natürliche Gebirgstemperatur auf der Einlagerungssohle beträgt ca. 38°C. Die resultierenden Bedingungen sind mit dem konzipierten Bewetterungssystem be-

herrschar. Zusätzliche technische Kühlmaßnahmen sind während des Einlagerungsbetriebs nicht geplant.

Das Prinzip einer einsöhligen Bewetterung soll auch während der Rückholung der eingelagerten POLLUX®-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. Eine Minimierung des Auffahrungsaufwandes ist nicht mehr zwingend notwendig. Einzuhaltende Mindestabstände werden entsprechend der 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 Wärmeeintrag aus den eingelagerten wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelementen wichtig.

Für die Rückholung wird das Grubengebäude um eine dritte Zugangs- bzw. Hauptstrecke erweitert (siehe Abbildung 6-1). 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.

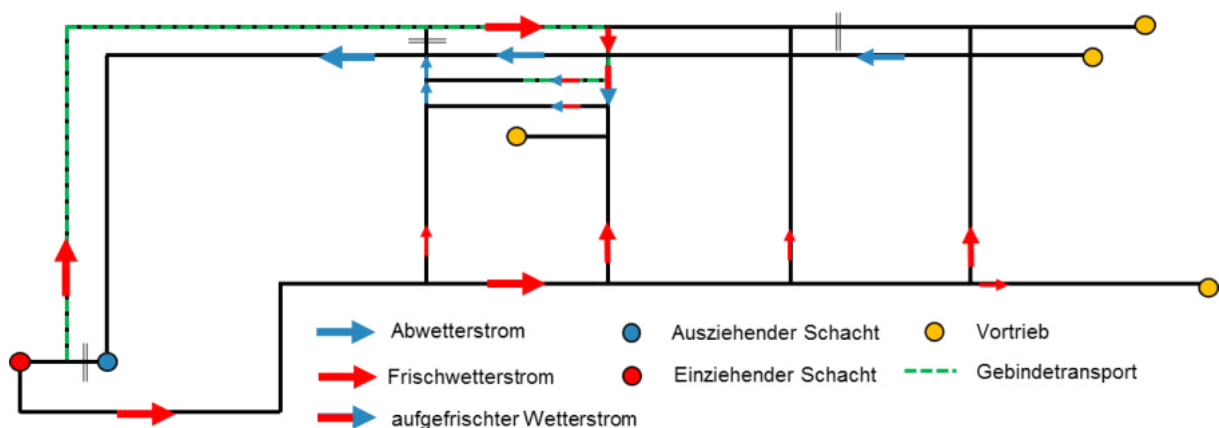


Abbildung 6-1: Bewetterungsschema während der Rückholung

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. Alle Fahrungen und Transportprozesse werden über die zweite Zugangsstrecke der Doppelstrecke realisiert.

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 Auffahrungstätigkeiten 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 Wetter. 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 6-2. 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.

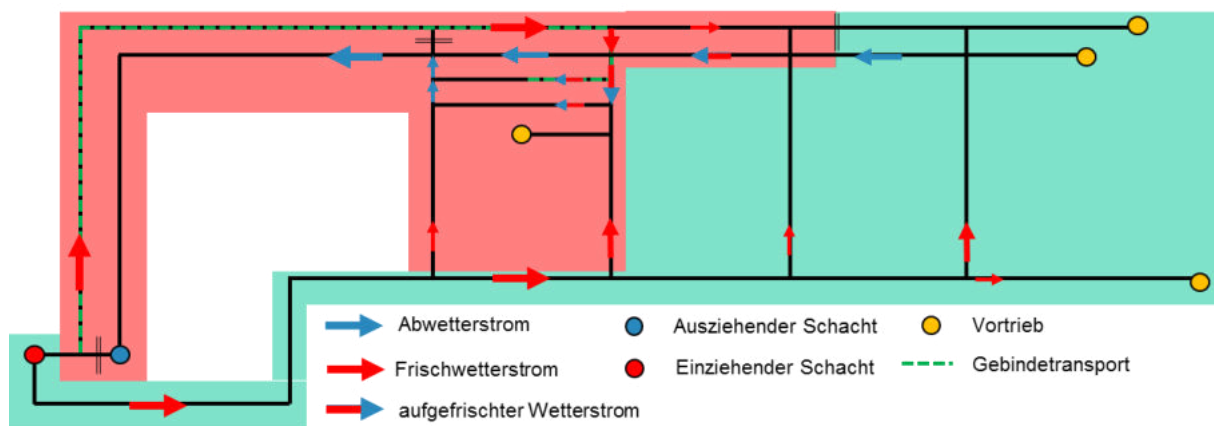


Abbildung 6-2: Schematische Darstellung des Grubengebäudes und dessen Einteilung in Strahlenschutzbereiche

Der benötigte Wetterbedarf richtet sich nach den Verbrauchern und den einzuhaltenden Mindestwettergeschwindigkeiten. Die wesentlichen Betriebspunkte mit dem erwarteten Wetterbedarf sind in Tabelle 6-1 zusammengefasst. Zusätzlich zu diesen Arbeiten finden Befahrungen und Nebenarbeiten wie beispielsweise Anker- und Beraubarbeiten oder auch der Fahrbahnbau statt. Da diese Tätigkeiten nicht ständig stattfinden, können sie zu einem Verbraucher mit einem Wetterstrom von $600 \text{ m}^3/\text{min}$ zusammengefasst werden. Beim Einsatz jeweils eines Betriebspunktes ergibt sich ein Wetterbedarf von ca. $3.000 \text{ m}^3/\text{min}$ im ÜB und $4.600 \text{ m}^3/\text{min}$ im KB.

Tabelle 6-1: Wetterbedarf der verschiedenen Betriebspunkte

Betriebspunkt	Wetterbedarf [m ³ /min]	Verbraucher
Hauptstreckenvortrieb	1.200	Belegschaft, mittlere Teilschnittmaschine, Fahrlader, Entstaubungsanlage
Teilstreckenvortrieb	1.000	Belegschaft, leichte Teilschnittmaschine, Fahrlader, Entstaubungsanlage
Gleisbau	800	Belegschaft, Fräse, Fahrlader, Transportfahrzeug
Freilegen der Behälter	800	Belegschaft, Abbruchroboter, Fahrlader, Entstaubungsanlage
Rückholung	600	Belegschaft, mELVIS
Versatz	800	Belegschaft, gleisgebundenes Versatzfahrzeug, Entstaubungsanlage

Zusätzlich zu den Rückholungsfeldern ist auch der Infrastrukturbereich zu bewettern. Dafür werden nach (GRS, 2012) 10.000 m³/min berücksichtigt. Der Mindestwetterbedarf liegt somit bei 17.600 m³/min oder ca. 295 m³/s. Mit weiteren Betriebspunkten steigt auch der Mindestwetterbedarf.

6.2 Temperaturentwicklung im Gebirge bis zum Beginn der Rückholung

Der Wärmeeintrag der Behälter führt direkt nach der Einlagerung und dem Versatz zu einer Erwärmung des Gebirges. Mit fortschreitender Einlagerungsdauer breitet sich die Wärme entsprechend den Eigenschaften des Gebirges in die weitere Umgebung aus. Die Temperaturentwicklung im Umfeld der Behälter ist durch einen schnellen und lokal stark begrenzten Anstieg gekennzeichnet. In Abhängigkeit der Behälterlage kann die Auslegungstemperatur von 200°C unmittelbar am Behälter bereits während der Betriebszeit (ca. 40 Jahre) erreicht werden. Die Betriebsdauer der Rückholung wird in erster Näherung auf ebenfalls 40 Jahre geschätzt. Die zusätzlichen künstlichen Wärmequellen in den Behältern führen während des Rückholungsbetriebes zu deutlich veränderten Umgebungsbedingungen.

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. zusätzlicher Beanspruchung zu rechnen.

Mit Blick auf den großen Wärmeeintrag wird die Wetternetzberechnung um eine Klimavorausberechnung 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.

Die nachfolgende Analyse der Temperaturentwicklung in und um die Einlagerungsbereiche basiert auf den thermo-mechanischen Berechnungen aus (GRS, 2012).

Die Rückholungstätigkeiten starten, wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, mit der Neuauffahrung der Zugangsstrecken. 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 jeweils in der Mitte zwischen den Querschlägen. An diesen Stellen sind die Abstände zu den Behältern jeweils am kleinsten. Im Bereich der großen Einlagerungsfelder Ost 10 bis Ost 6 treten die höchsten Temperaturen auf. Innerhalb der Richtstrecke Nord steigen diese im Betrachtungszeitraum bis auf maximal 86°C an (siehe Abbildung 6-3).

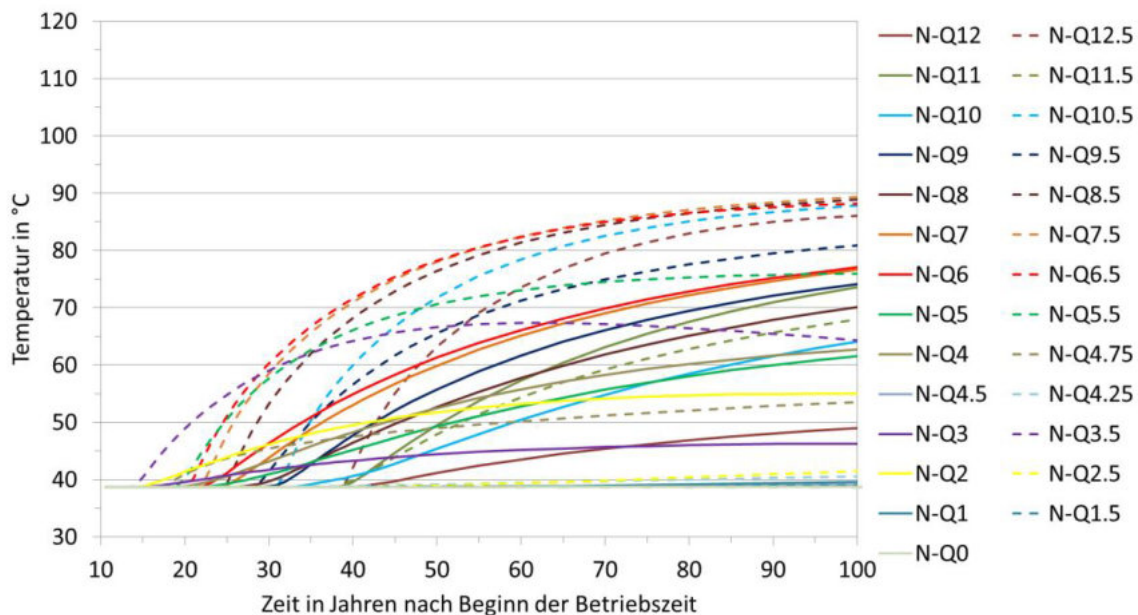


Abbildung 6-3: Temperaturentwicklung in der Richtstecke Nord (N-Qx = Streckenkreuz Richtstrecke und Querschlag x, N-Qx.5 = halbe Strecke zwischen Querschlag x und Querschlag x-1, Nummerierung der Querschläge wie bei Einlagerung)

Im Bereich der südlichen Richtstrecke liegt die Temperatur im Schnitt unter 70°C (siehe Abbildung 6-4). Einzig am Streckenkreuz des Querschlags 7 mit der Richtstrecke und zwischen den Querschlägen Ost 10 und 9 treten deutlich höhere Temperaturen auf. Hier ist der Abstand zu den eingelagerten Strecken kleiner als an allen anderen Beobachtungspunkten am Verlauf der Richtstrecke.

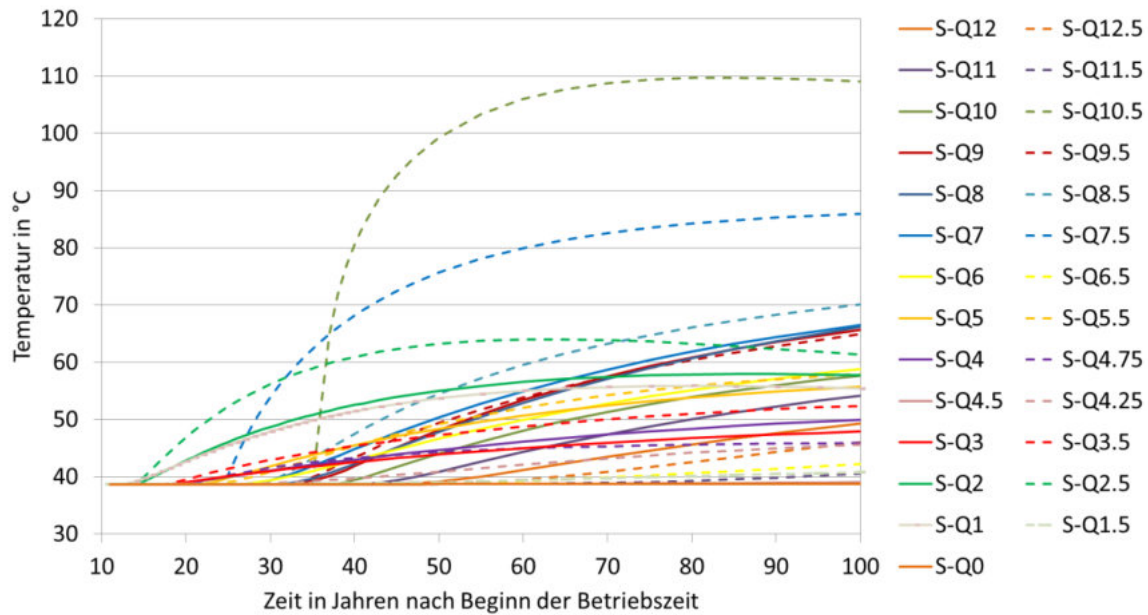


Abbildung 6-4: Temperaturentwicklung in der Richtstrecke Süd (S-Qx = Streckenkreuz Richtstrecke und Querschlag x, S-Qx.5 = halbe Strecke zwischen Querschlag x und Querschlag x-1, Nummerierung der Querschläge wie bei Einlagerung)

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 (siehe Abbildung 6-5). Die Temperaturspitzen liegen jeweils in der Mitte der Querschläge. Die Randbereiche sind kühler. Dabei sind vor allem in den Querschlägen Ost 6 bis 11 Temperaturen über 70°C zu erwarten. Diese Querschläge liegen neben bzw. zwischen den größten und heißesten Einlagerungsfeldern.

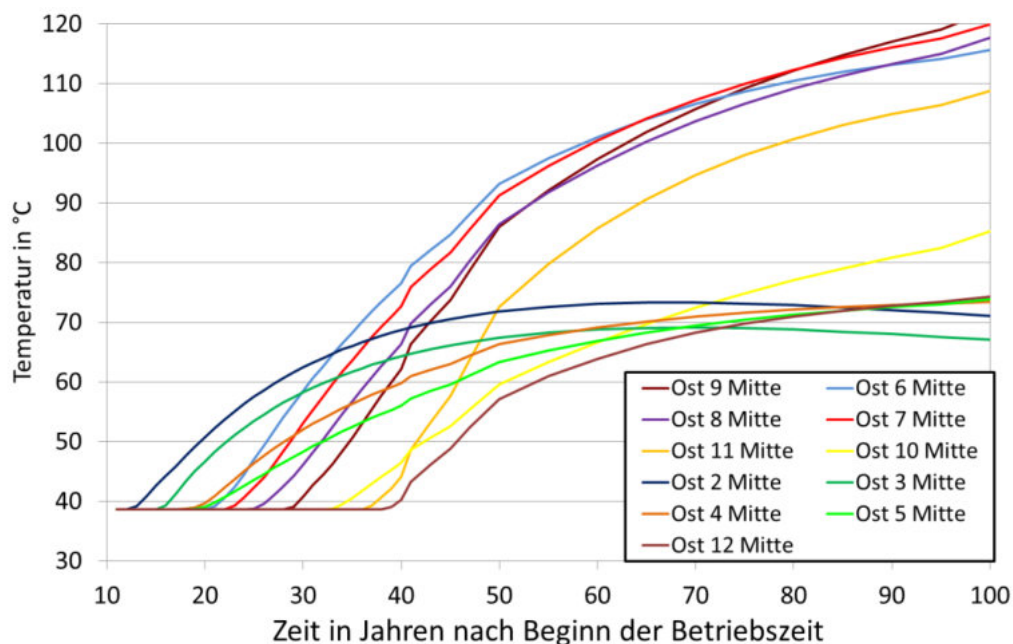


Abbildung 6-5: Temperaturentwicklung in der Mitte der Querschläge (Nummerierung der Querschläge wie bei Einlagerung)

Neben der Temperaturentwicklung ist in Abbildung 6-5 sehr gut der Einlagerungsfortschritt im Endlager zu erkennen. Während der Querschlag Ost 2 bereits 12 Jahre nach Beginn der Betriebszeit eine Erwärmung erfährt, beginnt der Temperaturanstieg in Ost 12 erst nach 39 Jahren Betriebszeit. Der Beginn des Temperaturanstieges korreliert jeweils mit dem Beginn der Einlagerung in den Einlagerungsfeldern.

Bei der Analyse der Temperaturverteilung innerhalb eines Einlagerungsfeldes sind die Positionen der Behälter deutlich durch Temperaturspitzen zuerkennen (vgl. Abbildung 6-6). In den ersten Jahren nach der Einlagerung konzentrieren sich die Temperaturmaxima auf den unmittelbaren Nahbereich der Behälter. Abseits der Behälter 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 der Felder und dem Zeitpunkt der Einlagerung abhängig. Mit dem Ende der Einlagerung sind einige der Behälter bereits mehrere Jahrzehnte eingelagert. Innerhalb der großen Einlagerungsfelder (Ost 10 bis Ost 7) herrschen zum Ende der Einlagerung bereits Temperaturen nahe der Auslegungsgrenze.

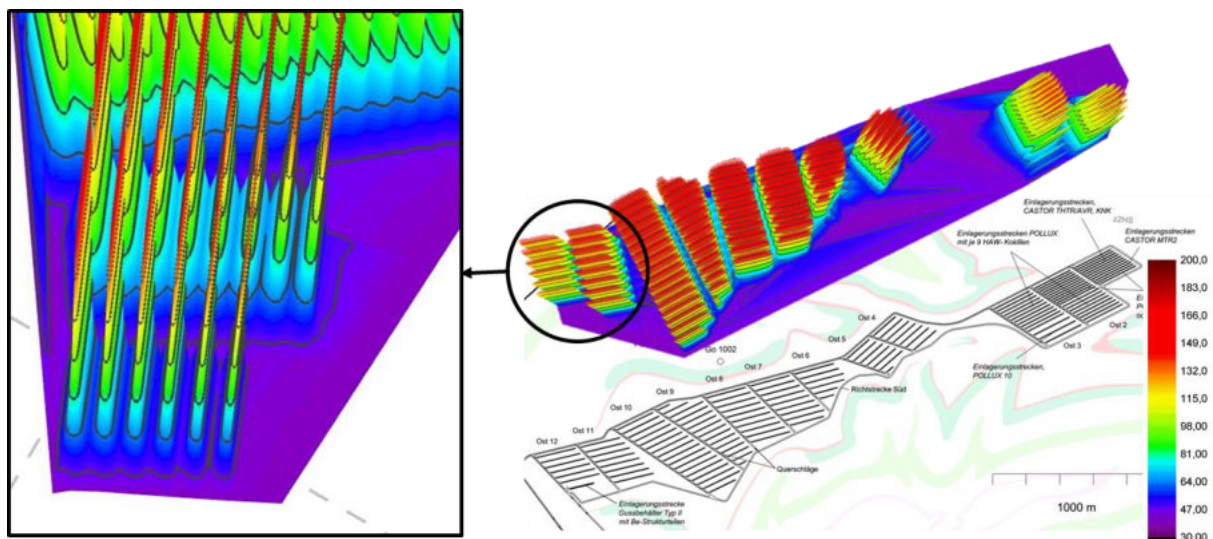


Abbildung 6-6: Temperaturverteilung im Grubengebäude am Ende der Einlagerung bzw. zu Beginn der Rückholung (ca. 40 Jahre nach Beginn der Betriebszeit), rechts Detailansicht der Einlagerungsfelder Ost 12 und 11

Abbildung 6-7 zeigt beispielhaft die Temperaturentwicklung um einen Behälter in der Einlagerungstrecke 3 des Feldes Ost 12. In diesem schachtnächsten Einlagerungsfeld findet die Einlagerung erst wenige Jahre vor Ende der Betriebszeit statt. Der betrachtete Behälter liegt in der Mitte des Einlagerungsfeldes. Hier treten die höchsten Temperaturen auf. In den Randlagen sind die Maximaltemperaturen etwas geringer.

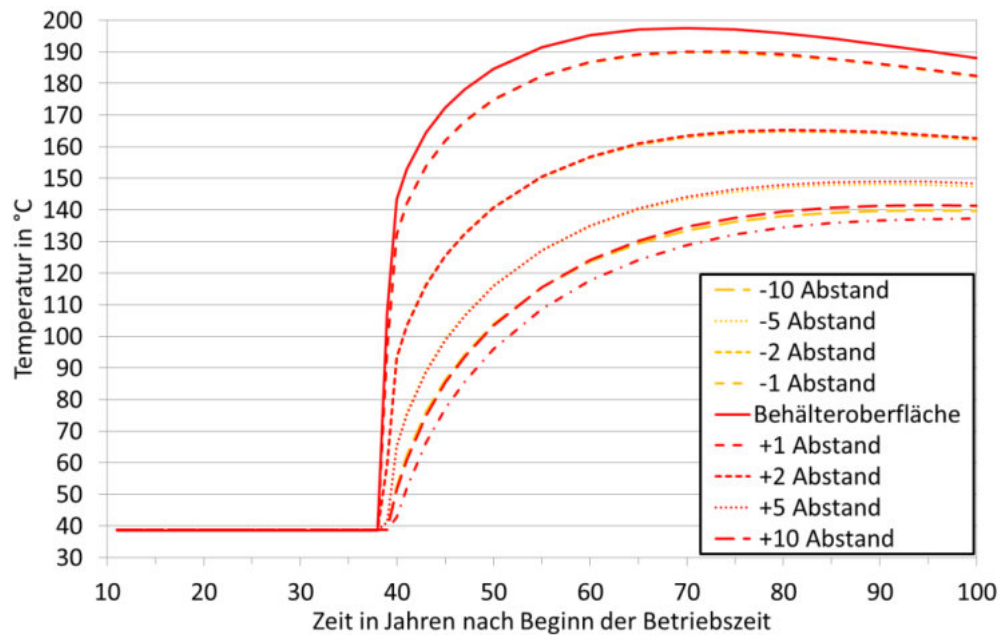


Abbildung 6-7: Temperaturentwicklung an verschiedenen Beobachtungspunkten in einer horizontalen Ebene um einen Behälter in der Einlagerungstrecke 3, Feld Ost 12 innerhalb der ersten 100 Jahre nach Beginn der Betriebszeit

Die Abbildung verdeutlicht den schnellen Temperaturanstieg am Behälter, innerhalb weniger Jahre. Zusätzlich wird deutlich, dass bereits wenige Meter neben dem Behälter Temperaturen deutlich unter dem Auslegungsmaximum liegen. Für den potenziellen Rückholungszeitraum sind im Umfeld des Behälters Temperaturen von 100 °C und mehr zu erwarten. Zur Verdeutlichung dieses Sachverhaltes zeigt Abbildung 6-8 die räumliche Verteilung der Temperatur um den Behälter zu verschiedenen Zeitpunkten nach der Einlagerung. Im Bereich der geplanten Neuauffahrungen werden bereits wenige Jahre nach der Einlagerung Gebirgstemperaturen bis über 100 °C prognostiziert.

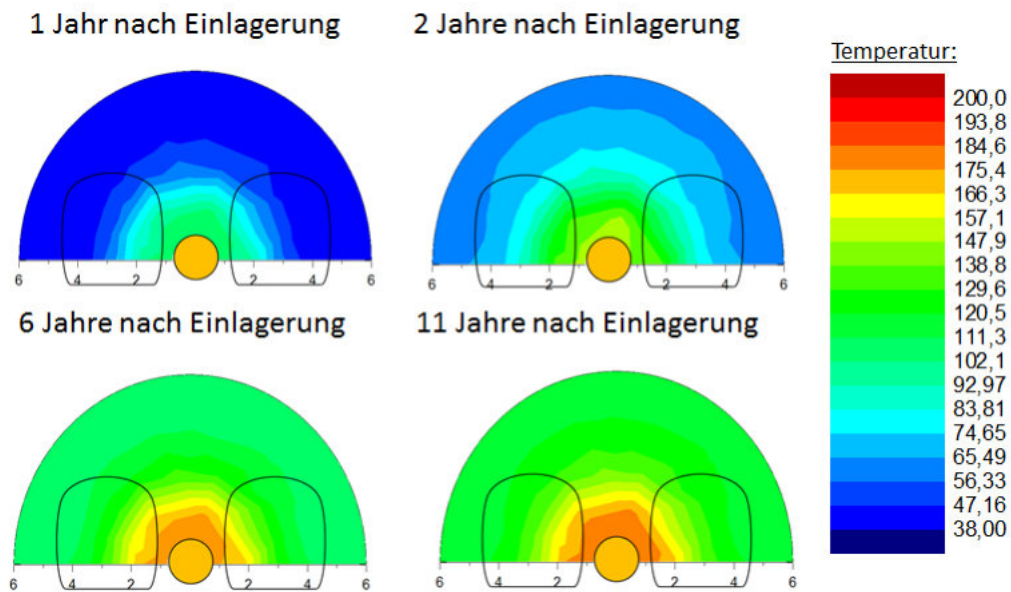


Abbildung 6-8: Temperaturfeld an einem Behälter in der Einlagerungstrecke 3, Feld Ost 12, senkrecht zur Behältermitte zu verschiedenen Zeitpunkten nach der Einlagerung

Die ermittelte Temperaturverteilung und deren Veränderung über die Zeit bilden die Eingangsgrößen für die Wetternetzmodelle. Den Grubenbauen wird entsprechend ihrer Lage die erwartete Gebirgstemperatur als ursprüngliche Gebirgstemperatur zugeordnet.

6.3 Temperaturentwicklung im Gebirge nach Entnahme der Behälter

Mit fortschreitender Rückholung werden die Wärmequellen aus den Einlagerungsbereichen entfernt. Der bis dahin erfolgte Wärmeeintrag wird teilweise über die Wetter abgeführt und verteilt sich außerdem im Gebirge. Um die Gebirgstemperaturen möglichst exakt abzubilden wurde eine zusätzliche Berechnung durchgeführt, in der die Wärmequellen in Abhängigkeit des Einlagerungsfortschrittes aktiviert und anschließend entsprechend des angenommenen Rückholungsfortschritts schrittweise wieder deaktiviert wurden. Die resultierenden Temperaturen fließen in die Modellbildung ein. Die Abbildungen Abbildung 6-9 bis Abbildung 6-12 zeigen die sich dann einstellende Temperaturentwicklung. Kühleffekte der Wetter sind an dieser Stelle noch nicht berücksichtigt.

Die Entnahme der Wärmequellen (Rückholung der Behälter) ist 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 zu den Abfällen bestimmt. Über den für die Rückholung relevanten Zeitraum muss in weiten Teilen des neuen Grubengebäudes auch nach erfolgter Rückholung noch mit deutlich erhöhten Temperaturen gerechnet werden. Dies ist insofern relevant, da die frischen Wetter an den zurückgeholten aber noch warmen Gebirgsbereichen vorbeigeleitet werden müssen.

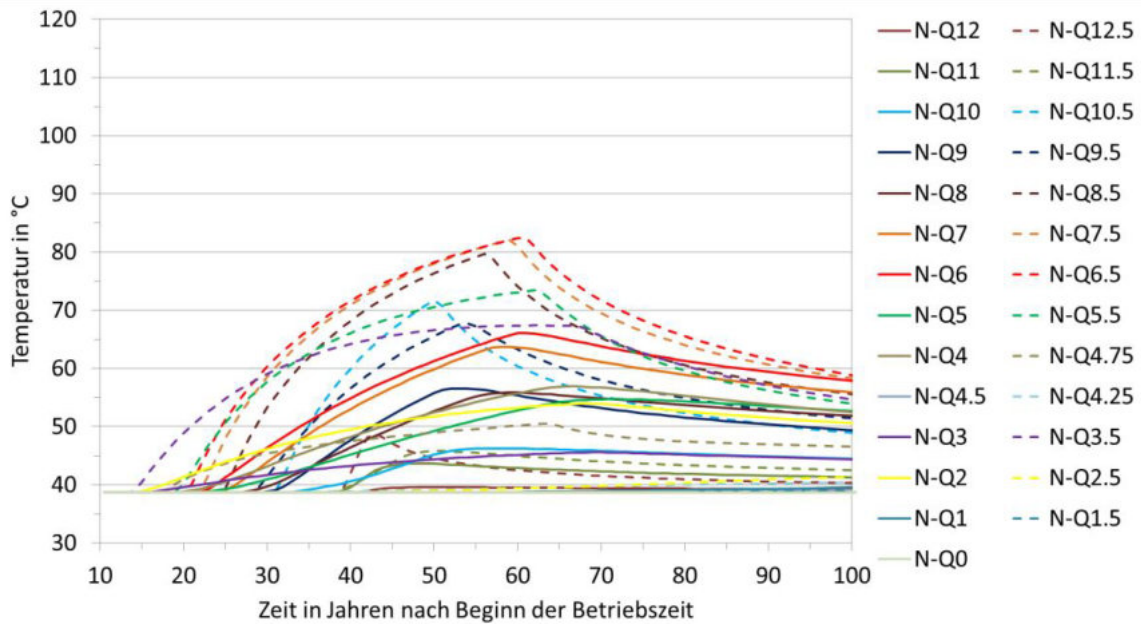


Abbildung 6-9: Temperaturverteilung Richtstrecke Nord nach Entnahme ohne Kühleffekte der Wetter (N-Qx = Streckenkreuz Richtstrecke und Querschlag x, N-Qx.5 = halbe Strecke zwischen Querschlag x und Querschlag x-1, Nummerierung der Querschläge wie bei Einlagerung)

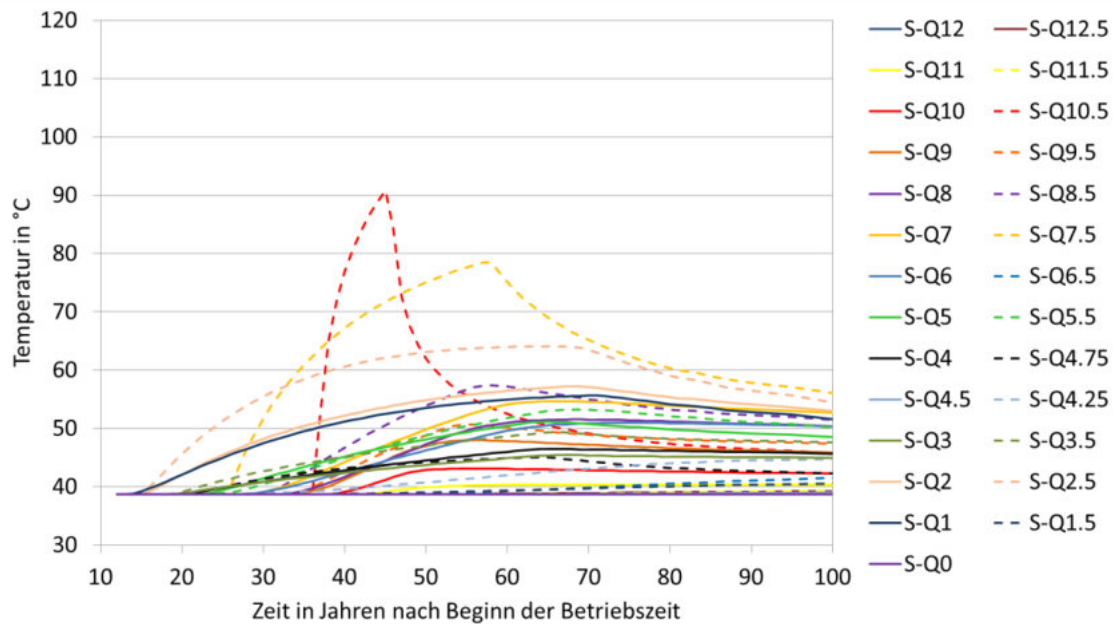


Abbildung 6-10: Temperaturverteilung Richtstrecke Süd nach Entnahme ohne Kühleffekte der Wetter (S-Qx = Streckenkreuz Richtstrecke und Querschlag x, S-Qx.5 = halbe Strecke zwischen Querschlag x und Querschlag x-1, Nummerierung der Querschläge wie bei Einlagerung)

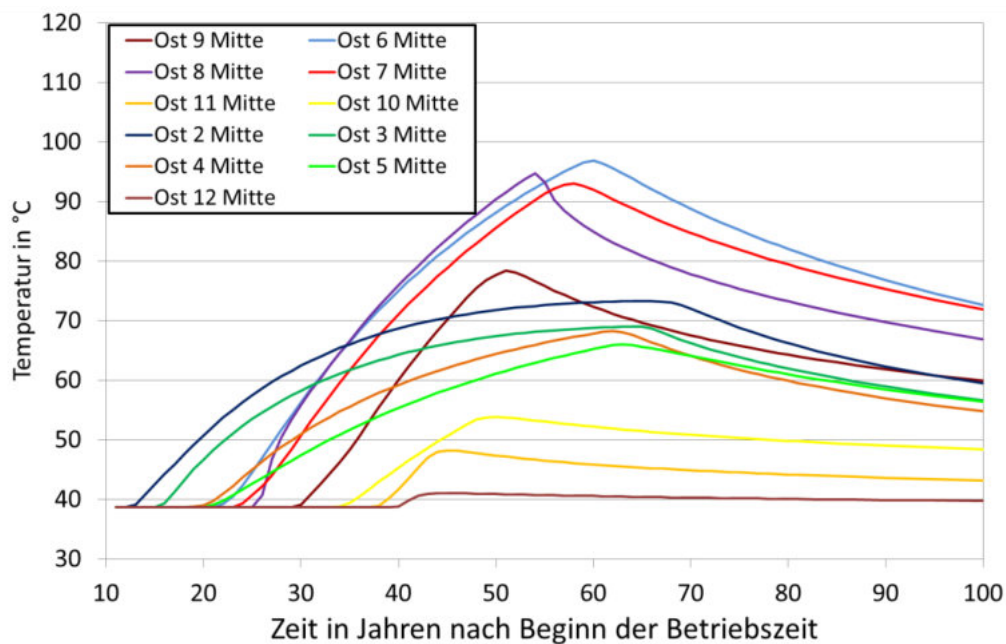


Abbildung 6-11: Temperaturentwicklung in der Mitte der Querschläge nach Abschalten der Wärmequellen, ohne Kühleffekte der Wetter (Nummerierung der Querschläge wie bei Einlagerung)

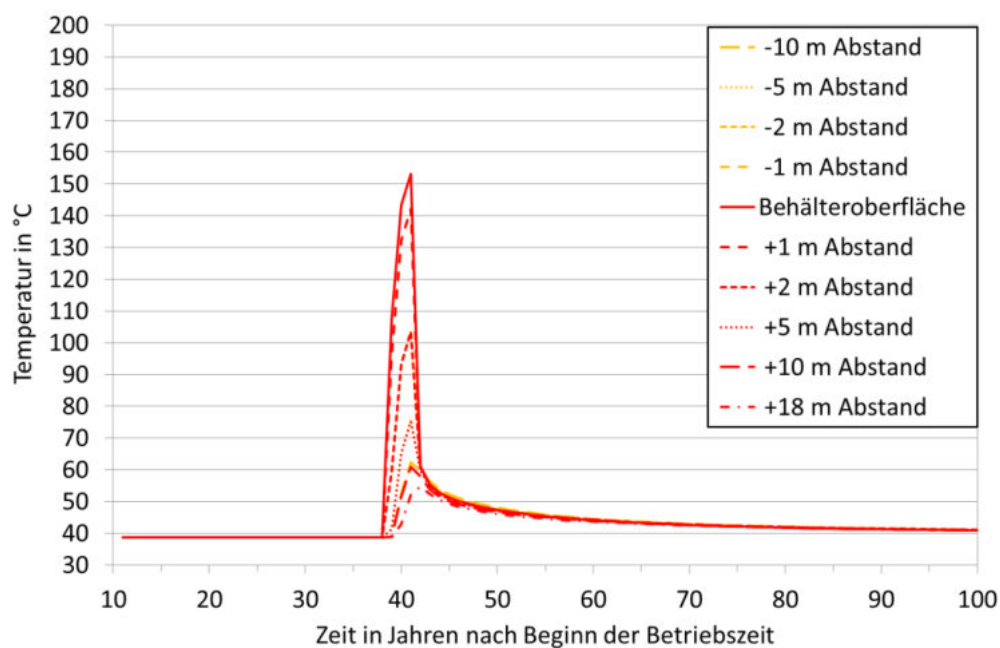


Abbildung 6-12: theoretische Temperaturentwicklung am Standort des Behälters (Einlagerungstrecke 3, Feld Ost 12) nach der Rückholung innerhalb der ersten 100 Jahre nach Beginn der Betriebszeit

6.4 Klimavorausberechnung

6.4.1 Umgebungsbedingungen

Beginnend am einziehenden Schacht, definieren die klimatischen Bedingungen an der Oberfläche die Eingangsgrößen der Wetter. In Abbildung 6-13 ist der durchschnittliche Temperaturverlauf und die relative Feuchte für Deutschland im Jahresverlauf zusammengefasst.

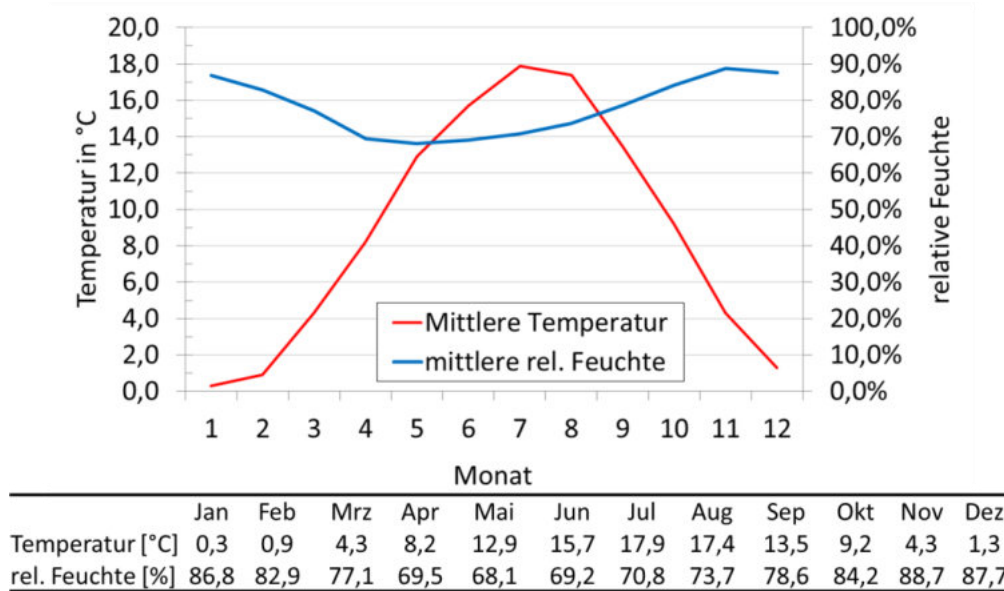


Abbildung 6-13: Temperatur und relative Feuchte im Jahresmittel für Deutschland (DWD, 2015)

Die mittleren Temperaturen schwanken über den Jahresverlauf um 17,6 K. Die Jahresdurchschnittstemperatur liegt bei 8,8°C mit einer hohen Luftfeuchtigkeit von ca. 78 % bzw. einem mittleren Feuchtegehalt von 0,0055 kg Wasser je kg trockene Luft. Als Eingangsgröße für die Modelle wird eine mittlere Temperatur von 10°C bei einer relativen Feuchte von ca. 78 % festgelegt. Jahreszeitliche Temperaturschwankungen und Extremwerte werden zunächst vernachlässigt. Im ersten Schritt steht zunächst die Machbarkeit des Gesamtsystems im Vordergrund.

Im einziehenden Schacht steigt mit zunehmender Teufe der Luftdruck und führt zu einer Erwärmung der Wetter. Die zugeführte Verdichtungswärme ist abhängig vom Zustand der Luft. Die einziehende Wettermenge hat keinen Einfluss auf die Autokompression. Als Faustregel für trockene Wetter kann eine Temperaturerhöhung um 1 K je 100 m Teufe angenommen werden. Genauer lässt sich die Temperaturerhöhung gemäß Gleichung [2-1] bestimmen:

$$\Delta T = H * \left(\frac{1 + X}{c_L + c_D * X} \right) * g \quad [2-1]$$

- ΔT Temperaturdifferenz [K]
 H Teufe [m]
 X Feuchtegehalt [kg/kg trockene Luft]

g	Fallbeschleunigung (9,81m/s ²)
c _L	Wärmekapazität Luft (1.004 J/kg*K)
c _D	Wärmekapazität Wasserdampf (1.860 J/kg*K)

Die Gleichung vernachlässigt die durch eine Verdunstung des Wassers entzogene Wärme. Unter den Bedingungen im Schacht erwärmen sich die Wetter um 8,5 K. Die Eintrittstemperatur der Wetter am Füllort beträgt damit im Mittel 17,3°C mit einer relativen Feuchte von ca. 45 %.

6.4.2 Regulatorische Vorgaben

Der sichere Betrieb des Endlagers muss stets den Schutzzielen und sicherheitstechnischen Anforderungen des Bergbaus entsprechen (ESK, 2015). Dies gilt auch für den Rückholungsbetrieb. Innerhalb des Grubengebäudes sind stets die Temperaturgrenzwerte der "Bergverordnung zum Schutz der Gesundheit gegen Klimaeinwirkungen" (kurz Klima-Bergverordnung – KlimaBergV) einzuhalten. Wird im Salzbergbau eine Trockentemperatur von 28°C überschritten, dürfen Personen innerhalb des täglichen Arbeitsablaufs nicht länger als 7 h beschäftigt werden, sofern sie täglich mehr als 5 h bei Trockentemperaturen über 28°C bis 37°C oder mehr als 4,5 h bei Trockentemperaturen über 37°C bis 46°C verbringen. Die zulässige Arbeitszeit verkürzt sich auf 6,5 h, wenn Personen täglich mehr als 4 h bei Trockentemperaturen über 46°C bis 52° C verbringen. Ab einer Trockentemperatur von mehr als 52°C oder einer Feuchtttemperaturen von mehr als 27°C dürfen Personen im Salzbergbau nicht mehr beschäftigt werden. (KlimaBergV 1983)

Die Vorgaben der Klimabergverordnung sind stets einzuhalten. Auch wenn verschiedene Arbeitsschritte während der Rückholung fernbedient oder auch automatisiert durchgeführt werden können, ist die Anwesenheit von Personal in der Grube und an den Arbeitspunkten zwingend notwendig.

6.4.3 Modellbildung

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

Die Rückholungstätigkeit im schachtnächsten Feld startet 43 Jahre nach Beginn der Einlagerung. Der Rückholungszeitraum wird durch sieben Teilmodelle abgedeckt, siehe Abbildung 6-14. Mit diesen Modellen werden die Rückholungstätigkeiten in den einzelnen Einlagerungsfeldern und der Auffahrungsfortschritt dargestellt. Die Auffahrung der Aus- und Vorrichtungsstrecken erfolgt parallel zu den Rückholungsarbeiten. Der Betrachtungszeitpunkt ist jeweils zu Beginn der Rückholungstätigkeiten der Einlagerungsfelder. Die zeitliche Abfolge beruht auf einer vorläufigen Leistungsabschätzung. Allen Strecken wird eine ursprüngliche Gebirgstemperatur zugeordnet, wie sie in den thermo-mechanischen Berechnungen ermittelt wurde, vgl. Abschnitt 6.2. Über das Alter der Streckenteile wird die Kühlwirkung der Wetter berücksichtigt. Die wetter- und climatechnisch sensibelsten Punkte sind stets die Vortriebe.

An den Vortriebspunkten treffen die hohen Gebirgstemperaturen und die zusätzliche Wärmeleistung der Maschinen auf begrenzte Möglichkeiten der Bewetterung (Sonderbewetterung). Die Rückholbarkeit der Abfälle aus der Referenzauslegung hängt somit maßgeblich von der Realisierbarkeit der Streckenvortriebe ab. Die Teilmodelle repräsentieren folgende Zustände:

- Modell 1: Rückholung Feld 12/11 43 Jahre nach Beginn der Betriebszeit
- Modell 2: Rückholung Feld 10 49 Jahre nach Beginn der Betriebszeit
- Modell 3: Rückholung Feld 9 56 Jahre nach Beginn der Betriebszeit
- Modell 4: Rückholung Feld 8 62 Jahre nach Beginn der Betriebszeit
- Modell 5: Rückholung Feld 7/6 66 Jahre nach Beginn der Betriebszeit
- Modell 6: Rückholung Feld 5/4 72 Jahre nach Beginn der Betriebszeit
- Modell 7: Rückholung Feld 3/2/1 76 Jahre nach Beginn der Betriebszeit

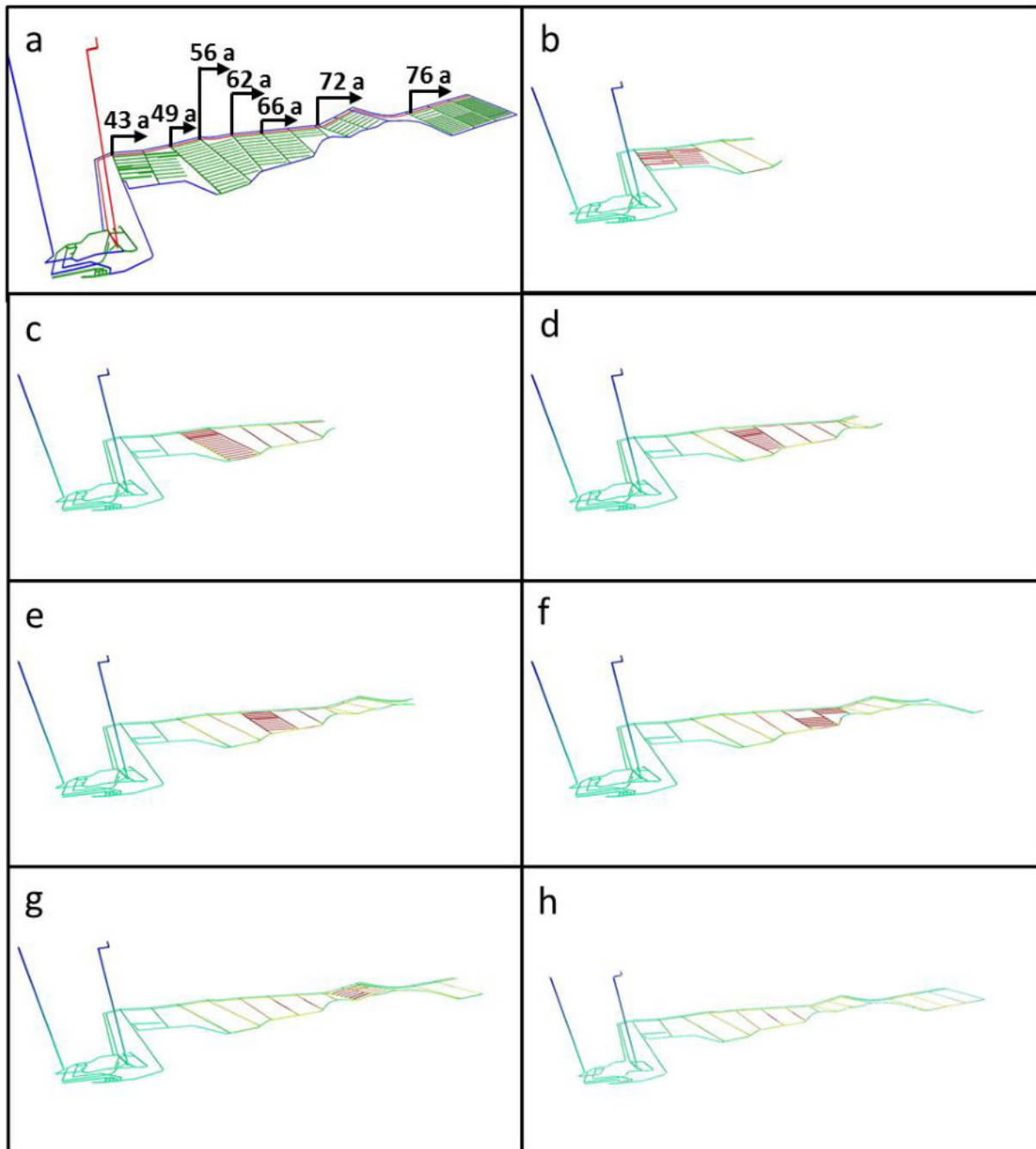


Abbildung 6-14: Modelle zur Abbildung des Rückholungszeitraumes, (a) Gesamtansicht mit zeitlicher Einordnung, (b) bis (h) Teilmodelle 1 bis 7 mit Darstellung der ursprünglichen Gebirgstemeperatur

6.4.4 Analyse Auffahrung der Hauptstrecken und Querschläge

Bei einer zügigen Auffahrung der Hauptstrecken können diese in ca. 3 Jahren errichtet werden. In diesem Zeitraum 40 bis 44 Jahre nach Beginn der Einlagerung stiegen die Gebirgstemperaturen in einigen Teilbereichen der Richtstrecken auf bis zu 76°C. Damit übersteigen die Gebirgstemperaturen bereits zu diesem frühen Zeitpunkt und in relativ weiter Entfernung zu den Behältern die Bedingungen, wie sie in konventionellen Bergwerken noch wirtschaftlich vertretbar zu beherrschen sind. In den Querschlägen zeichnet sich ein ähnliches Bild ab. Hier liegen die Spitzentemperaturen an wenigen Stellen bereits bei über 80°C. Mit der Annäherung an die Behälter steigen auch die Gebirgstemperaturen weiter an.

Durch den künstlichen Wärmeeintrag der Behälter ist der Anstieg der Gebirgstemperatur nicht gleichmäßig verteilt. Die hohen Temperaturen treten jeweils in 200 bis 300 m langen Teilstücken, immer neben den Einlagerungsfeldern auf. Innerhalb der Querschläge konzentrieren sich die Temperaturspitzen

auf kurze 100 bis 200 m lange Bereiche, vgl. Abbildung 6-15. Die räumliche Begrenzung und hohen Gradienten sind ein wesentlicher Unterschied im Vergleich zu den Bedingungen unter natürlichen Gebirgstemperaturen.

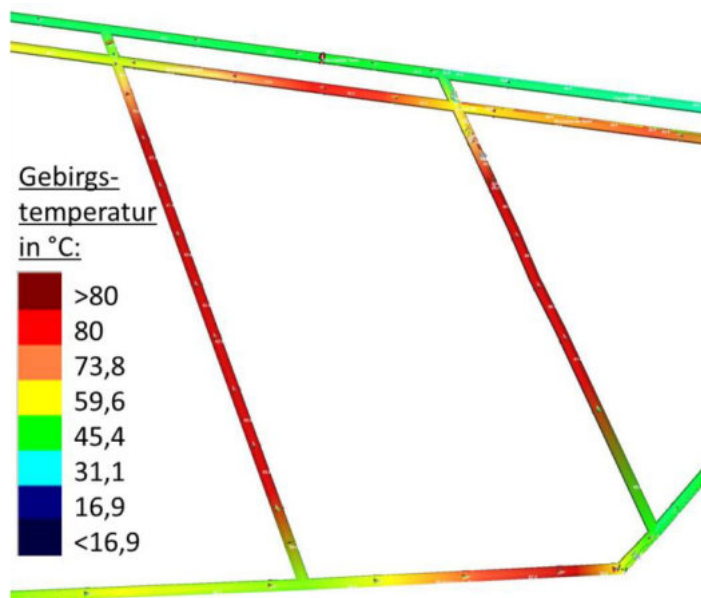


Abbildung 6-15: Beispiel lokale Verteilung Gebirgstemperaturen im Querschlag Ost 7 (Modell 2)

Die extremen Umgebungsbedingungen sind in Verbindung mit den zusätzlichen Restriktionen der (blasenden) Sonderbewetterung (vgl. Abbildung 6-16) mit konventioneller Technik, wenn überhaupt, nur schwer zu beherrschen. Ziel ist es über die gesamte Vortriebslänge L hinreichend günstige klimatische Bedingungen zu schaffen. Die Endtemperatur der Wetter T_{E2} wird von den verschiedenen Wärmequellen beeinflusst. Der Wärmestrom vom Gebirge zu den Wetter ist an den neu aufgefahren Abschnitten (Ortsbrust) am höchsten. Die Einhaltung der Grenzwerte erfordert neben dem Einsatz zusätzlicher Kühltechnik eine Begrenzung der täglichen Vortriebslänge z und regelmäßige Kühlpausen. Der Vortrieb wird daher auf eine Schicht pro Tag begrenzt. Für alle Leistungsermittlungen wird stets eine verkürzte Arbeitszeit von 6,5 h angenommen. Damit ergibt sich für die Vortriebe eine Nettoarbeitszeit von maximal 5 h.

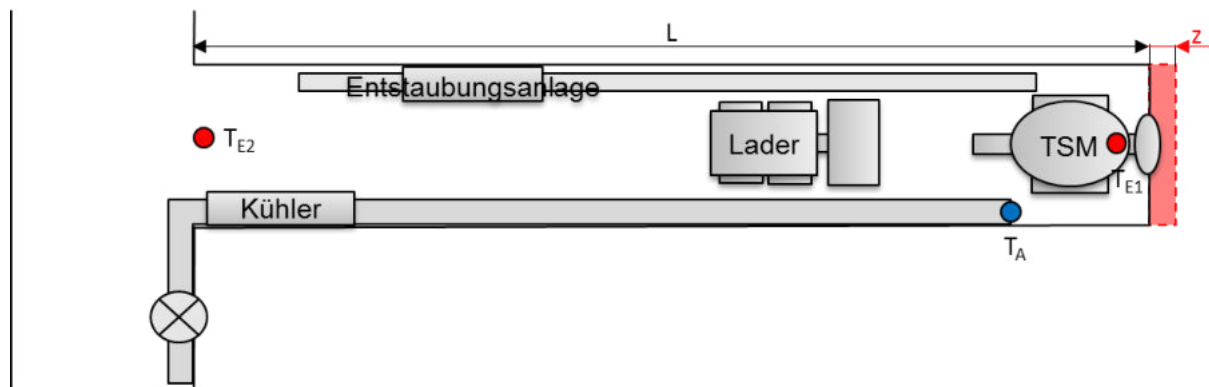


Abbildung 6-16: Schematische Darstellung des Vortriebes

Über die Zeit kühlen die konturnahen Gebirgsbereiche entlang der Vortriebsstrecke aus, siehe dazu auch Abbildung 6-17. Der zulässige Auffahrungsfortschritt z ist so zu wählen, dass die Grenzwerte an allen Messpunkten (T_{E1} und T_{E2}) eingehalten werden. Die Grenzen dieses Systems sind erreicht, wenn der erforderliche technische Kühlaufwand zu hoch oder aber die mögliche Vortriebsgeschwindigkeit unrealistisch kurz wird.

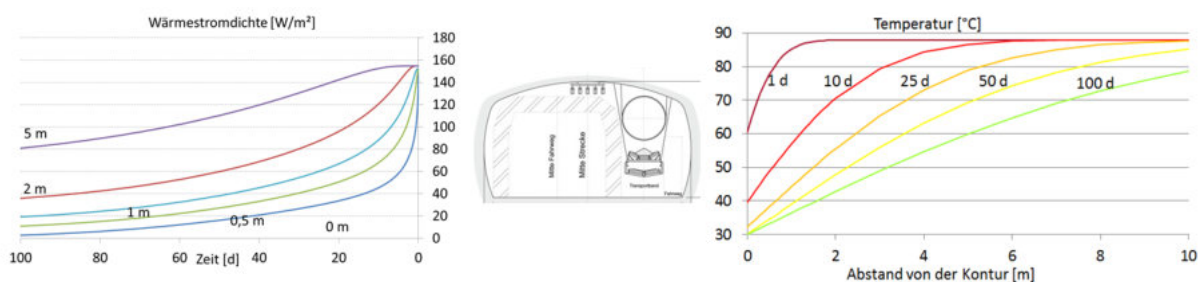


Abbildung 6-17: Zeitliche Veränderung der Gebirgstemperatur und des Wärmestroms im Umfeld der Auffahrung

Die Wettertemperaturen T_{E1} und T_{E2} können gemäß (Voß, 1981) nach Gl. [2-2], bestimmt werden. (Voß, 1981) ist auf die untertägigen Bedingungen zugeschnitten und erlaubt eine Berücksichtigung des Streckenalters und damit der Auskühlung im Gebirge über den Altersbeiwert $K(\alpha)$.

$$T_E = T_G - (T_G - T_A) * e^{\frac{-z * U * K(\alpha) * \lambda_G}{\dot{m} * c_{pL} * r_{hyd}}} \quad [2-2]$$

T_E	Wettertemperatur am Ende des Streckenschnitts	°C
T_G	Gebirgstemperatur	°C
T_A	Wettertemperatur am Anfang des Streckenschnitts	°C
z	Länge des Streckenabschnitts	m
U	Umfang des Streckenabschnitts	m
$K(\alpha)$	Alterungsbeiwert	-
λ_G	Wärmeleitfähigkeit des Gebirges	W/m*K
$\dot{m}$	Massenstrom	kg/s
c_{pL}	spezifische Wärmekapazität der Luft	kJ/kg*K

r_{hyd} hydraulischer Radius des Streckenabschnitts m

Durch Umstellen der Gleichung nach der Streckenlänge z kann die zulässige Länge der täglichen Neuauffahrung in den Vortrieben bestimmt werden. Die Eingangstemperatur der Strecke entspricht der Austrittstemperatur aus der Lutte. Die Austrittstemperatur der Lutte ist so festzulegen, dass über den weiteren Verlauf des sonderbewetterten Bereichs keine Überschreitung der Grenzwerte eintritt.

$$z = \frac{-\ln\left(\frac{t_G - t_{max}}{t_G - t_A}\right) * \dot{m} * c_{pL} * r_{hyd}}{U * K(\alpha) * \lambda} \quad [2-3]$$

Der Alterungsbeiwert $K(\alpha)$ als Funktion der Boit- und Fourier-Zahl kann nach (Voß, 1981) aus allgemeingültigen Diagrammen bestimmt werden (siehe Abbildung 6-18).

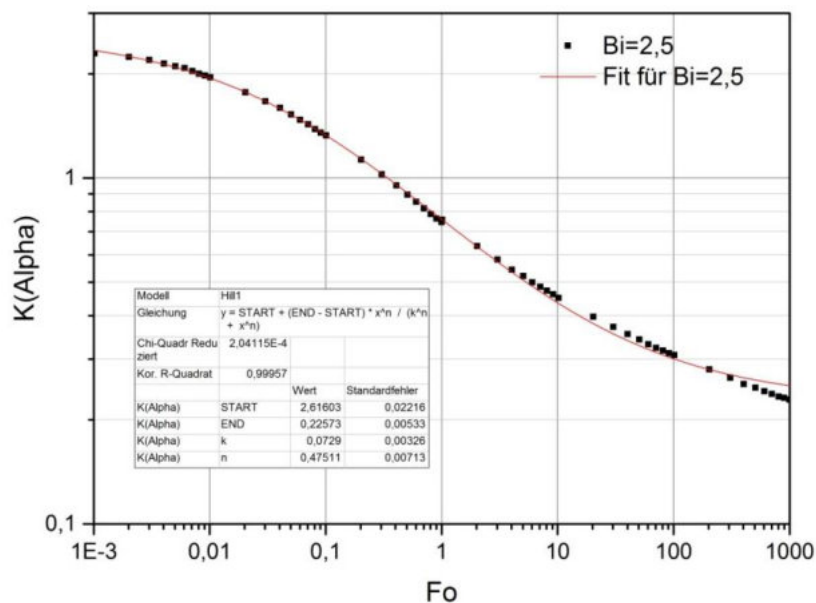


Abbildung 6-18: Altersbeiwert als Funktion der Fourier- und Biot-Zahl nach (Voß, 1981), mit angepasster Näherungsfunktion

In Abhängigkeit der Gebirgstemperatur und der Eigenschaften der Wetter lässt sich eine maximale Vortriebslänge bestimmen. Mit Einhaltung dieser Vortriebslänge kann innerhalb des sonderbewetterten Bereiches die Grenztemperatur gemäß Klimabergverordnung eingehalten werden. Wird weiter aufgefahren, übersteigt die Wettertemperatur den Grenzwert. Um dies zu vermeiden muss mit zusätzlichen technischen Mitteln gekühlt und/oder der Strecke eine längere Zeit zum Auskühlen eingeräumt werden. Dadurch kühlt der Stoß stetig ab, vgl. dazu auch Abbildung 6-17 und Abbildung 6-23.

In die Berechnung fließt außerdem der Wärmeeintrag der Maschinen (E in [K]) ein, siehe Gl. [13].

$$E = \frac{Q_{zu} * r_{hyd}}{U * K(\alpha) * \lambda * z_{kalt}} \quad [2-13]$$

E	Wärmeeintrag der Maschinen	K
Q_{zu}	Wärmemenge	W
z_{kalt}	Länge des Ortsbrustbereiches	m

Aus Gleichung [3] und [13] ergibt sich:

$$z = \frac{-\ln\left(\frac{t_G - t_{max} + E}{t_G - t_A + E}\right) * \dot{m} * c_{pL} * r_{hyd}}{U * K(\alpha) * \lambda} \quad [2-14]$$

Die Maschinen und Einrichtungen innerhalb der Vortriebsstrecke besitzen eine installierte Leistung von 550 kW. Die Eintrittstemperatur der Wetter T_A beträgt nach der Kühlung 25°C. Nach dem zuvor beschriebenen Ansatz zur Abschätzung der zulässigen Vortriebslänge wurde ermittelt welche rechnerische Erwärmung die Wetter am Messpunkt T_{E1} (vgl. Abbildung 6-16) erreichen dürfen um über die gesamte Streckenlänge hinweg die Temperaturgrenzwerte der KlimaBergV einzuhalten ($T_{E2} < 52^\circ\text{C}$). Abbildung 6-19 fasst die Ergebnisse für die Vortriebe an den Hauptstrecken zusammen. Es wurden stets die höchsten erwartete Gebirgstemperaturen angesetzt. Mit diesem Ansatz können für die jeweiligen Bedingungen einzelner Streckenteile die zulässigen Vortriebsgeschwindigkeiten ermittelt werden.

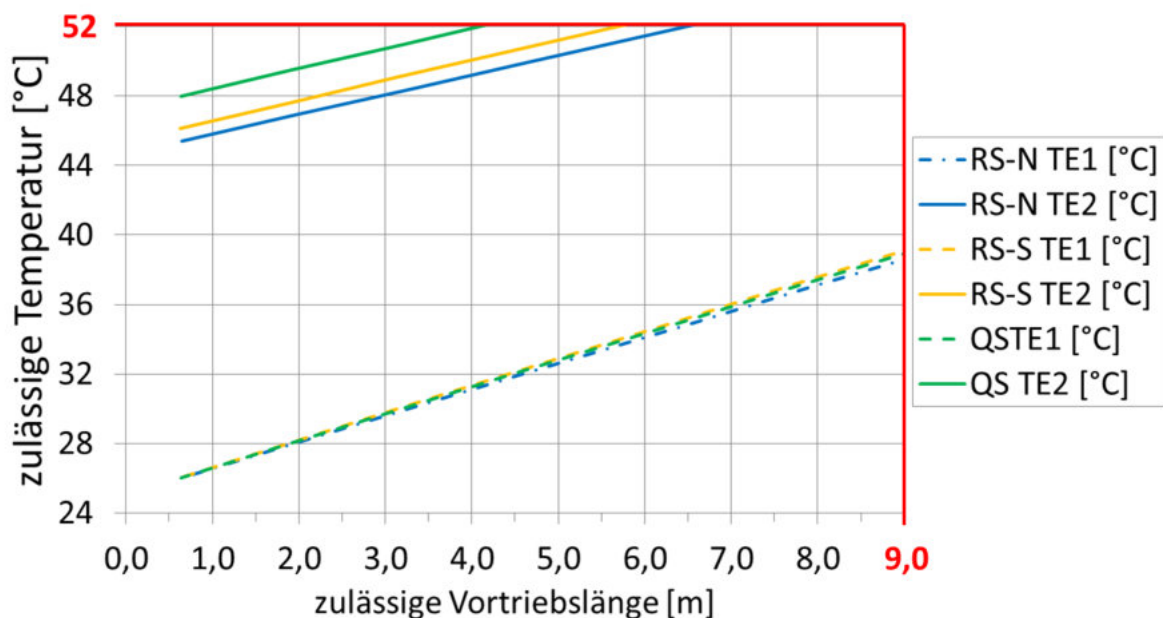


Abbildung 6-19: zulässige Vortriebslänge pro Schicht in den Richtstrecken und Querschlägen, in Abhängigkeit der zulässigen trocken Temperatur an der Ortsbrust

Die prognostizierte Vortriebsleistung der schweren TSM liegt in den Richtstrecken und Querschlägen bei maximal. 9 m/Schicht. Ohne technische Kühlmaßnahmen sind die Vortriebe nicht zu realisieren. Die extremen Umgebungsbedingungen drücken die theoretische Vortriebsleistung auf kleiner als 50%. Die Errichtung aller Richtstrecken und Querschläge dauert somit deutlich länger und muss parallel zur Rückholung erfolgen. Dies ist bereits in den Modellen (vgl. Abbildung 6-14, b – h) berücksichtigt. Der zusätzliche technische Kühlbedarf beläuft sich in den Hauptstreckenvortrieben auf bis zu 40kW.

6.4.5 Auffahrung der Rückholungsstrecken

Mit der Auffahrung der Rückholungsstrecken und dem Freilegen der Behälter beginnt der eigentliche Rückholungsvorgang. Wie bereits in Abschnitt 4.1 beschrieben finden alle Auffahrungen der Rückholungsstrecken im KB statt. Die Durchführung von Auffahrungsarbeiten im KB stellt einen wesentlichen Unterschied zum Einlagerungsbetrieb dar. Mit der Annäherung an die Behälter und der Möglichkeit einer vorhandenen Kontamination im Umfeld des Behälters ist die vorsorgliche Einrichtung des KB aber unumgänglich.

6.4.5.1 Auswirkungen des Strahlenschutzes auf die Bewetterung

Die Vortriebe der Teilstrecken erfolgen mit einer leichten TSM (maximal. 200 kW installierte Leistung). Zur Aufnahme des Haufwerks ist ein elektrisch betriebener Fahrlader vorgesehen. Insgesamt wird ein Frischwetterbedarf von rund 17 m³/s abgeschätzt. Für die Versorgung der Vortriebe stehen grundsätzlich eine blasende oder saugende Sonderbewetterung zur Verfügung, vgl. Abbildung 6-20 und Abbildung 6-21.

Bei der blasenden Sonderbewetterung werden Wetter durch die Lutten an die Ortsbrust geführt. Damit sind die frischen, unbelasteten Wetter direkt am Vortrieb nutzbar. Der Wetterstrom verlässt die Strecke über den freien Querschnitt. Über eine separate Entstaubungsanlage kann die Staubbelastung bereits an der Ortsbrust reduziert werden. Aus bergtechnischer Sicht bietet das System der blasenden Bewetterung deutliche Vorteile. Die frischen und kühlen Wetter können direkt an die Ortsbrust, den heißesten Bereich, gebracht werden. Aus Sicht des Strahlenschutzes hat diese Art der Sonderbewetterung aber einen entscheidenden Nachteil. Das Fassen und Reinigen des Volumenstromes im Ganzen ist nicht möglich. Die über den freien Querschnitt abströmenden Wetter können eine potenziell auftretende Kontaminationen über den gesamten Querschnitt und die angeschlossenen Grubenteile verteilen. Eine Vermeidung der Kontaminationsverschleppung wäre nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand möglich.

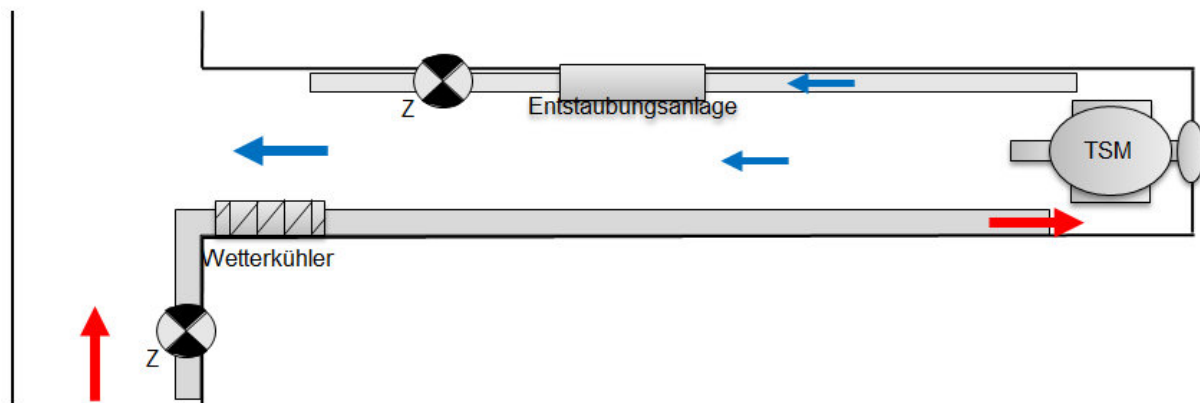


Abbildung 6-20: Schematische Darstellung einer blasenden Sonderbewetterung der Vortriebe inkl. Wetterkühler und Entstaubungsanlage

Bei der saugenden Bewetterung strömen die Wetter über den freien Querschnitt in die Strecke, werden an der Ortsbrust über die Lutte gesammelt und wieder zurückgeführt. Mit diesem System ist es möglich, den gesamten Abwetterstrom des Vortriebes inkl. Staubbelastung und möglicher Kontaminationen zufassen. Durch die Integration der Entstaubungs- und Filteranlage in die Sonderbewetterung muss der Lüfter einen deutlich größeren Druckunterschied erzeugen. Die Vermeidung einer Kontaminationsverschleppung ist dafür wesentlich einfacher umsetzbar. Eine messtechnische Überwachung des Abwetterstromes ist so ebenfalls verhältnismäßig einfach umzusetzen. Nachteil des Systems bildet die Erwärmung des Wetterstromes bei der Durchströmung der Vortriebsstrecke. Die Wetter besitzen beim Erreichen der Ortsbrust nur noch eine geminderte Kühlleistung.

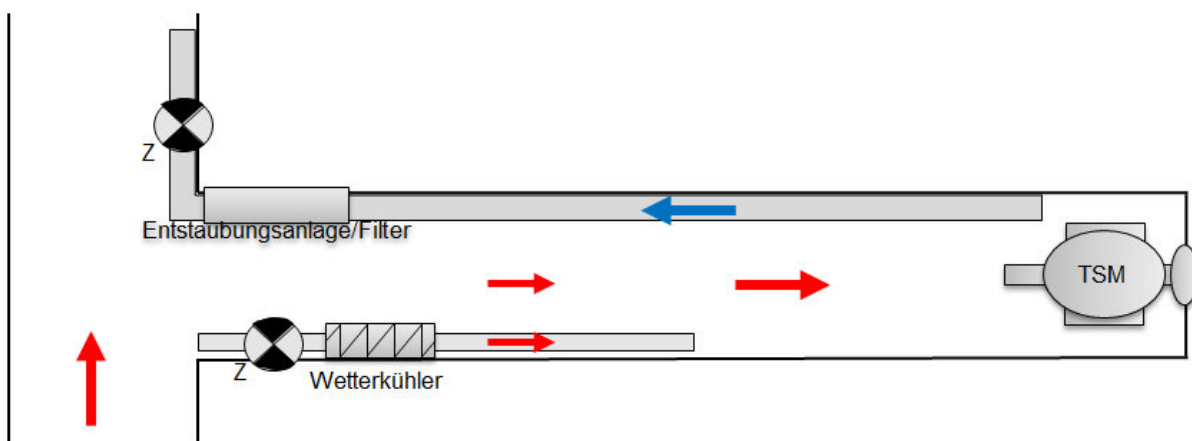


Abbildung 6-21: Schematische Darstellung einer saugenden Sonderbewetterung der Vortriebe in Kombination mit Wetterkühler und Entstaubungsanlage

Zur Vermeidung der Kontaminationsverschleppung sollte soweit technisch möglich bei den Auffahrungen im Kontrollbereich eine saugende Sonderbewetterung umgesetzt werden.

6.4.5.2 Heiße Modelle zur Auffahrung der Rückholungsstrecken

Die in Abschnitt 6.4 beschriebenen Modelle bilden neben der Auffahrung der Hauptstrecken auch die Rückholungstätigkeit in den Einlagerungsfeldern ab. Die Auffahrung der Hauptstrecken und Querschläge wurde bereits in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben.

Aus den Berechnungen und der Analyse der zu erwartenden Gebirgstemperatur ist zu erwarten, dass eine Auffahrung der Rückholungsstrecken unter sehr hohen Gebirgstemperaturen stattfinden müsste. Die Rückholung der Behälter beginnt im schachtnächsten Einlagerungsfeld, in der ersten Einlagerungsstrecke. An den Randstrecken der Einlagerungsfelder herrschen vergleichsweise moderate Temperaturen, da keine Temperaturüberlagerungen verschiedener Einlagerungsstrecken auftreten. Trotzdem steigt die Gebirgstemperatur während der Auffahrung, beginnend vom Querschlag, stetig an. Bereits im Abstand von 3 m zum ersten Behälter sind Stoßtemperaturen bis 87°C zu erwarten. An der Kontur der Teilstrecke würden direkt neben dem ersten Behälter Stoßtemperaturen bis 120°C auftreten. Die Stoßtemperatur um die nachfolgenden Behälter würde bei ca. 140°C liegen, vgl. dazu Abbildung 6-22. Auch in den Streckenabschnitten zwischen den Behältern treten am Stoß der Teilstrecke Temperaturen bis 120°C auf. Für alle weiteren Teilstrecken sind höhere Temperaturen zu erwarten. Die Temperaturen entlang der geplanten Streckenachse erreichen damit schnell mit konventioneller Technik nicht mehr beherrschbare Bereiche.

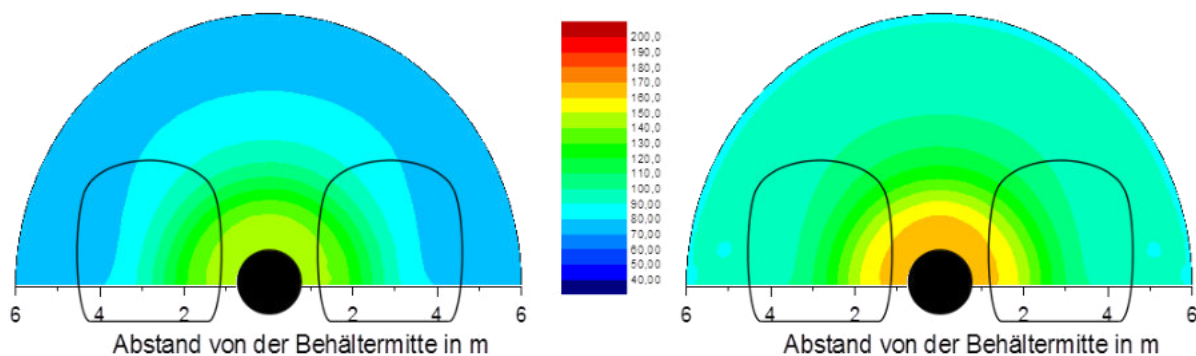


Abbildung 6-22: Temperaturfeld um die Behälter 12.1.1 (links) und 12.1.14 (rechts) im Modell b zum Beginn der Rückholung (43 Jahre nach Einlagerungsbeginn)

Die Wärmeabfuhr der Wetter führt nur langsam zu einer Abkühlung der Gebirgsbereiche. Innerhalb der angestrebten Kühlpause (eine Vortriebsschicht pro Tag) würde die Temperatur am Stoß knapp unter 80°C fallen. Im Bereich des ersten Behälters würde die Stoßtemperatur erst nach 4 Tagen Kühlung unter 60°C fallen. Die Kühlwirkung ins Gebirge ist ebenfalls deutlich eingeschränkt. Gebirgstemperaturen unter 80°C treten nach 5 Tagen Kühlung nur in einem Bereich bis 0,5 m von der Kontur entfernt auf, siehe Abbildung 6-23.

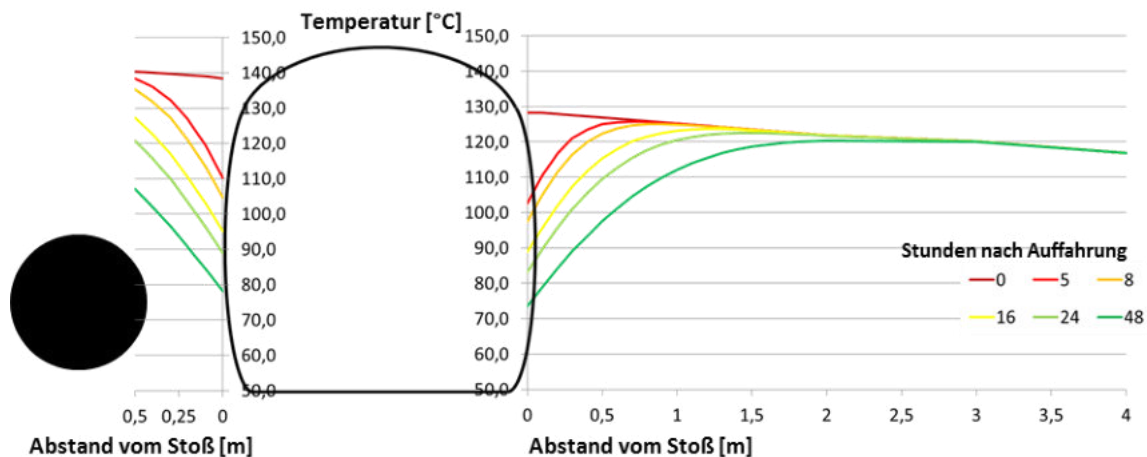


Abbildung 6-23: Theoretische Kühlwirkung der Wetter ins Gebirge hinein

Die theoretisch zulässige Vortriebslänge pro Schicht sinkt unter diesen Bedingungen deutlich, auf maximal 50% des aus den Kenndaten ermittelten Wertes. Zusätzlich sind dem Vortrieb zwei Wetterkühler mit insgesamt 460 kW Kühlleistung zugeordnet. Der Vortrieb der 250 m langen Teilstrecke würde unter diesen Bedingungen ca. 80 Tage dauern. Bereits in diesem frühen Stadium der Rückholung würde die Rückholungsgeschwindigkeit von dem Wärmeeintrag der Behälter deutlich beeinträchtigt. Die resultierenden Gebirgsmechanischen Bedingungen werden im Abschnitt 5 erläutert.

Die Umsetzung der Rückholung nur wenige Jahre nach der Einlagerung müsste in den Einlagerungsbereichen bei Gebirgstemperaturen zwischen 120°C und der Auslegungsgrenze erfolgen. Die erwarteten Bedingungen liegen damit deutlich über den im konventionellen Bergbau technisch/wirtschaftlich beherrschbaren Verhältnissen. Das Modell 1 erfährt allein aus dem Gebirge bereits einen Wärmeeintrag von ca. 4,5 MW und insgesamt einen fast doppelt so hohen Wärmeeintrag wie das vollständig entwickelte Endlagerbergwerk während der Einlagerung (vgl. Abbildung 6-24). Mit zunehmender Streckenanzahl, Auffahrungen nahe der Behälter und Rückholdungsdauer steigt dieser Wärmeeintrag weiter an.

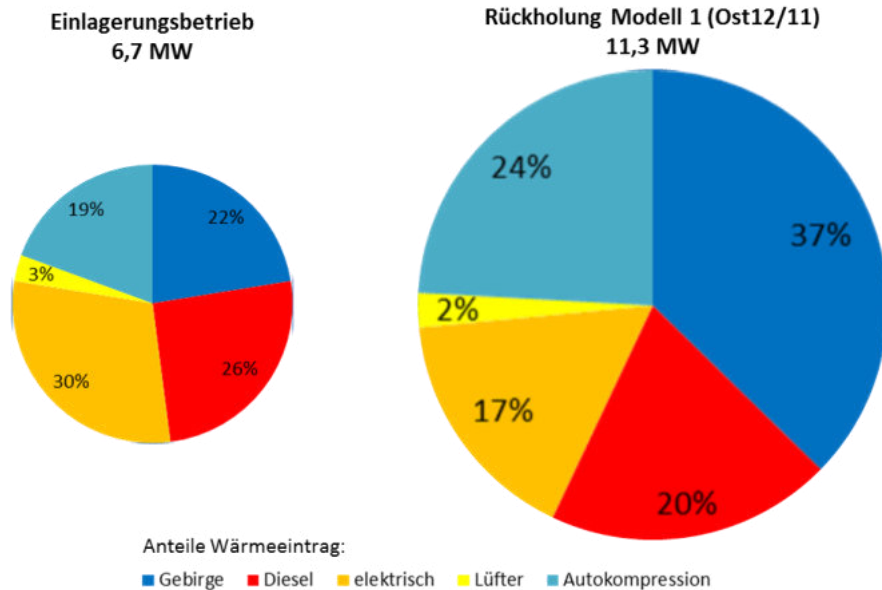


Abbildung 6-24: Vergleich des Gesamtwärmeeintrags während der Einlagerung und zum Zeitpunkt der Rückholung am schachtnahen Einlagerungsfeld (Modell 1)

Während die Auffahrung der Richtstrecken und Querschläge unter hohem technischem Aufwand noch möglich scheint, führen die hohen Auslegungstemperatur und die dichte Lagerung der Abfälle innerhalb der Einlagerungsfelder zu nicht mehr beherrschbaren Temperaturen. Ein Vortrieb der Teil- und Rückholungstrecken ist nur mit einen sehr hohen zusätzlichen Kühlaufwand und ausreichenden Kühlpausen und damit einem sehr geringen Auffahrungsfortschritt möglich. Die geringe theoretische Vortriebsgeschwindigkeit und ein durch die hohe Gebirgskonvergenz regelmäßig notwendiger Nachschnitt bringen die Neuauffahrung quasi zum Erliegen.

Die Kühlwirkung der Wetter aus den Hauptstrecken und Querschlägen heraus ist nicht ausreichend um die Temperatur in den Einlagerungsfeldern wirkungsvoll zu senken bzw. den Wärmeeintrag der Behälter vollständig abzuführen. Die Kühlwirkung der Wetter erfasst nur die konturnahen Bereiche um die Hauptstrecken bzw. um die Vortriebe. Auch die Erhöhung der Kühlleistung durch eine zusätzliche Kühlung des gesamten einziehenden Wetterstromes führt zu keiner wesentlichen Änderung dieser Situation. Abbildung 6-25 verdeutlicht beispielhaft die Kühleffekte im Gebirgsbereich um einen Querschlag. In dem Berechnungsbeispiel wird der Bereich um den nächsten Behälter (ca. 15 m von der Streckenkontur des Querschlags entfernt) gerade noch vom Kühleffekt erfasst. Der anhaltende Wärmeeintrag der Abfälle ist in diesem Beispiel nicht berücksichtigt. Die Temperatursenkung wird damit bereits überschätzt.

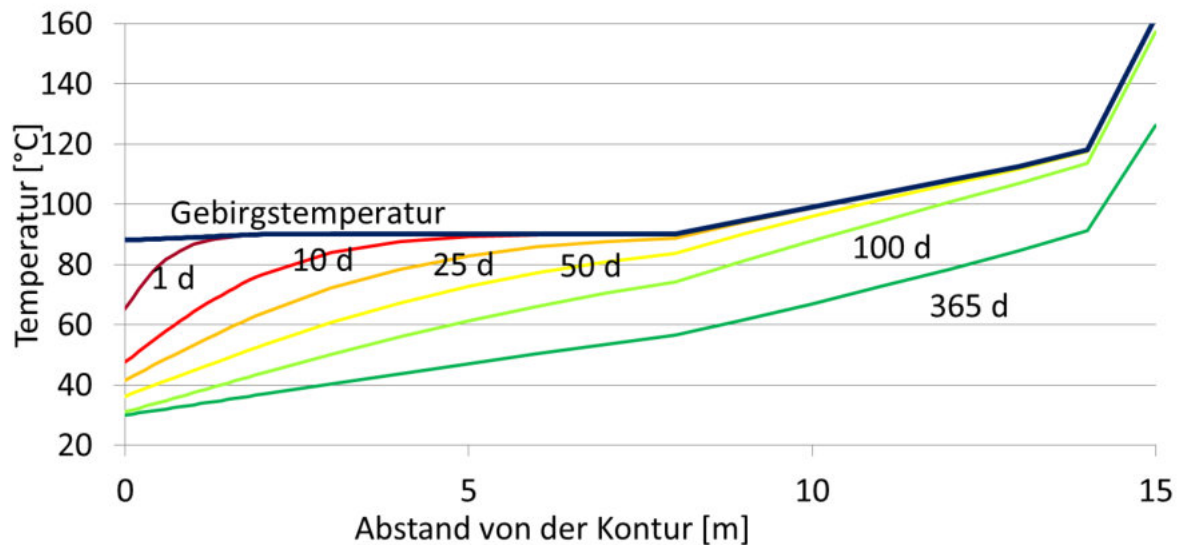


Abbildung 6-25: Kühlwirkung vom Querschlag in das umgebende Gebirge hinein

Eine vorausseilende Kühlung der Einlagerungsfelder ist unter diesen Randbedingungen nur über eine mehrmonatige Kühlphase und eine entsprechend verzögerte Auffahrung bzw. Rückholung möglich. Eine solche zusätzliche Kühlung der Einlagerungsfelder müsste direkt in diesen und möglichst nah an den Behältern erfolgen. Theoretisch möglich ist die Errichtung zusätzlicher Kühlbohrungen, mit denen der Wärmeinhalt des Gebirges über einen Kälte-träger abgeführt wird. Dies bedingt den Aufbau eines zweiten Kühlsystems, parallel zur Wetterkühlung. Die Kühlbohrungen könnten zur möglichst effizienten Kühlung des zukünftigen Auffahrungsbereichs in der Streckenachse der Teilstrecken liegen.

Die Kühlung jedes Einlagerungsfeldes bedarf eines großen zeitlichen Vorlaufs zur Rückholung. Die anfängliche starke Erwärmung und die anschließende lokal sehr starke Kühlung führen zu einer hohen geomechanischen Beanspruchung, genau in dem Gebirgsbereich, in dem auch die Rückholungstrecken zu errichten sind. Die Auffahrung wird durch die hohen Temperatur- und Spannungsgradienten aber auch die Kühlbohrungen selbst beeinträchtigt. Durch den anhaltenden Wärmeeintrag der Behälter führt eine evtl. notwendige Abschaltung des Kühlsystems vor der Auffahrung zu einer erneuten Erwärmung. Eine Auffahrung der Teil- und Rückholungstrecken innerhalb der Einlagerungsfelder hinein wäre weiterhin nur mit hohem Kühlaufwand möglich. Der Ansatz einer systematischen Kühlung direkt in den Einlagerungsfeldern wird für die Vertiefung der Rückholungskonzepte nicht weiterverfolgt.

6.5 Vergleichende Betrachtung Auslegungsoptimierung

Aufbauend auf der in Abschnitt 5.6 beschriebenen Optimierung sollen in den nachfolgenden Abschnitten weitere Konfigurationen der Endlagerauslegung identifiziert werden, bei denen in den Bereichen der Teilstreckenvortriebe möglichst günstige Umgebungsbedingungen im potenziellen Rückholungszeitraum geschaffen werden können.

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 des Gesamtsystems ist durch entsprechende Sicherheits- bzw. Konsequenzenanalysen auszuschließen. Solange eine Beeinträchtigung aber nicht stattfindet ist eine Abwägung der verschiedenen, sich teils entgegenstehenden Auslegungsanforderungen aber möglich. Genau dieser Ansatz wird in den nachfolgenden Abschnitten verfolgt. Eine veränderte Endlagerauslegung mit weniger strikter Einhaltung des Minimierungsgebotes soll eine mögliche Rückholung durch die Schaffung günstiger Umgebungsbedingungen im Rückholungszeitraum erlauben. Die damit einhergehende Beeinflussung des Endlagersystems soll aber zu keiner Beeinträchtigung führen.

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 mit zu berücksichtigen.

6.5.1 Mögliche Konfigurationen

Für die Optimierung der Endlagerauslegung wurden zunächst Vergleichsrechnungen mit variierender Beladung und variierendem Streckenabstand durchgeführt, siehe Abbildung 6-26 und Abschnitt 5.6. Mögliche Auswirkungen einer veränderten Zwischenlagerzeit werden, wie in Abschnitt 5.1.3 erläutert, nicht gesondert betrachtet. Die Vergleichsrechnungen verdeutlichen den klaren linearen Zusammenhang der Beladung und der Maximaltemperatur am Behälter, siehe Abbildung 6-26-links. Bei Streckenabständen größer 40 m findet keine Überlagerung der Temperaturfelder um einzelne Behälter herum statt. Die Temperatur am Behälter wird allein vom Wärmeeintrag der BE bestimmt. Bei voller Beladung des POLLUX®-10 Behälters ist eine Temperatur an der Behälteraußenkante von ca. 175°C zu erwarten. Für geringere Beladungen sinkt die Maximaltemperatur um ca. 10 K pro BE.

Überlagerungen der Temperaturfelder sind für Streckenabstände kleiner 40 m zu erwarten. Die Referenzauslegung mit POLLUX®-10-Behältern und 36 m Streckenabstand führt unter den getroffenen Annahmen zu einer maximalen Temperatur von ca. 185°C am Behälter. Für die vollbeladenen des POLLUX®-10 Behälter führen Streckenabstände kleiner 32 m zu Temperaturen größer 200°C am Behälter. Dies entspricht einer Verringerung der Streckenabstände gegenüber der Referenzauslegung nach (GRS, 2012) und begründet sich aus der

längeren Zwischenlagerzeit und damit verbundenen abnehmenden Wärmeleistung. Diese Anpassung der Endlagerauslegung hin zu einer dichteren Packung ist auch aus bergbaulicher Sicht möglich, entspricht aber nicht dem aktuellen Optimierungsziel. Der Mindestabstand der Rückholungsstrecken liegt bei 29 m von Streckenachse zu Streckenachse.

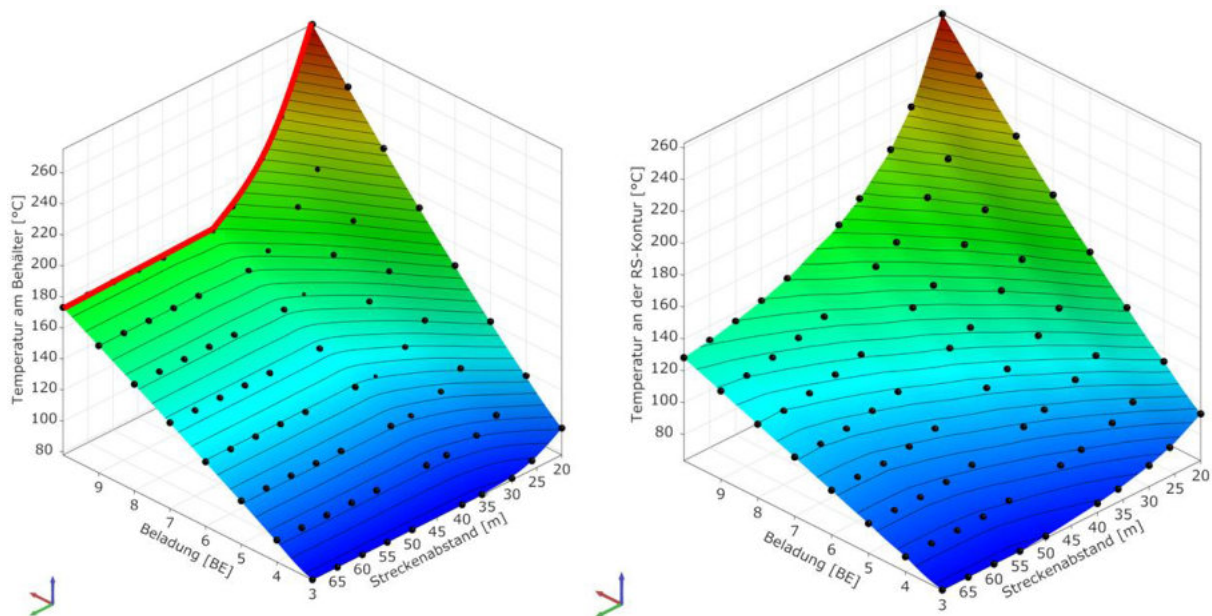


Abbildung 6-26: links: Temperatur am Behälter in Abhängigkeit der Beladung und des Streckenabstandes, rechts: Temperatur am Stoß der Teilstrecke in Abhängigkeit der Beladung und des Streckenabstandes

Für die Auslegungsoptimierung wird vorausgesetzt, dass die maximale Beladung von 10 BE je POLLUX[®]-Behälter beibehalten wird. Eine Optimierung der Umgebungsbedingungen während des potenziellen Rückholungszeitraumes ist damit nur über eine Variation des Streckenabstandes möglich. Mit größerem Streckenabstand verteilt sich der Wärmeeintrag aus den Behältern über einen größeren Gebirgsbereich und Temperaturfelder überlagern sich räumlich und zeitlich später. Beides führt zu einer geringeren Gebirgstemperatur, siehe Abbildung 6-26 rechts. In Abbildung 6-27 sind die Temperaturänderungen an der Behälteroberfläche des POLLUX[®]-10 und der Kontur einer Teilstrecke der Rückholungsstrecke in Abhängigkeit des Streckenabstandes dargestellt. Die Temperatur am Behälter verändert sich vergleichsweise wenig. Dem gegenüber sinkt die Temperatur am Stoß bereits bei Vergrößerungen des Streckenabstandes um wenige Meter sehr deutlich.

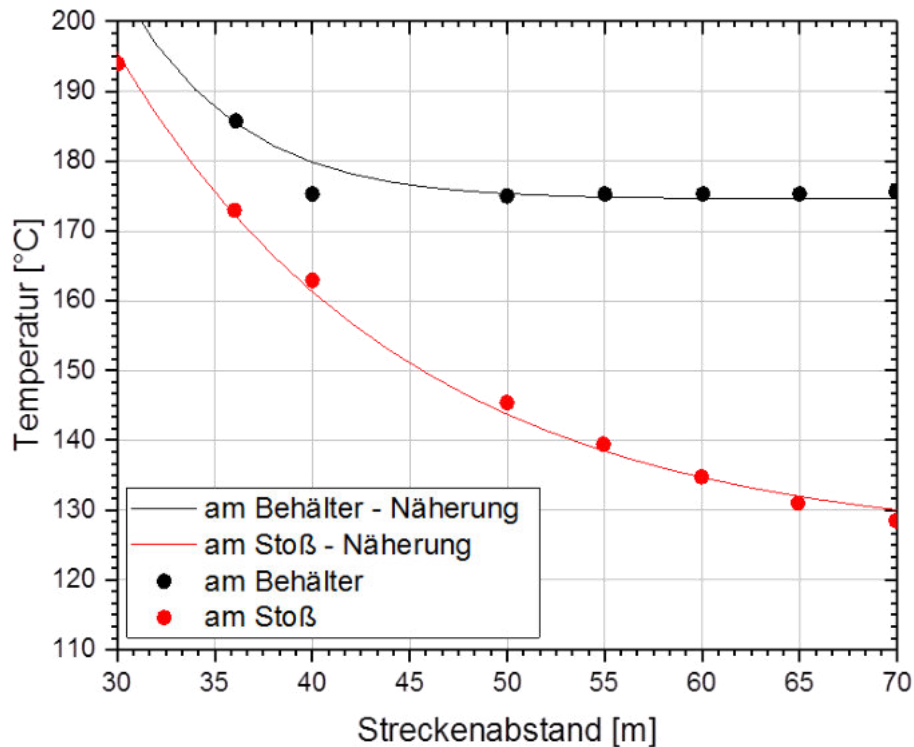


Abbildung 6-27: Temperatur am Behälter und am Stoß der Teilstrecke für eine Beladung mit 10 BE (DWR) und variierendem Streckenabstand

Vergleichend zur bisherigen Referenzauslegung werden drei weitere Konfigurationen mit den Streckenabständen 40 m, 44 m und 50 m vertiefend untersucht. Die Veränderung des Streckenabstandes wirkt sich besonders auf den Flächenbedarf des Endlagers, die geomechanischen Bedingungen während der Neuauffahrung sowie den Wetter- und Kühlbedarf während der potenziellen Rückholung aus. Die resultierenden Effekte auf die Langzeitsicherheit werden in diesem Vorhaben nicht untersucht.

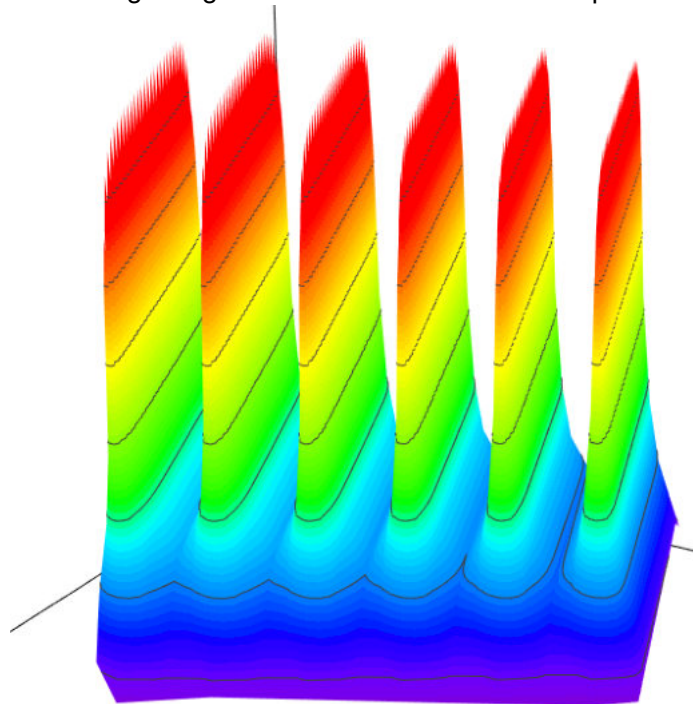
Der Flächenbedarf des Endlagers steigt mit größer werdendem Streckenabstand. Die Erhöhung des Streckenabstandes auf bis zu 50 m führt zu einer Zunahme der benötigten Gesamtfläche um bis zu 30%. Tabelle 6-2 fasst die Auswirkungen veränderter Streckenabstände auf die Feldgröße am Beispiel eines generischen Einlagerungsfeldes bestehend aus 10 Einlagerungsstrecken à 28 POLLUX®-10 Behälter zusammen.

Tabelle 6-2: Auswirkungen veränderter Streckenabstände auf die Feldgröße

Streckenabstand [m]	Breite Feld [m]	Länge Feld [m]	Fläche Feld [m ²]	Zusätzlicher Flächenbedarf je Feld	Spez. Flächenbedarf [m ² je BE (DWR)]
32	384	271,6	104.294,4	-9%	37,2
36	420	271,6	114.072,0	0 %	40,7
38	438	271,6	118.960,8	4%	42,5
40	456	271,6	123.849,6	9%	44,2
42	474	271,6	128.738,4	13%	46,0
44	492	271,6	133.627,2	17%	47,7
46	510	271,6	138.516,0	21%	49,5
48	528	271,6	143.404,8	26%	51,2
50	546	271,6	148.293,6	30%	53,0

6.5.2 Auswirkungen auf Bewetterung und Klimatisierung

Die erwarteten Umgebungsbedingungen im Rückholungsbergwerk unterscheiden sich deutlich von den Verhältnissen wie sie im konventionellen Bergbau angetroffen werden. Der künstliche Wärmeeintrag ins Gebirge führt zu den deutlich erhöhten Gebirgstemperaturen. Neben der Temperatur ist auch deren Verteilung deutlich anders. Die Gebirgstemperatur steigt im Allgemeinen mit zunehmender Teufe. Die Auffahrung neuer Strecken in tiefen Sohlen ist daher mit den größten Bewetterungs- und Kühlaufwand verbunden. Die Gebirgstemperatur auf einer Sohle ist annähernd konstant. Erst durch die Bewetterung kühlen die Gebirgsbereiche um die Strecken aus. Das Temperaturprofil des Endlagers bzw. des Rückholungsbergwerkes unterscheidet sich von diesem typischen Aufbau, siehe Abbildung 6-28. Die Einlagerungsfelder sind durch hohe Temperaturen in den Einlagerungsstrecken und steile



Gradienten gekennzeichnet. In diesen Bereichen konzentriert sich der Kühlaufwand. Im Abstand weniger Meter treten bereits deutlich geringere Umgebungstemperaturen auf. Diese räumliche Begrenzung des Wärmeeintrags erlaubt es lokal sehr hohe Temperaturen zu tolerieren.

Abbildung 6-28: Beispiel Feld Ost 12, VSG

Für die Bewertung der Auswirkungen auf Bewetterung und Klimatisierung werden zu den gewählten Endlagerkonfigurationen die Temperaturentwicklungen nach der Einlagerung und bis zu Rückholung berücksichtigt. Die Analyse der generischen Layouts berücksichtigt dabei immer die höchsten erwarteten Gebirgstemperaturen. Dies entspricht den ungünstigsten Umgebungsbedingungen. Tabelle 6-3 fasst die wesentlichen Temperaturen für die gewählten Konfigurationen zusammen.

Tabelle 6-3: Erwartete Temperaturen am Stoß und im Querschnitt der Teilstrecken für unterschiedliche Auslegungskonfigurationen

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

Die Einhaltung der KlimaBergV erfordert eine stetige Kühlung der Vortriebsstrecken. Zur Beherrschung der hohen auftretenden Gebirgstemperaturen sollen alle Vortriebe der Rückholungsstrecken blasend bewettert werden. Grundsätzlich können in der Sonderbewetterung, an der TSM und in der bereits errichteten Strecke zusätzliche Kühler eingebaut werden.

Der genaue Kühlaufwand wird von den Umgebungsbedingungen und den erreichbaren Vortriebsleistungen bestimmt. Die Umsetzung der Rückholbarkeit wird nicht über wirtschaftliche Gesichtspunkte sondern rein über eine technische Umsetzbarkeit mit mehr oder weniger plausiblen Aufwand definiert. Zur Bewertung der technischen Machbarkeit wird die theoretisch erreichbare Vortriebsgeschwindigkeit als wesentliches Bewertungskriterium herangezogen. Ziel ist es unter den gegebenen Umgebungsbedingungen einen stetigen Auffahrungsfortschritt zu ermöglichen. Dafür müssen alle notwendigen Nebenarbeiten zur Gewährleistung günstiger Umgebungsbedingungen mit berücksichtigt werden. Neben der zu installierenden Kühlleistung ist auch ein möglicher Nachschnitt zu beachten. Für die Auffahrung einer Teilstrecken muss ohne stetige Unterbrechungen durch Nachschnitarbeiten erfolgen. Die dafür erforderliche Vortriebsleistung wird beeinflusst durch:

- die Konvergenzrate, wesentlich beschleunigt durch die herrschenden Gebirgstemperaturen
- die maximal tolerierbare Querschnittsreduzierung durch die Konvergenz
- die Schneidleistung der eingesetzten Teilschnittmaschine
- der Vortriebsdauer je Tag

Die Auslegungskonfiguration mit 36 m Streckenabstand entspricht der Endlagerauslegung aus (GRS, 2012). Durch die, wie bereits erläutert, angepasste Zwischenlagerzeit werden in den aktuellen Berechnungen aber um 15 K geringere Maximaltemperaturen erwartet. Die Forderung einer schnellen Auffahrung ohne Nachschnitt ist für die Konfiguration mit 36 m

Streckenabstand und der vorgesehenen Leistungsklasse der TSM nicht erfüllbar. Die Temperaturen unterscheiden sich nur gering von den in Abschnitt 6.4.5 beschriebenen Umgebungsbedingungen. 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. Abbildung 6-29 zeigt die theoretischen Temperaturverläufe bei unterschiedlichen Vortriebsleistungen pro Schicht und damit unterschiedlichen Kühlzeiten.

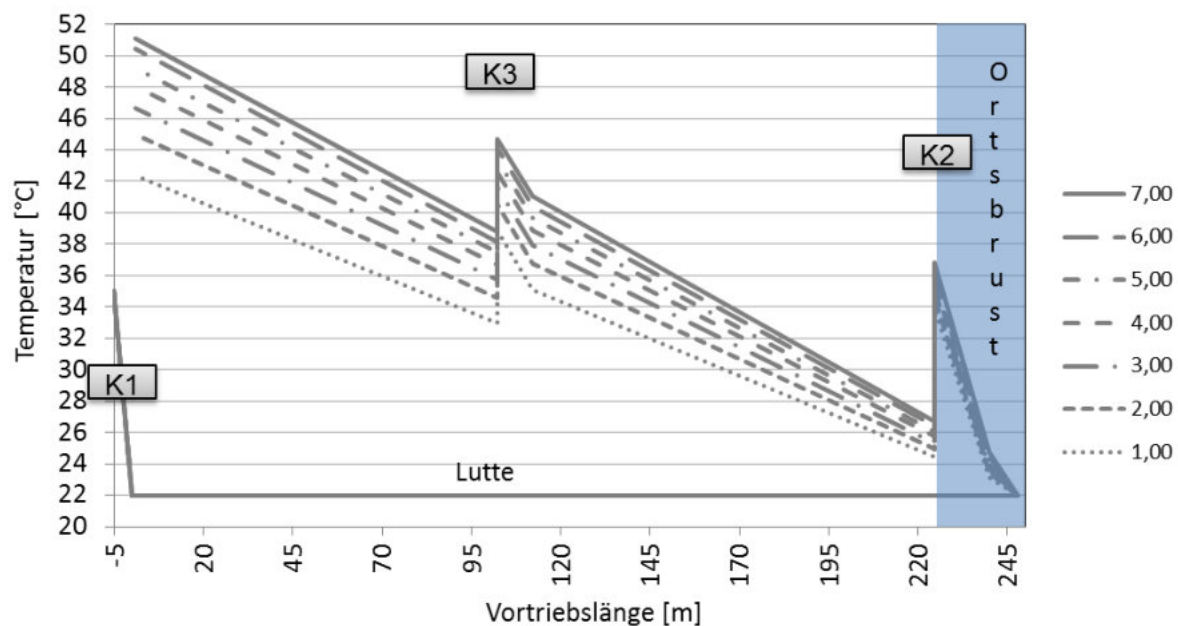


Abbildung 6-29: Temperaturverlauf im Vortrieb bei 36 m Streckenabstand

Mit größer werdendem Streckenabstand sinken die Temperaturen und Konvergenzraten. Zwar sind im Bereich der Rückholungsstrecke immer noch sehr ungünstige Temperaturen zu erwarten. Eine Auffahrung wird aber unter sehr hohem technischem Aufwand möglich. Abbildung 6-30 bis Abbildung 6-32 zeigt die erwarteten Temperaturverläufe in den Vortrieben bei Streckenabständen von 40 m, 44 m und 50 m. Der theoretische Kühlaufwand in den Vortrieben sinkt stetig. Gleichzeitig sinkt die notwendige Vortriebsgeschwindigkeit zur Vermeidung eines Nachschnittes und es stehen ausreichende Kühlzeiten zur Verfügung. Die benötigte Kühlleistung ist in Tabelle 6-4 zusammengefasst.

Tabelle 6-4: Übersicht Kühlleistung je Vortrieb

Konfiguration	Mittlere Temperatur [°C]	Kühlleistung Gesamt [kW]	Anzahl Kühler
10-36	150	420	3
10-40	140	370	2
10-44	129	345	2
10-50	122	300	1

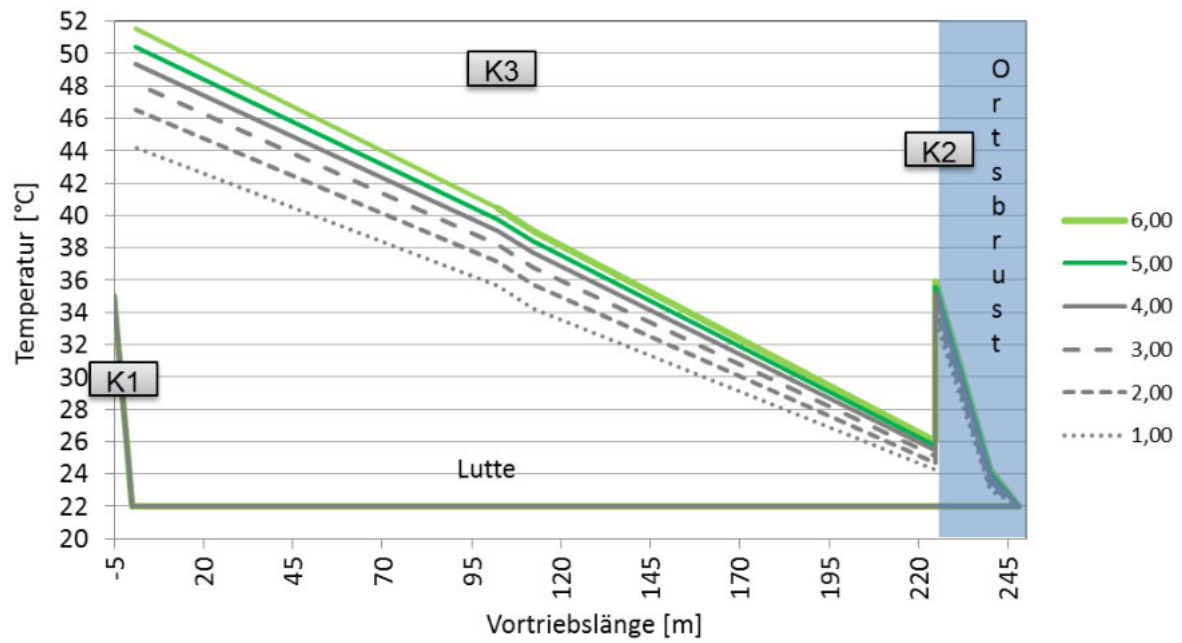


Abbildung 6-30: Temperaturverlauf im Vortrieb mit 40 m Streckenabstand

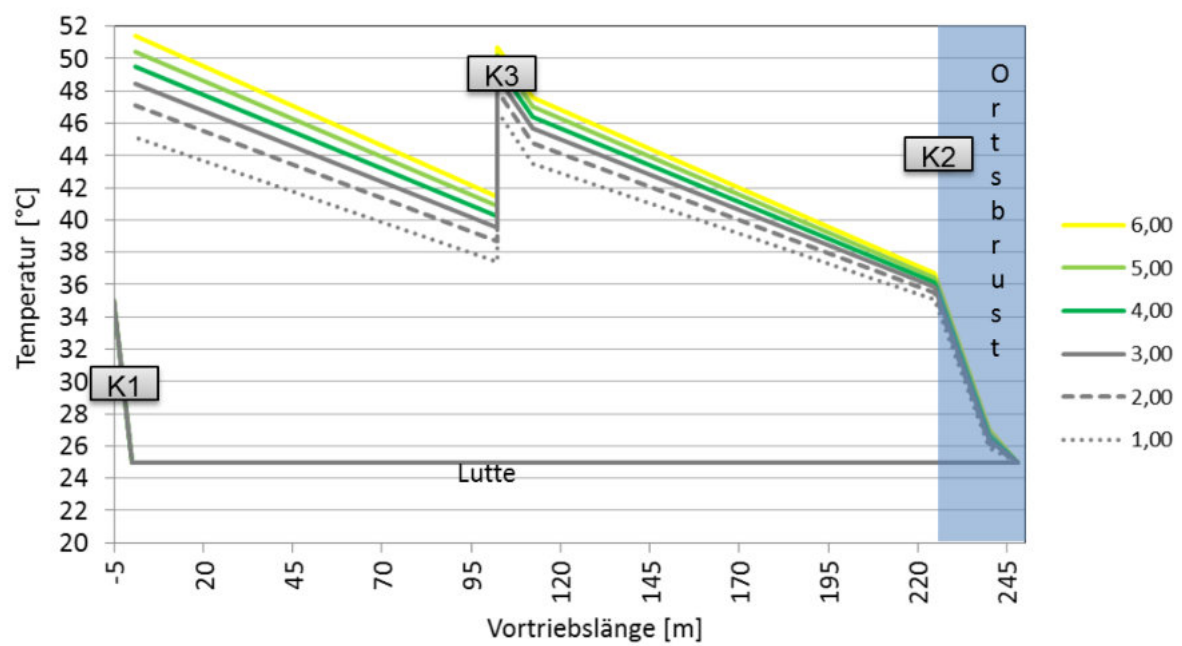


Abbildung 6-31: Temperaturverlauf im Vortrieb mit 44 m Streckenabstand

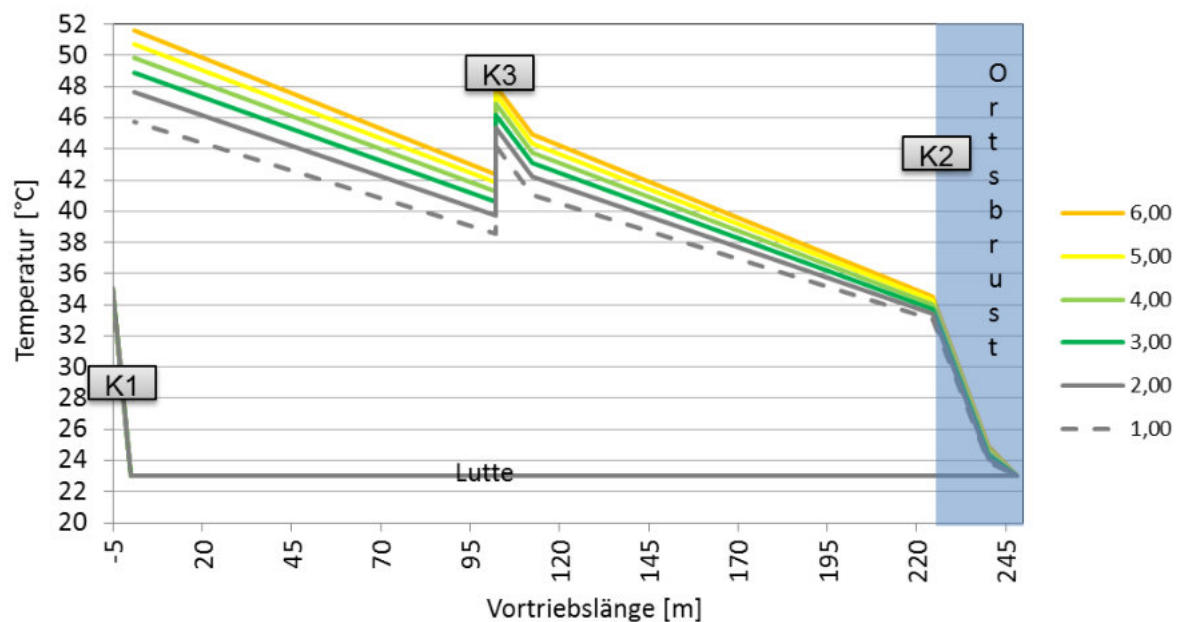


Abbildung 6-32: Temperaturverlauf im Vortrieb mit 50 m Streckenabstand

Die Umgebungsbedingungen der gewählten Auslegungskonfigurationen wurden zusätzlich auf das Teilmodell 2 (vgl. Abschnitt 6.4.3) zur Rückholung im Bereich der beiden schachtnahen Einlagerungsfelder übertragen. Um eine Vergleichbarkeit mit dem Modell 2 zu ermöglichen wurden Größe und Lage des Infrastrukturbereichs sowie der südlichen Richtstrecke übernommen. In den Einlagerungsfeldern wurden je zehn Einlagerungsstrecken mit je 28 POLLUX[®]-Behälter mit entsprechendem Abstand zu einander angeordnet. Zwischen den vier Vergleichsmodellen (siehe Abbildung 6-33) variiert 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 folgende Verbraucher zugeordnet:

- zwei Hauptstreckenvortriebe mit einer TSM (300 kW), einem Lader (50 kW) und einer Bandanlage (350 W/m)
- zwei Teilstreckenvortriebe mit einer TSM (300 kW), einem Lader (50 kW)
- eine Lokomotive (25 kW)
- eine modifizierte Einlagerungsvorrichtung (25 kW)

Das Wetternetz und der verwendete Hauptgrubenlüfter sind in allen Teilmodellen gleich. Im Gegensatz zum Teilmodell 2 (Abschnitt 6.4.3) werden keine Verbraucher mit Verbrennungsmotoren berücksichtigt.

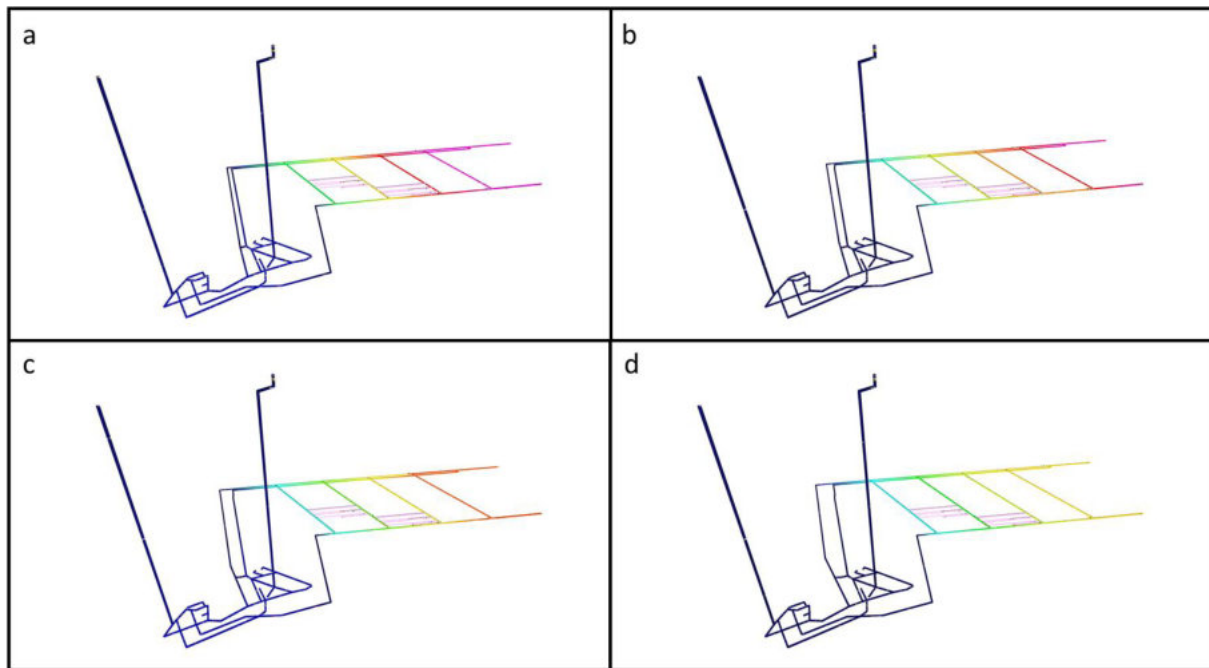


Abbildung 6-33: Generische Modelle der gewählten Konfigurationen mit Gebrigtstemperatur zu Beginn der Rückholung

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

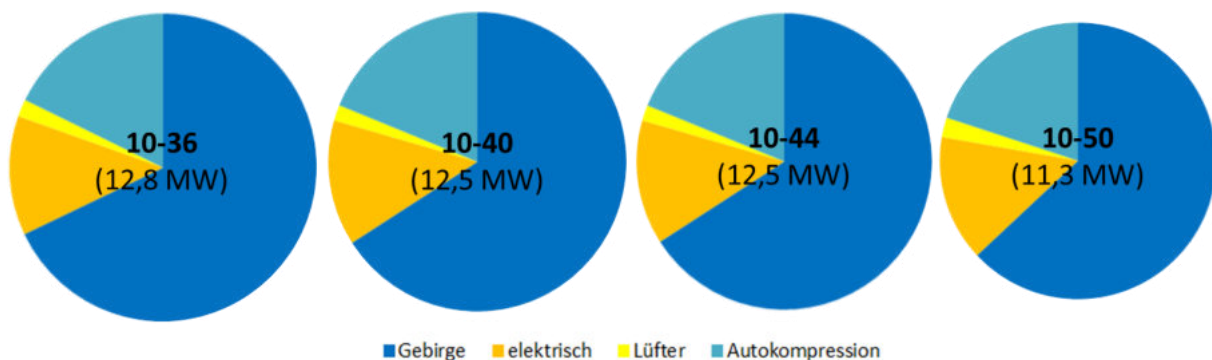


Abbildung 6-34: Gesamtenergiebilanz im Vergleich

Zur Einhaltung der Grenztemperaturen ist in allen Teilmodellen eine zusätzliche Kühlung notwendig. Der Kühlbedarf liegt zwischen 2700 kW (36 m Streckenabstand) und 1600 kW (50 m Streckenabstand).

6.6 Vorsorgliche Grenztemperatur nach StandAG

Aufbauend auf der in Abschnitt 5.6 beschriebenen Optimierung sollen im vorliegenden Abschnitt die Auswirkungen des vorläufigen Temperaturkriteriums von 100°C gemäß §27 (4) StandAG untersucht werden:

"Solange die maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt worden sind, wird aus Vorsorgegründen von einer Grenztemperatur von 100 Grad Celsius an der Außenfläche der Behälter ausgegangen."

6.6.1 Mögliche Konfigurationen

Für die Optimierung der Endlagerauslegung werden in diesem Vorhaben eine Variation des Abstandes zwischen den Einlagerungstrecken und eine Variation der Behälterbeladung berücksichtigt. Die Einhaltung der Grenztemperatur von 100°C ist für das Einlagerungskonzept der horizontalen Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern nur durch eine verringerte Beladung möglich. Die Wärmeleistung eines vollbeladenen POLLUX®-10 Behälters führt unter gegebenen Randbedingungen zu Temperaturen an der Behälteraußenseite von mindestens 175°C.

Ausgehend vom bisherigen Streckenabstand von 36 m wäre zur Einhaltung des vorläufigen Temperaturkriteriums von 100°C eine Beladung von maximal 4,5 BE (DWR) möglich, siehe Abbildung 6-35 links. Bei dieser theoretischen Konfiguration sind nur noch geringe Überlagerungen der Temperaturfelder aus den Einlagerungstrecken festzustellen. Eine weitere Entzerrung der Temperaturfelder durch eine Vergrößerung der Streckenabstände erlaubt keine signifikante Steigerung der theoretisch möglichen Beladung. Für Streckenabstände größer 40 m wird die Grenztemperatur von 100°C bei einer Beladung von 4,6 BE (DWR) erreicht. Für Streckenabstände kleiner 40 m sinkt die theoretische Beladung weiter ab.

Eine reduzierte Behälterbeladung von maximal 4,5 BE (DWR) würde zu mehr als einer Verdopplung der benötigten Endlagerbehälter führen und auch zu mehr als einer Verdopplung der Endlagerfläche bedeuten. Ein Einlagerungsfeld mit der Auslegungskonfiguration "vollbeladener POLLUX®-10 und 36 m Streckenabstand" weist bei 10 Einlagerungstrecken mit je 28 Behältern einen Flächenbedarf von ca. 114.100 m² auf oder ca. 41 m² je BE. Für die Auslegungskonfiguration mit reduzierter Beladung ("4,5 BE je POLLUX® und 36 m Streckenabstand") würde sich dieser spezifische Flächenbedarf ca. 91 m² je BE erhöhen, siehe Tabelle 6-5.

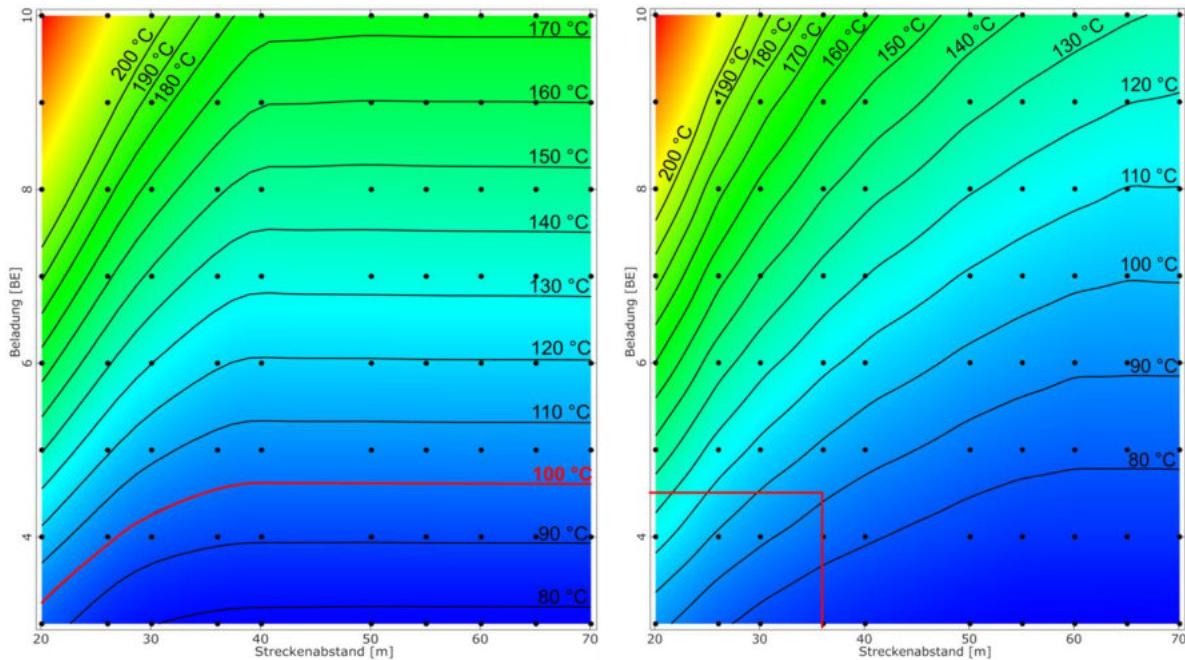


Abbildung 6-35: links: Temperatur an der Behälteroberfläche (OK) in Abhängigkeit der Beladung und des Streckenabstandes, rechts: Gebirgstemperatur am behälternahen Stoß der Teilstrecken, rot markiert: Temperatur bei der gewählten Auslegungskonfiguration 4,5 BE- 36 m Streckenabstand

Tabelle 6-5: Übersicht

Streckenabstand [m]	Beladung [BE]	Fläche Einlagerungsfeld* [m ²]	Fläche je BE [m ² /BE]	Abweichung zur Referenz [%]
36	10	114.072	40,7	
29	4,2	96.961	82,6	+ 103%
36	4,5	114.072	90,7	+ 123%
40	4,6	123.850	96,8	+ 138%
45	4,6	136.072	105,3	+ 159%

* - 10 Strecken mit je 28 Behältern

Der aus geomechanisch/bergbaulichen Zwängen einzuhaltende Mindestabstand zwischen zwei Einlagerungsstrecken kann ebenfalls zur Bestimmung einer Endlagerkonfiguration genutzt werden. Zwischen den Strecken muss, nach üblicher Faustformel, eine Pfeilerbreite von mindestens der doppelten Streckenbreite bestehen bleiben. Bei einer Breite der Rückholungsstrecke von maximal 9,7 m muss der Pfeiler somit 19,4 m breit sein. Der Streckenabstand (von Achse zu Achse) muss dann mindestens 29,1 m betragen. Dies entspricht einer theoretisch möglichen Beladung von 4,2 BE (DWR). Der spezifische Flächenbedarf ist bei dieser Konfiguration ("4,2 BE je POLLUX[®] und 29 m Streckenabstand) 103 % größer als die Referenz des vollbeladenen Behälters und liegt bei ca. 83 m² je BE. Der zeitliche und (berg-)technische Aufwand zur Neuauffahrung und Rückholung beider beschriebener Konfigurationen würde ebenfalls deutlich steigen.

Für den Vergleich zur Endlagerauslegung in (GRS, 2012) und den Optimierungsansätzen in Abschnitt 6.5 wird eine Auslegungskonfiguration "4,5 BE je POLLUX[®] und 36 m Streckenabstand" gewählt.

6.6.2 Auswirkungen auf Bewetterung und Klimatisierung

In diesem Abschnitt sollen die Effekte der reduzierten Auslegungstemperatur auf den Rückholungsvorgang und im speziellen auf die Wetter- und Klimatechnik dargestellt werden. Die geomechanischen Auswirkungen sind in Abschnitt 5.6.2 beschrieben.

Für die gewählte Auslegungskonfiguration (4,5 BE je POLLUX[®] und 36 m Streckenabstand) sind am behälterzugewandten Stoß der Teilstrecken zur Rückholung Gebirgstemperaturen von bis zu 92°C zu erwarten, siehe Abbildung 6-35. Innerhalb des Querschnitts der Teilstrecke liegt eine mittlere Gebirgstemperatur von bis zu 84°C nach 30 Jahren Einlagerungsdauer vor. Es wird angenommen, dass diese Temperatur über die gesamte Vortriebslänge konstant bleibt. Temperaturänderungen zwischen den Behältern und um die ersten und letzten Behälter werden nicht berücksichtigt.

Durch den reduzierten Wärmeeintrag ins Gebirge sind auch in den Zugangsstrecken zu den Einlagerungsfeldern geringere Gebirgstemperaturen zu erwarten. Für die Konzeption der Vortriebsstrecken wird angenommen, dass um alle Richtstrecken und Querschlägen maximal 72°C Gebirgstemperatur herrschen. Entsprechend des gewählten Bewetterungskonzeptes und der weiteren Wärmequellen wird für die Querschläge eine Wettertemperatur von 30°C als Starttemperatur für die Sonderbewetterung definiert.

In Behälternähe liegt die erwartete Gebirgstemperatur innerhalb des Streckenquerschnitts der Teilstrecke im Mittel bei 84°C, vgl. Abbildung 6-36. Der dem Behälter abgewandte Stoß wird bis auf 79°C erwärmt. Am dem Behälter zugewandten Stoß steigt die Temperatur mit zunehmender Einlagerungsdauer über 90°C. Dieser Stoß liegt innerhalb der versetzten Einlagerungsstrecke. Die Temperaturentwicklung in diesem Bereich wird von der Salzgruskompaktion beeinflusst. Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Salzgruses sind geringer als im unverritzten Gebirge und außerdem von der Porosität abhängig. Als Folge des behinderten Wärmeabflusses innerhalb des Salzgrusversatzes steigt die Temperatur zunächst sehr schnell an. Es bildet sich ein erstes Temperaturmaximum. Mit fortschreitender Salzgruskompaktion und damit verbessertem Wärmeabfluss steigt die Temperatur deutlich langsamer.

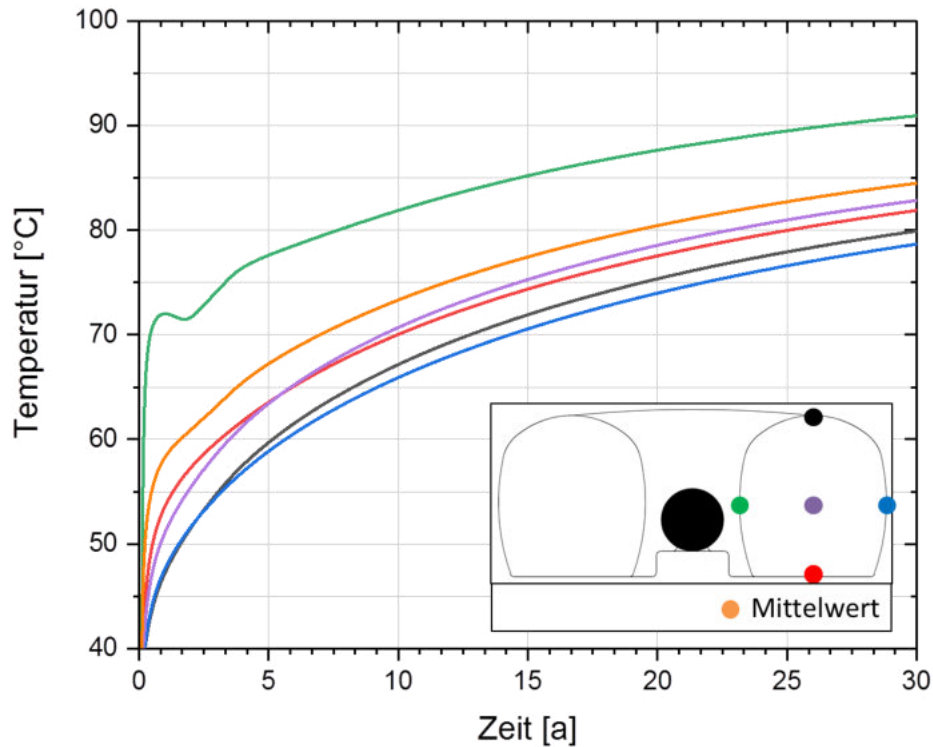


Abbildung 6-36: Temperaturentwicklung an einer Teilstrecke der Rückholungsstrecke nach der Einlagerung und dem Versatz

Die Sonderbewetterung soll blasend erfolgen. Ohne eine zusätzliche Kühlung würde die zulässige Höchsttemperatur nach KlimaBergV innerhalb der Vortriebsstrecke überschritten. Der einziehende Wetterstrom soll daher in der Luttenleitung auf eine Temperatur von 25°C heruntergekühlt werden. Bei dem veranschlagten Massenstrom von ca. 24 kg/s wird dafür eine Kühlleistung von wenigstens 125 kW benötigt. Diese Kühlleistung soll von einem Kühler innerhalb der Luttenleitung erzeugt werden, siehe Abbildung 6-37.

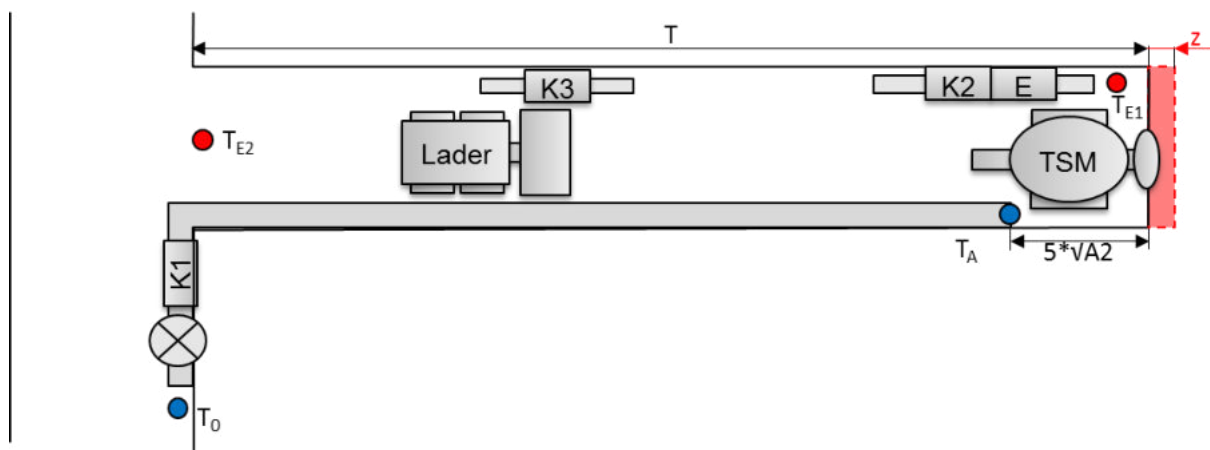


Abbildung 6-37: Aufbau Sonderbewetterung im Vortrieb der Teilstrecken

Die theoretische Vortriebsleistung der TSM liegt bei maximal 7 m pro Schicht. Die Vortriebs-
technik besteht aus einer kleinen TSM (200 kW) und einem Elektrolader (50 kW). Durch eine

Reduzierung der Vortriebsleistung kann die Kühldauer erhöht und damit die Klimabedingungen in der Strecke verbessert werden. Wie bereits im Abschnitt 6.5 erläutert, darf die Vortriebsleistung aber nicht zu gering sein, da sonst Nebenarbeiten wie beispielsweise Nachschnitte den Vortrieb zu erliegen bringen. Mit den erwarteten Konvergenzraten wird diese Anforderung aber bereits ab einer Vortriebsleistung von von mehr als 1 m erfüllt, siehe Abbildung 6-38. Mit der beschriebenen Sonderbewetterung und Kühlung können die Grenzwerte im Vortrieb eingehalten werden. Durch die Begrenzung der Vortriebsarbeiten auf eine Arbeitsschicht pro Tag steht der Rest des Tages als Kühlzeit zur Verfügung. Dadurch kann das Gebirge zumindest an der Oberfläche bis unter 60°C abkühlen, siehe Abbildung 6-39.

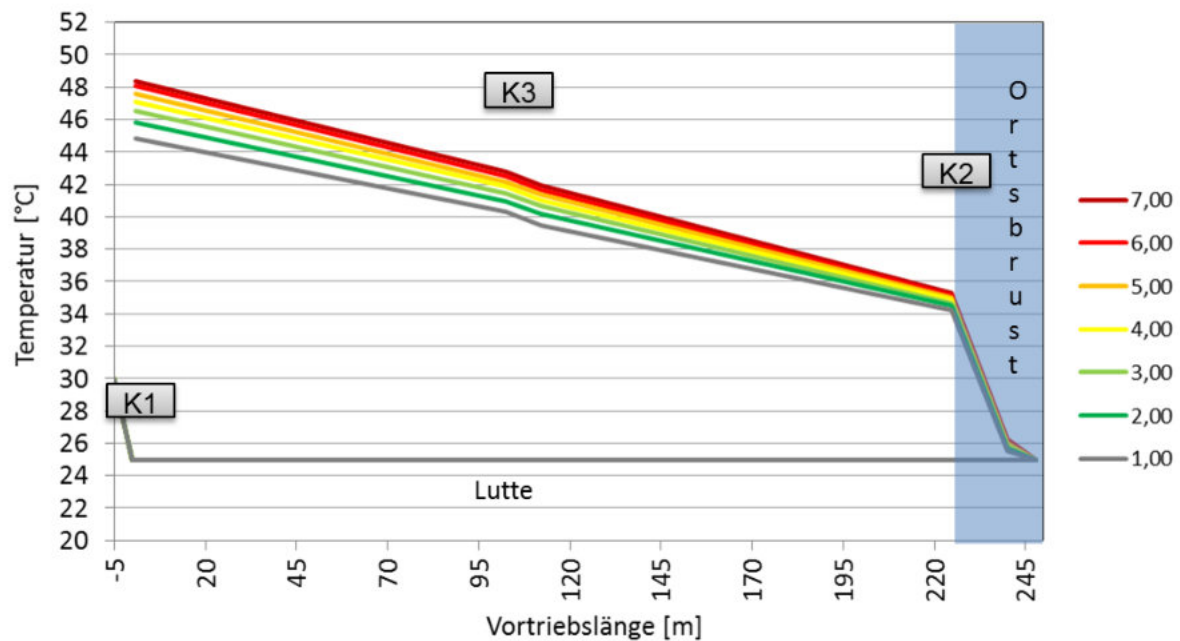


Abbildung 6-38: Erwarteter Temperaturverlauf innerhalb des Vortriebs der Teilstrecke

Aus der Vortriebsstrecke findet eine Kühlung des Nahbereiches statt...

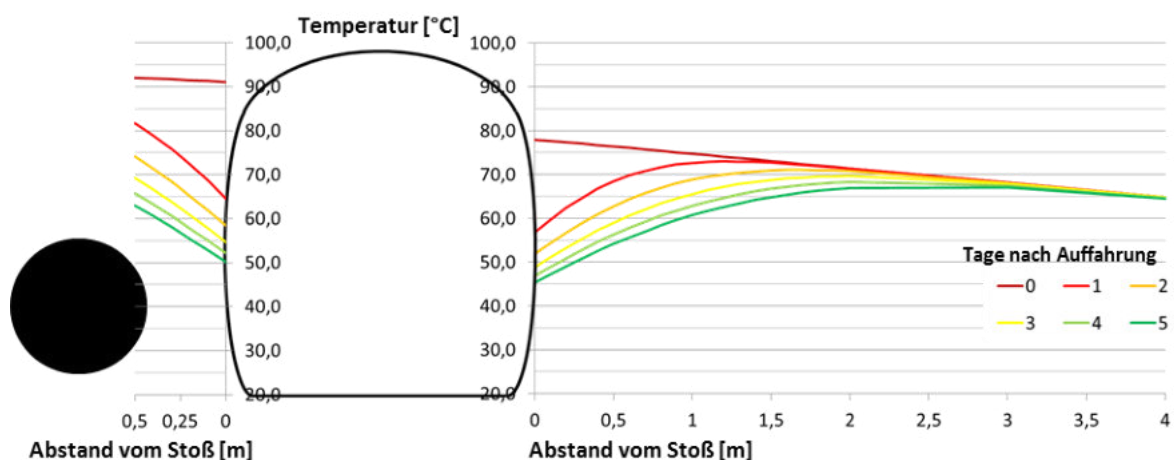


Abbildung 6-39: Kühlwirkung der Wetter an der Ortsbrust

Zur Bestimmung des Gesamtwärmeeintrags wurde ein generisches Endlagermodell erstellt, siehe Abbildung 6-40. Wie bereits in den vorangegangenen Abschnitten erläutert repräsentiert dieses Modell die Rückholungstätigkeit in den beiden schachtnahen Einlagerungsfeldern. Im Vergleich zu Abschnitt 6.4.5 und 6.5 treten unter Einhaltung des vorläufigen Temperaturkriteriums deutlich moderatere Umgebungsbedingungen auf. Trotzdem ist hervorzuheben, dass Gebirgstemperaturen bis 84°C die im konventionellen Gewinnungsbergbau üblichen Temperaturbedingungen deutlich übersteigen. Die Gesamtwärmemenge ist rund ein Drittel geringer als in den Varianten mit deutlich höheren Auslegungstemperaturen. Eine zusätzliche Kühlung aller Vortriebe bleibt aber unerlässlich. Der Kühlaufwand reduziert sich auf 1000 kW.

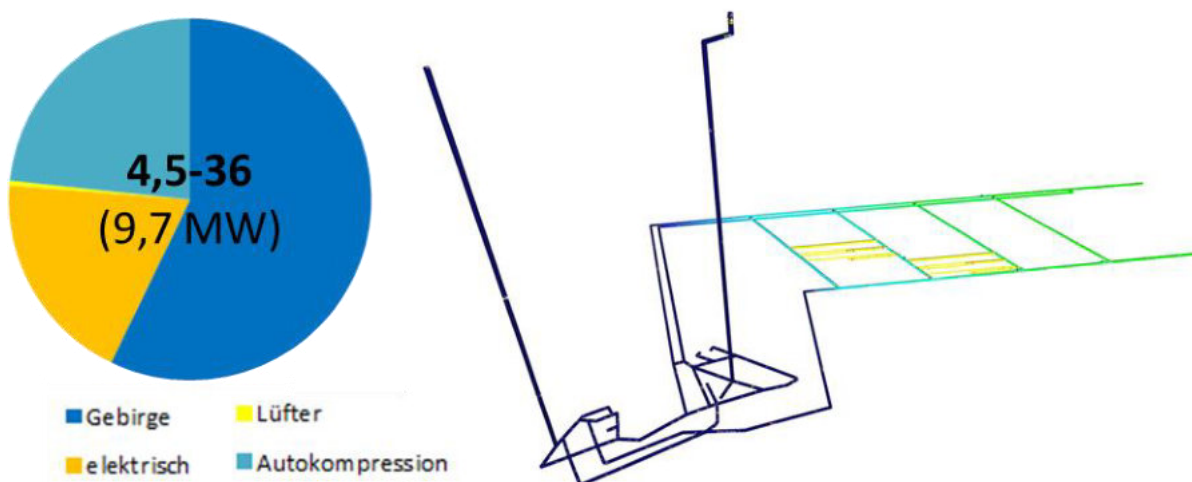


Abbildung 6-40: Gesamtwärmebilanz (links) und generisches Modell (rechts)

6.7 Erkenntnisse aus der Klimavorausberechnung

Zur Abschätzung der Umgebungsbedingungen während der Rückholung wurden im ersten Schritt die thermische Endlagerauslegung aus (GRS, 2012) analysiert. In (GRS, 2012) erfolgte beispielhaft eine vollständige Endlagerauslegung mit dem Ziel einer möglichst dichten Lagerung der Behälter. Die Analyse der Temperaturentwicklung im Endlager zeigt deutlich veränderte Temperaturbedingungen nach der Einlagerung. Der Wärmeeintrag der Abfälle führt zunächst zu einer behälternahen Erwärmung. Die Temperaturen um die Behälter und innerhalb der Einlagerungsfelder erreichen innerhalb weniger Jahre die Auslegungsgrenze. Die Temperaturverteilung im Umfeld der Einlagerungsbereiche variiert räumlich sehr stark. Entlang der Streckenachsen der Hauptstrecken und Querschläge sind heiße Bereiche auf kurze bis auf wenige 100 m Ausdehnung begrenzt. Die Temperaturspitzen treten jeweils an den Stellen mit minimalem Abstand zu den Behältern auf.

Trotz deutlich erhöhter Temperaturen wird die Auffahrung der Hauptstrecken und Querschläge als gerade noch technisch möglich eingeschätzt. Für alle Vortriebe sind zusätzliche technische Kühlmaßnahmen vorzuhalten. Über die Offenstandszeiten 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 Behälter vollständig abzuführen.

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

Zur Erleichterung der Rückholbarkeit erfolgte im Weiteren eine Optimierung der Endlagerauslegung mit dem Ziel der Schaffung möglichst rückholungsfreundlicher Umgebungsbedingungen. Dies beinhaltet im Bereich der Teilstreckenvortriebe Temperaturbedingungen zu schaffen, die den bergbaulichen Schutzziele und den Anforderungen eines sicheren Betriebs des Rückholungsbergwerks genügen. Mögliche Maßnahmen der Endlageroptimierung sind die Anpassung der Behälterbeladung, der Behälter- und Streckenabstände. Entsprechend der Neuregelung des StandAG ist gegenüber den Randbedingungen in (GRS, 2012) eine verzögerte 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 eine rückholungsfreundliche Auslegung ebenfalls.

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 der 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 wird 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 zu zeigen.

Im Rahmen der durchgeführten Auslegungsoptimierung wurde gezeigt, dass die Schaffung günstigerer Umgebungsbedingungen 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 den wetter- und kühltechnischen Aspekt sind auch deutlich günstigere geomechanische Bedingungen zu erwarten. Die Einhaltung der nach § 27 (4) StandAG geforderten vorläufigen Auslegungstemperatur von 100°C 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 von der letztlich gewählten Endlagerkonfiguration treten im angedachten Rückholungszeitraum immer noch 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 Streckenkühlern wenig effektiv. Für das Rückholungsbergwerk sollte eine zentrale "Kälterzeugung" mit entsprechender Verteilung in die zu kühlenden Bereiche umgesetzt werden. Zusätzlich zur Kühlung sind auch die eingesetzten Maschinen in ihrer Auslegung an die heißen Umgebungsbedingungen anzupassen. Zur Schutz des Personals sind alle Maschinen mit klimatisierten Kabinen auszustatten. Auch in der Grube sollten klimatisierte Räume geschaffen werden. Zusätzlich sollten Arbeitsabläufe während der Rückholung soweit wie möglich automatisiert werden, um den Aufenthalt des Personals in den heißen Bereichen zu minimieren. Für die Haupttätigkeiten – Lösen, laden, Fördern – ist dies bereits heute Stand der Technik. Zusätzliche Herausforderungen werden aber für die Umsetzung weiterer Nebentätigkeiten, wie die Errichtung und den Betrieb der Infrastruktur für Versorgungsmedien (Luft, Kälte, Strom) erwartet.

7 Umgang mit Brennelementstrukturteilen

Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wird stets unterstellt, dass alle Behälter im Einlagerungsbereich der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente entfernt werden. Dies schließt auch Behälter für die Brennelementstrukturteile mit ein. Im bisherigen Einlagerungskonzept findet die Rückholbarkeit der MOSAIK®-Behälter keine Berücksichtigung. Durch eine Analyse der notwendigen Teilschritte zur Rückholung soll ein Rückholungskonzept und ein rückholbares Einlagerungskonzept für diese Behälter erarbeitet werden.

Während der Konditionierung der ausgedienten Brennelemente erfolgt die Abtrennung der Brennelementstrukturteile. In den POLLUX®-Behältern werden nur die Brennstäbe untergebracht. Die Brennelementstrukturteile werden in gesonderte MOSAIK®-Behälter (siehe Abbildung 7-1) verpackt, in Summe 2.620 Stück. Die Behälter fallen parallel zur Konditionierung der POLLUX®-Behälter über die gesamte Betriebszeit hinweg an und werden in einer separaten Einlagerungskammer eingelagert. (GRS, 2012)

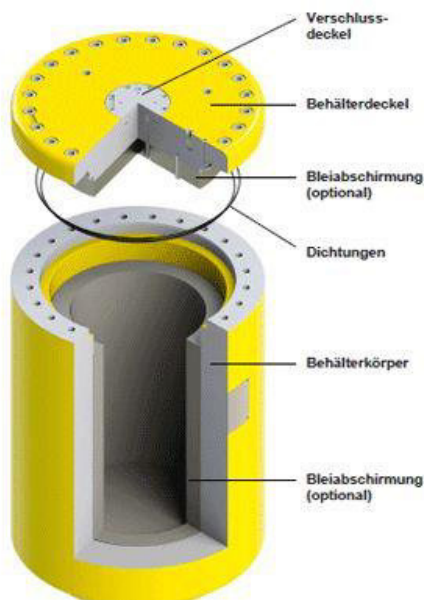


Abbildung 7-1: Bestandteile und Aufbau MOSAIK®-Behälter, (GNS, 2015)

Die Einlagerungskammer für die mit Brennelementstrukturteilen gefüllten MOSAIK®-Behälter liegt im schachtnahen Einlagerungsfeld, siehe Abbildung 7-2. Der Zugang ist über die gesamte Einlagerungsdauer hinweg gegeben. Die Einlagerungskammer ist mit 7 m Sohlbreite und 6,3 m Firsthöhe deutlich größer als die Einlagerungsstrecken der POLLUX®-Behälter. Innerhalb der Kammer werden die MOSAIK®-Behälter liegend in Reihen gestapelt. Zwischen den Reihen verbleibt ein Abstand von 0,1 m. Der Einlagerungsbereich der Kammer ist ca. 145 m lang. Mit fortschreitender Einlagerung werden die Behälterreihen schrittweise versetzt. Der Transport der Behälter erfolgt gleisgebunden. Die Einlagerung selbst erfolgt mit einem Stapelfahrzeug, nach dem Vorbild der Einlagerung im Schacht Konrad. Innerhalb der Kammer wird ein zusätzlicher Streckenstummel aufgeföhren, der dem Stapelfahrzeug als Wendestelle und Parkplatz dient. (GRS, 2012)

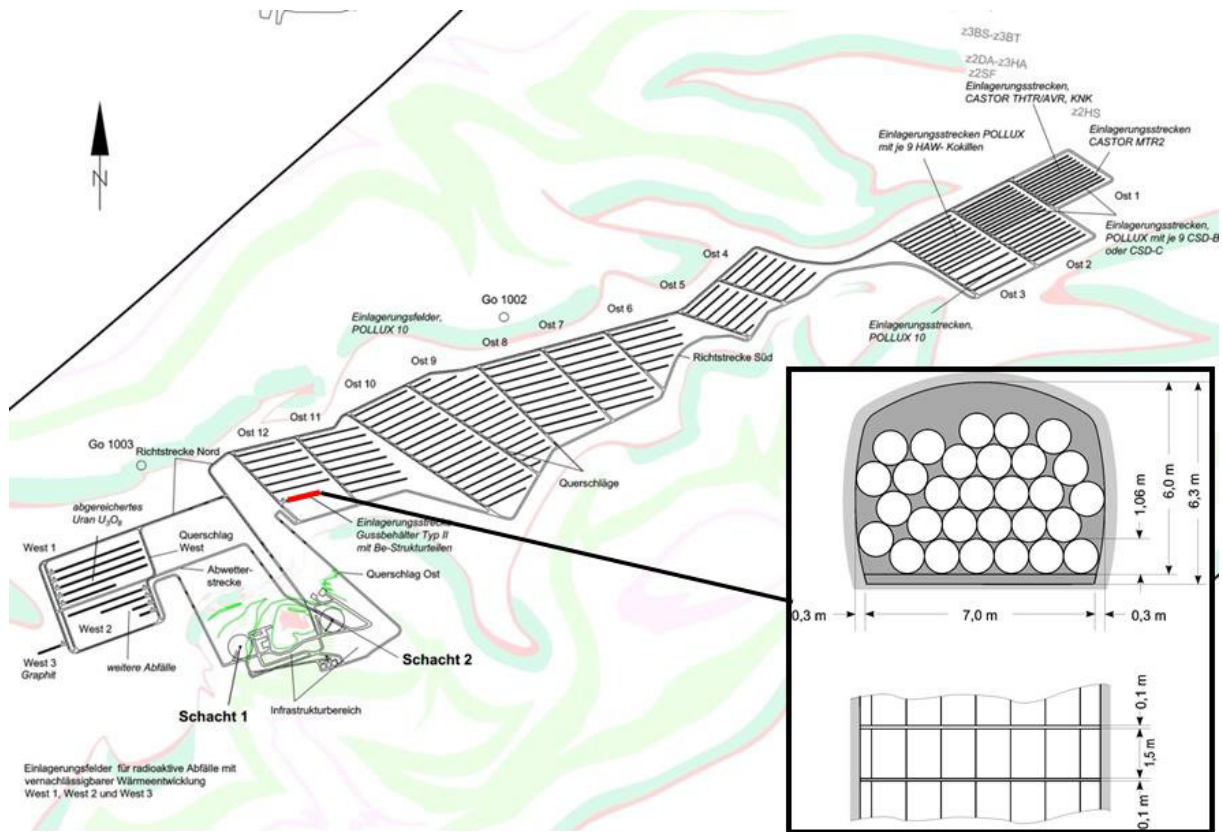


Abbildung 7-2: Einlagerungskammer für Brennelementstrukturteile (rot) und Einlagerungskonfiguration, nach (GRS 2012)

Unter Berücksichtigung des Re-Mining-Konzeptes müssen die Behälter im Zuge der Rückholung wieder vollständig freigelegt werden. Diese aktive Umsetzung der Rückholung, also die Entnahme der Behälter aus dem Gebirge, ist mit der klassischen Gewinnungstätigkeit im Bergbau vergleichbar. Dementsprechend kann die Rückholung auch in die drei Hauptprozesse der (Rohstoff-)Gewinnung - **Lösen, Laden und Fördern** - unterteilt werden.

Zum Lösen bzw. Freilegen der Behälter muss zunächst ein Zugang geschaffen werden. Anschließend können die Behälter mit geeigneten technischen Mitteln aufgenommen werden. Das entspricht dem Prozess des Ladens. Die Vorrichtung zur Aufnahme der Behälter (Ladevorrichtung) legt diese schließlich auf einer Transportvorrichtung ab. Die Behälter werden dann zum Schacht gefördert und nach über Tage gebracht.

Zur Rückholung der gestapelten MOSAIK®-Behälter ist es notwendig, diese möglichst vollständig frei zulegen. 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 würden das Schneidprofil einer TSM übersteigen.

Die Auffahrung muss somit in mehreren Teilschritten erfolgen. Ein Vortrieb kann von verschiedenen Ansatzpunkten aus erfolgen. Die grundsätzlichen Möglichkeiten für den ersten Auffahrungsschritt zum Freilegen der Behälter sind in Abbildung 7-3 dargestellt.

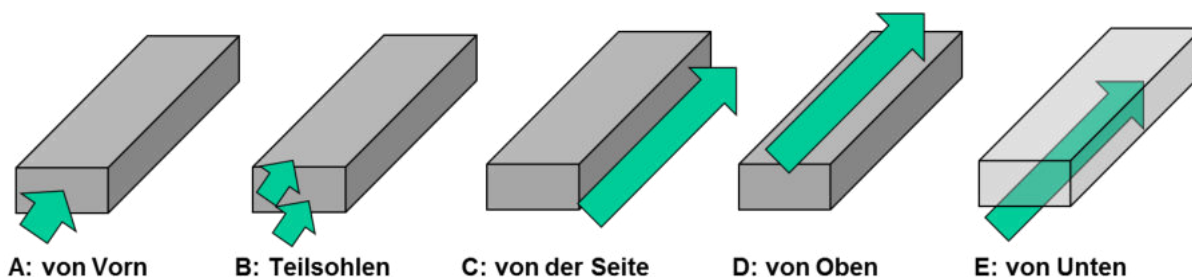


Abbildung 7-3: Ansatzpunkte der ersten Teilauffahrung zum freilegen der Behälter

Zur Vereinheitlichung der Arbeitsabläufe wird festgelegt, dass der Streckenquerschnitt zur Rückholung der mit Brennelementstrukturteilen beladenen MOSAIK®-Behälter etwa dem Querschnitt der Rückholungsstrecke für POLLUX®-Behälter entsprechen soll. Die endgültige Firsthöhe soll in einem Schritt und mit der vorhandenen Vortriebstechnik herstellbar sein. Die Unterfahrung (Abbildung 7-3 E) der Behälter, das Freilegen des Firstbereichs (Abbildung 7-3 D) und auch eine Freilegung über mehrere Teilsohlen (Abbildung 7-3 B) wird nicht weiter betrachtet.

Die angestrebte Streckenbreite der endgültigen Rückholungsstrecke ist nicht in einem Schritt herstellbar. In Anlehnung an das Auffahrungsregime der Rückholungstrecken für POLLUX®-Behälter wird in einem ersten Schritt eine Teilstrecke, seitlich (vgl. Abbildung 7-3 C) und durchschlägig zwischen den benachbarten Querschlügen errichtet. Der Querschnitt der Teilstrecke beträgt 14 m². Zwischen der Teilstrecke und dem Einlagerungsbereich verbleibt ein Pfeiler von wenigstens 0,5 m Breite. Die endgültige Firsthöhe ist um 0,3 m höher als bei der Rückholungsstrecke für POLLUX®-Behälter. Der neu konzipierte Einlagerungsbereich hat einen Streckenquerschnitt von 20,5 m². In Abbildung 7-4 ist der angepasste Querschnitt der Einlagerungsstrecke, der Querschnitt der Teilstrecke zur Rückholung und der endgültige Querschnitt der Rückholungstrecke dargestellt.

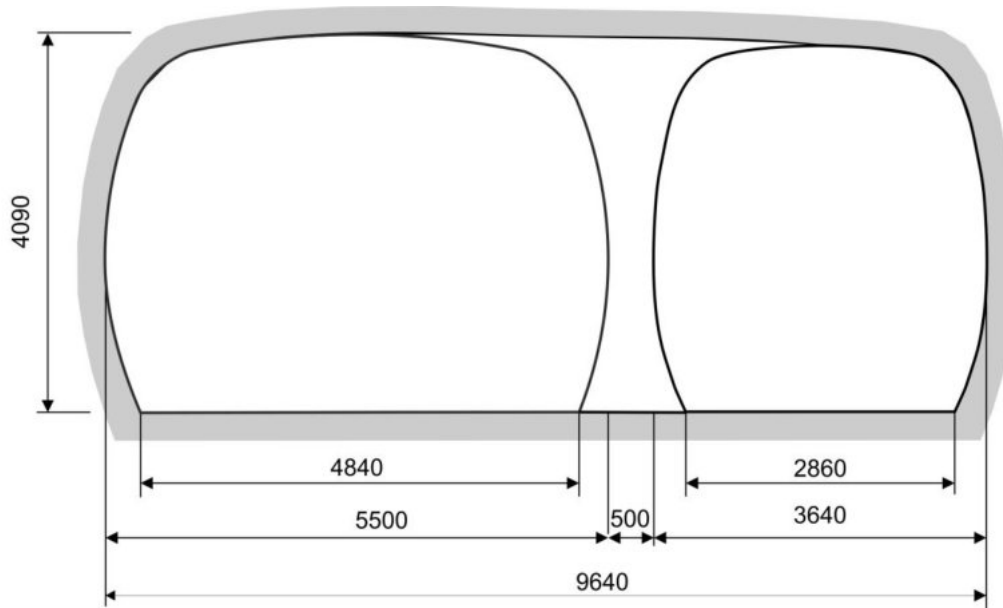


Abbildung 7-4: Angepasste Streckenquerschnitte zur Erleichterung der Rückholbarkeit von Behältern für Brennelementstrukturteile

Der neue Querschnitt der Einlagerungsstrecke erfordert eine Anpassung des Einlagerungsschemas der MOSAIK®-Behälter. Eine technisch einfache und sichere Entnahme der Behälter ist wesentlich von der Lagerung der Behälter abhängig. Tabelle 7-1 fasst die möglichen Anschlagpunkte bei einer stehenden und liegenden Lagerung zusammen.

Tabelle 7-1: Mögliche Anschlagpunkte zur Entnahme liegender Behälter

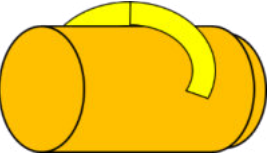
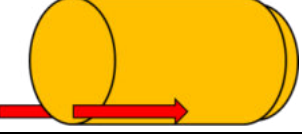
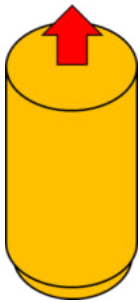
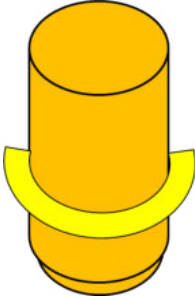
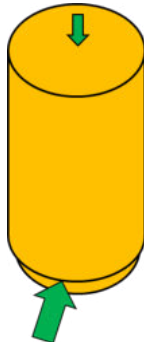
Möglicher Anschlag	Bewertung
	- Greifen von Oben erfordert mindestens Freilegung des halben Umfangs - Lage der Behälter zueinander kann Ladevorgang behindern
	- Kein geeigneter Anschlag an der Stirnseite vorhanden - führt zu hoher mechanischer Belastung am Deckel
	- entspricht bisheriger Einlagerung - Anschlagpunkte der Ladegabeln sind sehr wahrscheinlich durch Versatz blockiert - Versatzentnahme aufwändig und zeitintensiv

Tabelle 7-2: Mögliche Anschlagspunkte zur Entnahme stehender Behälter

Möglicher Anschlag	Bewertung
Ziehen an der Stirnfläche 	- Kein geeigneter Anschlag an der Stirnseite vorhanden - führt zu hoher mechanischer Belastung am Deckel
Umgreifen der Mantelfläche 	- Greifen von Oben erfordert mindestens Freilegung des halben Umfangs - Lage der Behälter zueinander kann Ladevorgang behindern
Anschlag an der Bodenkante und Fixierung von Oben 	bereits bei geringem freigelegten Querschnitt möglich

Im neuen Einlagerungsquerschnitt sollen die Behälter stehend gelagert werden. Die Handhabung der Behälter erfolgt über einen Anschlag am Bodenbereich und eine zusätzliche Fixierung am Deckel, vgl. auch Tabelle 7-1. Dieses System ist für die Einlagerung und die Rückholung nutzbar. Das Stapelfahrzeug muss mit einer entsprechenden Aufnahmevorrichtung ausgestattet werden.

Der Transport der Behälter kann weiterhin mit einem gleisgebunden System erfolgen. Die Behälter werden stehend ans Endlager angeliefert und stehend eingelagert. Ein Drehen der Behälter für einen liegenden innerbetrieblichen Transport ist nicht sinnvoll und soll vermieden werden. Dies weicht vom bisherigen Transportkonzept ab, vgl. dazu Abbildung 7-5.

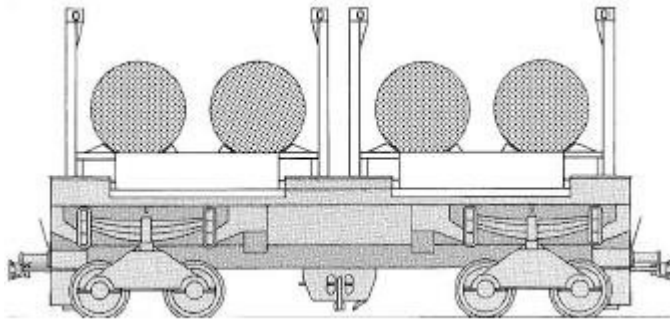


Abbildung 7-5: Plateauwagen für MOSAIK®-Behälter, liegender Transport (GRS, 2011a)

Im Querschnitt der neuen Einlagerungsstrecke können jeweils vier Behälter nebeneinander abgestellt werden, siehe Abbildung 7-6. Die Streckenhöhe erlaubt das Stapeln von zwei Behältern übereinander. Für die Einlagerung der Behälter in dichtester Packung wird eine Streckenlänge von insgesamt 302 m benötigt. Innerhalb einer Strecke können auf bis zu 220 m Länge Behälter eingelagert werden. Zur Umsetzung des angepassten Einlagerungskonzeptes sind somit zwei Einlagerungsstrecken nötig. Die Behälter werden nach der Einlagerung schrittweise versetzt.

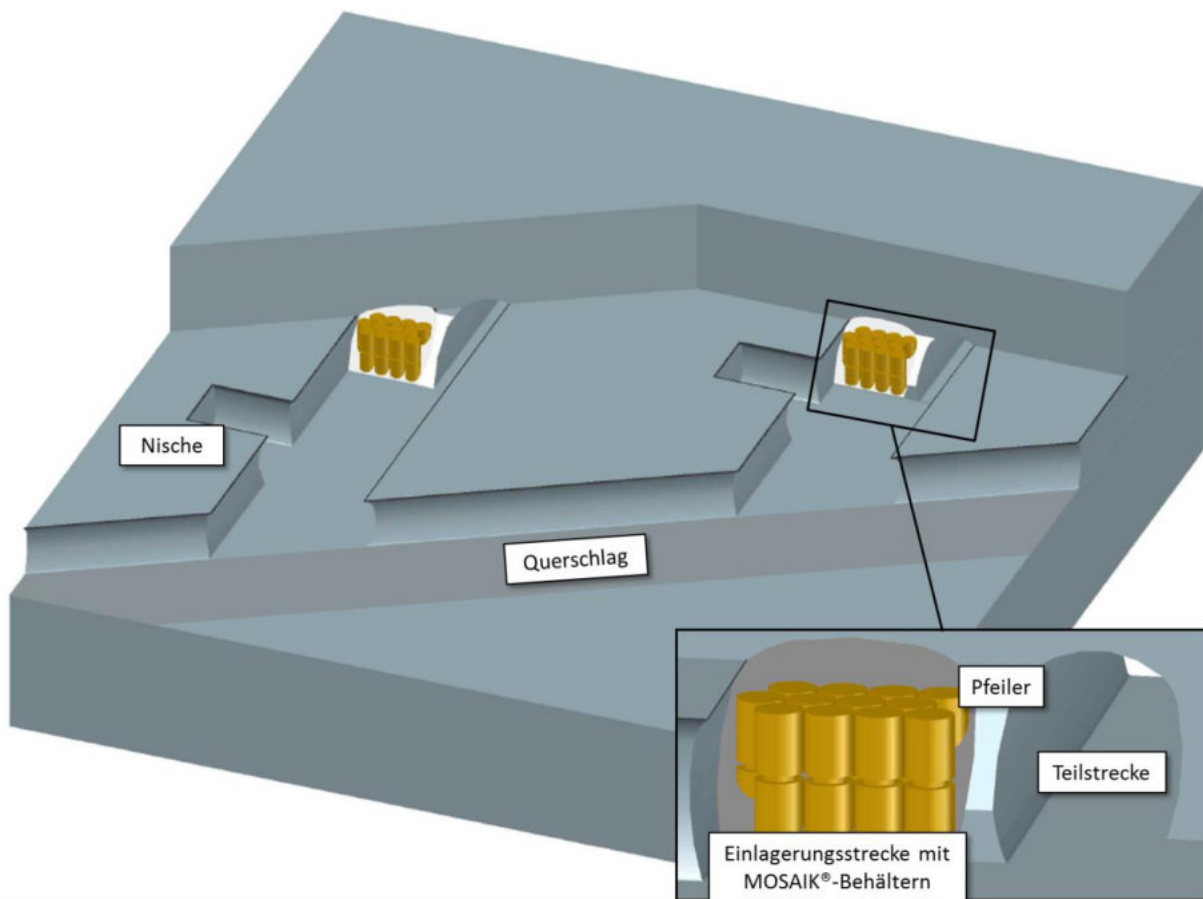


Abbildung 7-6: Dreidimensionale Darstellung der neuen, befüllten Einlagerungsstrecke, der Teilstrecke zur Rückholung und des verbleibenden Pfeilers mit Nische und Zugangsstrecke

Die Rückholung erfolgt in mehreren Teilschritten. Im ersten Schritte 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 Behälter erfolgt mit der Auffahrung. Die einzelnen Behälterreihen werden mit Hilfe der TSM oder aber auch einem Abbruchroboter von oben her freigelegt. Das Einlagerungsfahrzeug kann die Behälter auch bei der Rückholung wieder aufnehmen und auf dem gleisgebundenen Transportfahrzeug ablegen.

8 Verschluss und Umgang mit dem geräumten Endlager

Der Umgang mit dem gewonnenen Haufwerk ist je nach Vortriebsort unterschiedlich. Das Haufwerk der Hauptstreckenauffahrung fällt im ÜB an. Die Auffahrung dieser Strecken erfolgt vorausseilend zur eigentlichen Rückholung. Die Hauptstrecken bleiben über die gesamte Dauer der Rückholung offen. Damit sind die Hauptstrecken und auch die Querschläge durch die längste Offenhaltungsdauer gekennzeichnet. Mit ca. 9.000 m Auffahrungslänge der nördlichen Doppelstrecke, 4.900 m Auffahrung der südlichen Richtstrecke und 5.400 m Auffahrung der Querschläge entsteht so ein Hohlraumvolumen von wenigstens 445.000 m³. Mit entsprechender Auflockerung (Auflockerungsfaktor 1,2) entsteht ein Haufwerksvolumen von wenigstens 534.000 m³. Das gelöste Haufwerk muss auf eine übertägige Halde gebracht werden.

Die Auffahrung der Teil- und Rückholungsstrecken findet im KB statt. Bereits geräumte Rückholungsstrecken werden parallel zur Rückholung wieder mit Haufwerk versetzt. Dies kann als Sturzversatz während der Auffahrung erfolgen oder aber als Schleuderversatz mit entsprechender Zwischenspeicherung und Zerkleinerung. Der direkte Versatz des gelösten Haufwerks kann frühestens nach der Räumung der ersten Einlagerungsstrecke erfolgen. Entsprechend der Betriebsabläufe muss ein Teil des Haufwerks in Bunkern zwischengespeichert oder ebenfalls auf Halde verbracht werden. Das Volumen wird auf wenigstens 30.000 m³ geschätzt (zwei Teilstrecken und eine ganze Rückholungsstrecke). Damit erhöht sich das notwendige Haldenvolumen auf insgesamt 564.000 m³. Das Verlassen des KB bedarf einer Freimessung dieses Haufwerks. Zur Vergleichmäßigung der Massenströme kann ein zusätzlicher Bunker im KB errichtet werden.

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. Mit dem Ziel, das Grubengebäude aus dem Atomrecht zu entlassen, ist es notwendig, alle Grubenteile des KB und den Versatz freizumessen. Gelingt dies, kann das geräumte Endlager nach den geltenden bergbehördlichen Vorgaben verschlossen werden. Nach (LBEG, 2007) müssen folgende Schutzziele eingehalten werden:

- Tagesschächte müssen so verwahrt werden, dass die Sicherheit an der Tagesoberfläche dauerhaft gewährleistet wird.
- Verwahrungen müssen gewährleisten, dass keine nachteiligen Beeinflussungen durch Stoffein- oder -austräge in bzw. aus dem Grubengebäude zu einer Schädigung der Umwelt führen.

Das Grubengebäude wird trocken verwahrt. Die Schachtverschlüsse der beiden Tagesschächte werden entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik geplant und errichtet. Für den langzeitsicheren Verschluss konventioneller Kali- oder Steinsalzbergwerke existieren hinreichend Anwendungsbeispiele.

9 Zeit- und Kostenschätzung

Der Lebenszyklus eines Endlagers reicht von der Standortauswahl über die Genehmigungsphase, Errichtung, den Betrieb, den Verschluss und die Nachverschlussphase. In Summe dauern diese Projektphasen typischerweise mehrere Jahrzehnte. Die Abschätzung zeitlicher Abläufe und Kosten für den gesamten Lebenszyklus ist aufgrund der langen Zeiträume mit erheblichen Ungewissheiten verbunden. Ein Deutsches Endlager für insbesondere wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente steht nach dem Neustart der Endlagersuche am Anfang dieses Lebenszyklus, vgl. Abbildung 9-1.

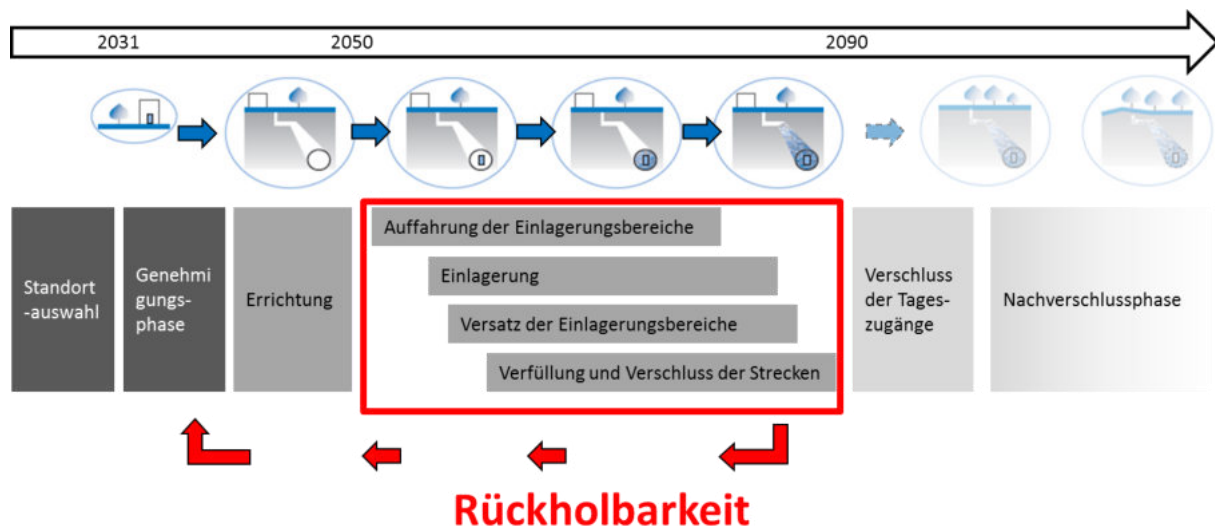


Abbildung 9-1: Lebenszyklus eines Endlagers und möglicher Rückholungszeitraum

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

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

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

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

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

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

9.1 Zeitschätzung

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

Die Rückholung als aktive Maßnahme der Behälterentnahme bildet den Hauptprozess der Rückholungstätigkeit. Zusätzlich sind verschiedene vorausseilende und unterstützende Prozesse für den Betrieb des Rückholungsbergwerkes notwendig. Im Rückholungskonzept der Streckenlagerung bilden die Neuauffahrung der Hauptstrecken, Querschläge und Rückholungstrecken wesentliche Teilprozesse. Zusätzlich sollen auch eine Erkundung der Einlagerungsbereiche, ein Gleisbau in den Hauptstrecken und der Versatz nicht mehr benötigter Grubenräume berücksichtigt werden, Abbildung 9-2.

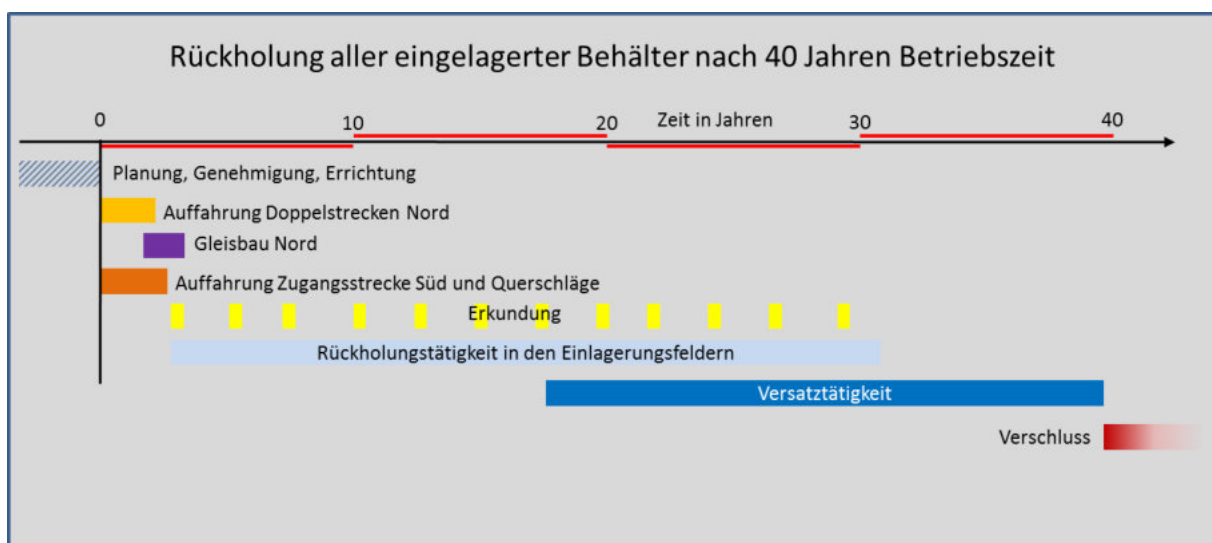


Abbildung 9-2: Schematische Darstellung zum Ablauf der Hauptprozesse während des Rückholungsbetriebes

Wie im Abschnitt 6.5 erläutert sind neben dem Referenzkonzept einer möglichst dichten Lagerung der Behälter, vgl. dazu (GRS, 2012), auch davon abweichende Endlagerkonfigurationen denkbar, mit denen eine Rückholung im Sinne der Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010) erleichtert oder aber zur Einhaltung des vorläufigen Temperaturkriteriums von 100°C (StandAG, 2017) umgesetzt werden kann. Für die Zeit- und Aufwandsschätzung sollen neben der Referenzauslegung drei weitere Konfigurationen berücksichtigt werden:

- POLLUX®-10-Behälter mit 36 m Streckenabstand (Referenzauslegung nach (GRS, 2012))
- POLLUX®-10-Behälter mit 40 m Streckenabstand
- POLLUX®-10-Behälter mit 44 m Streckenabstand
- POLLUX®-10-Behälter mit 50 m Streckenabstand

Für alle vier Varianten wird ein vereinfachtes, generisches Endlagerlayout zugrunde gelegt. Aus dieser Basis erfolgt die Abschätzung des Zeitauswandes. Die wesentlichen Eigenschaften sind in Tabelle 9-1 zusammengefasst.

Tabelle 9-1: Eigenschaften der berücksichtigten Auslegungskonfigurationen

	10-36	10-40	10-44	10-50
Anzahl POLLUX®-Behälter	3.026			
Behälter je ES	28			
Behälter Abstand	2,63 m			
Streckenabstand ES [m]	36	40	44	50
Einlagerungsfelder	11			
Feldeslänge [m]	272	272	272	272
Feldesbreite [m]	393	429	465	519
m² je POLLUX	381	416	451	503
Auffahrungslängen [m]:				
Teilstrecke 1	29.100	29.100	29.100	29.100
Teilstrecke 2	29.100	29.100	29.100	29.100
Pfeiler	29.084	29.100	29.100	29.100
Querschläge	4.500	4.900	5.300	6.000
Doppelstrecke	7.800	7.800	7.900	8.000
Richtstrecke	3.900	3.900	4.000	4.000
Ausbruch [m³]:				
Teilstrecke 1	378.100	378.100	378.100	378.100
Teilstrecke 2	378.100	378.100	378.100	378.100
Pfeiler	261.800	261.800	261.800	261.800
Querschläge	107.100	117.400	127.800	143.400
Doppelstrecke	186.300	188.000	189.700	192.300
Richtstrecke	89.300	90.100	90.900	92.200

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 erfolgen. Die Streckenlängen variieren zwischen den Varianten nur gering. Es wird angenommen, dass diese Auffahrungen innerhalb von ca. 2,5 Jahren abgeschlossen sind. Die Teilstrecken der Doppelstrecke werden dabei gleichzeitig errichtet. Die dritte Richtstrecke und die Querschläge werden von einem anderen Betriebspunkt erstellt. Zeitlich versetzt zum Vortrieb der Doppelstrecke werden in der den Einlagerungsfeldern zugewandten Strecke die Gleise errichtet. Die Dauer des Gleisbaus wird auf ca. 1,5 Jahre abgeschätzt.

Das Rückholungsbergwerk wird von den Schächten weg errichtet wird. Die Vorrichtung der Einlagerungsfelder kann beginnen sobald die Hauptstrecken und Querschläge um ein solches Feld errichtet sind. Alle Vortriebsarbeiten können nach einem Vorlauf der Hauptstreckenvortriebe parallel stattfinden. Vorrausend zur Auffahrung der Rückholungsstrecken/Teilstrecken findet stets eine Erkundung der Behälterlage aus dem Querschlag heraus statt. Die exakte Position der Behälter wird in einem zweiten Erkundungsschritt aus den Teilstrecken heraus bestimmt.

Die in den Hauptstrecken eingesetzte Vortriebstechnik ist nicht für die Errichtung der Rückholungsstrecken geeignet. Hier müssen kleinere, leichtere Teilschnittmaschinen und entsprechende Hilfsgeräte eingesetzt werden. Die Gesamtlänge der Teilstreckenvortriebe beträgt ca. 60 km. Auf die Pfeilerentnahme entfallen weitere 30 km. Die betrachteten Varianten unterscheiden sich an dieser Stelle durch die in den Einlagerungsfeldern herrschenden Temperaturbedingungen (vgl. Optimeirungsziel Abschnitt 5.6 und 6.5). In Folge unterschiedlicher Vortriebsgeschwindigkeiten und Kühlpausen geht der notwendige Zeitraum für die Errichtung weit auseinander. In allen Varianten werden zwei aktive Betriebspunkte (Vortriebe) angenommen. Die Auffahrungsdauer aller Teilstrecken liegt dann zwischen 17 und 28 Jahren.

Der eigentliche Rückholungsvorgang besteht aus drei Teilschritten, die jeweils in einer Schicht umgesetzt werden (siehe Abbildung 9-3). Zunächst muss der Pfeiler bis zum Behälter gewonnen werden. Anschließend ist der Behälter vollständig freizulegen. Im dritten Schritt wird der Behälter aus der Strecke entnommen und zurück nach Übertrage transportiert. Diese Schritte sind für jeden Behälter durchzuführen. Während des Entferns des kurzen Pfeilers zwischen zwei Behältern kann auch ein Nachschnitt des Sohl- und Firstbereiches in der Rückholungstrecke erfolgen. Diese Schritte finden nach dem Vortrieb beider Teilstrecken an jedem der beiden Betriebspunkte stets im Wechsel statt.

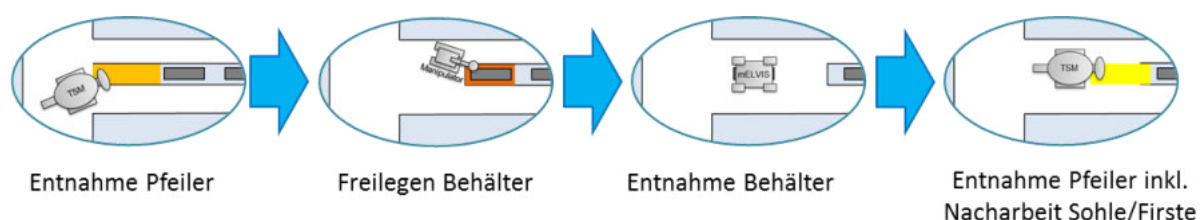


Abbildung 9-3: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte während der aktiven Rückholung der Behälter

Für die Entnahme der Pfeiler und Endlagerbehälter wird für alle Varianten die gleiche Schichtleistung angenommen. Durch die vorlaufenden Vortriebe der Teilstrecken und die damit verbundene Kühlung sollten in allen Varianten ähnliche Umgebungsbedingungen auftreten bzw. sollten die Umgebungsbedingungen zu keinen signifikanten Unterschieden in der Umsetzung führen. Damit kann für alle Auslegungskonfigurationen eine Dauer der Behälterentnahme von ca. 28 Jahren abgeschätzt werden.

Diese gleichbleibende Entnahmedauer egalisiert die unterschiedlichen Errichtungsdauern der Teilstrecken. Nur durch die Errichtung zusätzlicher Betriebspunkt kann die Entnahmege-

schwindigkeit erhöht werden. In Summe bestimmt die Entnahme der Behälter den Rückholungsfortschritt und damit die gesamte Rückholdauer bzw. die Dauer des Rückholdetriebes. Für die unterschiedlichen Endlagerkonfigurationen führen daher nur zu geringen zeitlichen Unterschieden in der erwarteten Gesamtdauer der Rückholung. Für alle berücksichtigten Auslegungskonfigurationen wird eine Rückholdauer von rund 40 Jahren erwartet. Abbildung 9-4 und Abbildung 9-5 veranschaulichen die Arbeitsschritte und bestehenden Abhängigkeiten innerhalb eines Einlagerungs-/Rückholdungsfeldes und einer Rückholdungsstrecke. In

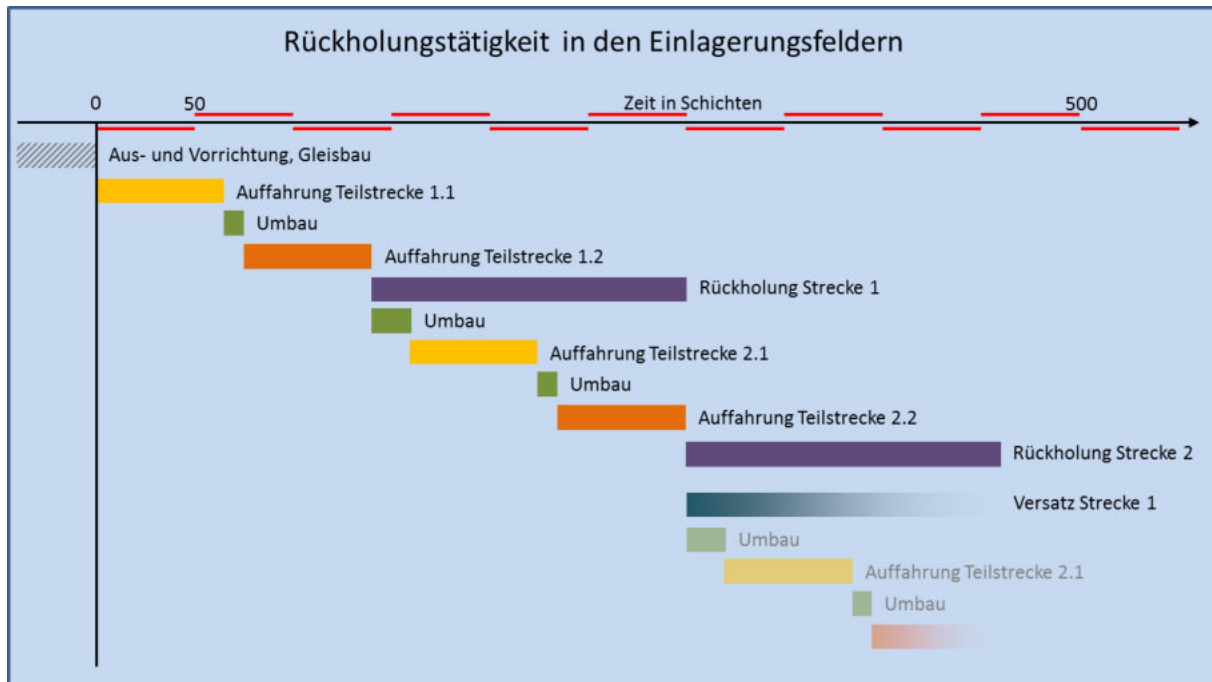


Abbildung 9-4: Schematische Darstellung zum Ablauf Arbeiten innerhalb eines Einlagerungs-/Rückholdungsfeldes

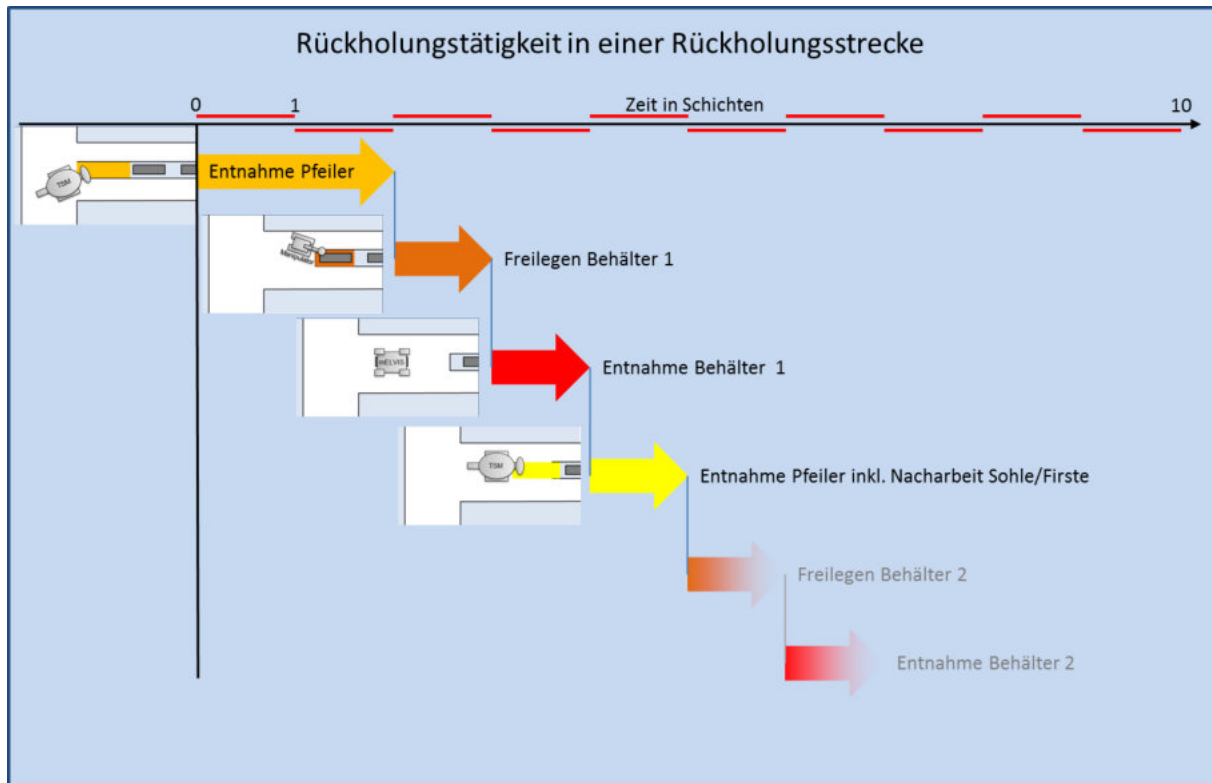


Abbildung 9-5: Schematische Darstellung zum Ablauf der eigentlichen Rückholungstätigkeit

Tabelle 9-2: Übersicht Zeitbedarf für einzelne Arbeitsschritte im Vergleich zwischen den Auslegungskonfigurationen

Prozess	Auslegungskonfiguration			
	10-36	10-40	10-44	10-55
A) Auffahrung Doppelstrecke	2.0	2.0	2.1	2.1
B) Gleisbau	1.4	1.4	1.4	1.5
C) Auffahrung Querschläge	2.1	2.2	2.3	2.5
D) Ausfahrung Teilstrecken	27.6	25.6	19.9	17.1
E) Rückholung/Entnahme	27.5	27.5	27.5	27.5
F) Versatz Rückholungsstrecken	16.4	16.4	16.4	16.4
G) Versatz Querschläge	2.2	2.4	2.7	3.0
H) Versatz Hauptstrecken	6.0	6.0	6.1	6.2
Gesamt (=A+B+E+G+H)	39.3	39.4	39.7	40.2

9.2 Kostenschätzung

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

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

Die Kosten während der Betriebsdauer der Rückholung sind:

- Kosten für die Auffahrung der nördlichen Doppelstrecke
- Kosten für die Auffahrung der südlichen Richtstrecke und Querschläge
- Kosten für die Auffahrung der Teilstrecken
- Kosten für die Erkundung
- Kosten für die konkrete Durchführung der Rückholung
- Kosten für den Versatz
- Kosten für die Kühlung/Bewetterung
- Kosten für Unterhaltung und den Betrieb der gesamten Anlage

Die Kostenschätzung basiert auf den geplanten Betriebsabläufen und Kostenschätzungen anderer internationaler Endlagerprojekte. Für die einzelnen Teilprozesse werden folgende Kosten berücksichtigt:

- Anschaffungskosten
- Betriebskosten
- Wartungskosten
- Personalkosten

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

Tabelle 9-3: Kostenschätzung zur Rückholung der Streckenlagerung

Position	Kosten	Einheit
Planungskosten	7.000.000	€
Kosten Auffahrung der RS-N1+2	16.300.000	€
Gleisbau	7.000.000	€
Kosten Auffahrung der RS-S und QS	71.000.000	€
Kosten Auffahrung der TS, inkl. Erkundung	81.000.000	€
Kosten Rückholung	6.700.000	€
Kosten Versatz	8.700.000	€
Betriebsdauer	40	a
Kosten für Kühlung und Bewetterung	3.900.000	€/a
Unterhaltung/Betrieb allgemein	41.900.000	€/a
jährliche Kosten	50.800.000	€/a

Ohne die Berücksichtigung einer Preissteigerung ergeben sich aus den erwarteten ca. 51 Mio. € jährlichen Kosten über die geplante Rückholdungsdauer Kosten von insgesamt 2,0 Mrd. € ("Overnight").

10 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) erfolgt eine Vertiefung des Planungsstandes von Rückholungskonzepten. Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse für die Einlagerungsvariante der Streckenlagerung in Salzgestein 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 beinhaltet die Ertüchtigung der Einlagerungstechnik, um diese auch für die Rückholung zu nutzen. Die Anforderungen an die Einlagerungstechnik während der Rückholung wurden formuliert. 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, unterscheidet sich von diesem aber durch ein gleisloses Fahrwerk und eine angepasste Behälteraufnahme. Der POLLUX[®]-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.

Mit Hilfe der thermo-dynamischen und thermo-mechanischen Berechnungen konnten die Bedingungen im Grubengebäude während der Rückholung nachvollzogen werden. Die zugrundeliegende Endlagerauslegung mit dem Ziel einer dichtesten Lagerung der Behälter führt in weiten Teilen der Einlagerungsfelder zu Temperaturen nahe der Auslegungsgrenze und sehr hohen Konvergenzen. Eine Auffahrung der Aus- und Vorrichtungsstrecken (Richtstrecken und Querschläge) des Rückholungsbergwerkes scheint unter diesen Bedingungen noch technisch machbar. Die Auffahrung der Teil- und Rückholungsstrecken ist allerdings nicht in jedem Einlagerungsfeld uneingeschränkt möglich. Die dafür notwendigen Kühlpausen und die gerade noch zulässigen Vortriebslängen führen in Verbindung mit den hohen Gebirgskonvergenzen zu praktisch nicht mehr beherrschbaren Umgebungsbedingungen. Um die geltenden bergbehördlichen Vorgaben einhalten zu können wird die Errichtung eines zusätzlichen leistungsstarken Kühlsystems und die Anpassung der eingesetzten Technik an die extremen Umgebungsbedingungen unerlässlich.

Zur Schaffung möglichst günstiger Umgebungsbedingungen während des potenziellen Rückholungszeitraums wurde die thermische Endlagerauslegung optimiert. Statt einer möglichst dichten Lagerung der Behälter sollte das Optimierungsziel möglichst günstiger thermo-mechanischer Bedingungen im potenziellen Rückholungszeitraum berücksichtigt 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 des Gesamtsystems ist durch entsprechende Sicherheitsbetrachtungen auszuschließen. Solange eine Beeinträchtigung aber nicht stattfindet ist eine Abwägung der verschiedenen, sich teils entgegenstehenden Auslegungsanforderungen möglich. Genau dieser Ansatz wird in den nachfolgenden Abschnitten verfolgt. Eine veränderte Endlagerauslegung mit weniger strikter Einhaltung des Minimierungsgebotes kann 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, mit zu berücksichtigen. Mit den durchgeführten Untersuchungen wurde gezeigt, wie der Zielkonflikt zwischen den unterschiedlichen Auslegungsanforderungen zumindest teilweise aufgelöst werden kann.

Quellenverzeichnis

- (ABC, 2015) Online Zitat vom 19.10.2015: <http://www.abc.net.au/news/2015-10-18/rio-tinto-opens-worlds-first-automated-mine/6863814>
- (Arvidsson, 2005) Arvidsson, S.: Remote Control and Automation in Swedish Iron Ore Mining, Revue Géosciences, Ausgabe 1, 2005, Online Zitat vom 19.10.2015: http://www.brgm.fr/sites/default/brgm/publications/revue_geosciences1/index.html#62
- (AtG, 2018) Atomgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 10. Juli 2018 (BGBl. I S. 1122, 1124)
- (BAST, 2016) Bundesanstalt für Straßenwesen: Merkblatt Georadar, http://www.bast.de/DE/Strassenbau/Technik/Georadar.pdf?__blob=publicationFile&v=5, gelesen am 04.02.2016
- (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)
- (BMU, 2010) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Berlin, 2010
- (Brokk, 2015) Online Zitat vom 19.10.2015: https://www.brokk.com/img/informupl/brokk400_GER.pdf
- (Codelco, 2015) Strategic alliance of Codelco, Hexagon Mining and RCT at Andina, Online Zitat vom 10.07.15: <https://im-mining.com/2015/07/10/strategic-alliance-of-codelco-hexagon-mining-and-rct/>
- (DBE, 1988) Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE): Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente (DEAB) – Optimierung des Systems Sohlensausbildung-Einlagerungsvorrichtung bei der Streckenlagerung von POLLUX-Behältern T9, Peine, 198
- (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, 2005) Amelung, P., Jobmann, M., Lerch, C., Polster, M., Schonebeck, M.: Berechnungen zur Endlagerauslegung im Steinsalz und Tongestein - Eine vergleichende Gegenüberstellung, Präsentation auf dem Workshop "Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tonstein" - GEIST: Peine, 2005
- (DBE TEC, 2008) DBE TECHNOLOGY GmbH: Überprüfung und Bewertung für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (ISIBEL) - AP1.2 - Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars, Peine, 2008
- (DBE TEC, 2010) DBE TECHNOLOGY GmbH: Optimization of the Direct Disposal Concept by Emplacing SF Canisters in Boreholes (ES-DRED/DENKMAL) - Final Report, Peine, 2010
- (DBE TEC, 2014) DBE TECHNOLOGY GmbH: Auswirkungen der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte, Abschlussbericht, Peine, 2014
- (DBE TEC, 2017) DBE TECHNOLOGY GmbH: Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland, Abschlussbericht, Peine, 2017
- (van Duin et al., 2012) van Duin, S.; Meers, L.; Donnelly, P.; Oxley, I.: Automated bolting and meshing on a continuous miner for roadway development, International Journal of Mining Science and Technology, Volume 23, Issue 1, January 2013
- (DWD, 2015) Deutscher Wetterdienst: Weste-Datenbank, Wetterdaten und -statistiken express, <http://www.dwd.de/DE/leistungen/witterungsreportexpress/witterungsreport-express.html>
- (ESK, 2015) Entsorgungskommission: Leitlinie zum sicheren Betrieb eines Endlagers für insbesondere Wärme entwickelnde radioactive Abfälle, 10.12.2015
- (Falk-Schutte, 2012) Rüdiger Falk-Schutte et al., Automatisierung des Schneidprozesses und der IH-Planung an der Teilschnittmaschine MR620, Bergbau, 05.2012
- (GNS, 2015) MOSAIK von Homepage

- (Grimscheid, 2012) Gerhard Grimscheid, Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, Ernst&Sohn, 24.01.2012
- (GRS, 1997) Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH „Realistische Abschätzung der Strahlenschädigung von Steinsalz bei Einlagerung von HAW in Bohrlöchern“, GRS – 142, Juni 1997
- (GRS, 2011a) Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS): Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Arbeitspaket 5 - Abschlussbericht, GRS-Bericht GRS-272, Köln, 2011
- (GRS, 2011b) Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS): Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Arbeitspaket 3 – Abfallspezifikation und Mengengerüst - Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung, GRS-Bericht GRS-278, Köln, 2011
- (GRS, 2012) Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS): Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Arbeitspaket 6 - Abschlussbericht, GRS-Bericht GRS-281, Köln, 2012
- (GRS, 2018) Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS): Bewertung der Wirksamkeit des Radionuklideinschlusses für ein Endlager in flachlagernden Salzformationen, Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA, GRS-496, Braunschweig, 2018
- (Kipp et al., 2014) R. Kipp et al., Sustainable Control Room Technology for International Mining Companies Boosts Efficiency and Provides a Decision Making Tool for Management and Workforce, Aachen International Mining Symposia AIMS 2014
- (Komatsu, 2014) Brochure: Komatsu PC210LCi-10 intelligent Machine Control Excavator; Whitepaper; 17.11.2014
- (Krieger, 2009) H. Krieger: Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes, 3. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009
- (LBEG, 2007) Landesbergamt für Bergbau, Energie und Geologie : Leitfaden des Landesbergamtes für Bergbau, Energie und Geologie des Landes Niedersachsen für das Verwahren von Tagesschächten, Stand: 19.12.2007
- (Marek et al., 2012) A. Marek et al., Mechanized Bolting – on board drilling automation and change in the support regime in low profile mechanized mining; The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Platinum 2012

- (McPherson, 1993) M. J. McPherson: Subsurface Ventilation and Environmental Engineering, Springer Verlag, 1993
- (Mourik et al., 2011) R. Mourik et al., Automated Excavator, First Experiences in Germany, In Proceedings of the Western Dredging Association (WEDA XXXI) Technical Conference and Texas A&M University (TAMU 42) Dredging Seminar, Nashville, 2011
- (Rawie, 2018) Online Zitat vom 19.10.2015:
<http://www.rawie.de/index.php/de/downloads>
- (RSK, 2006) Reaktor-Sicherheitskommission, Stellungnahme, Strahlenschäden im Steinsalz, 09.03.2006, 391. Sitzung
- (Sandvik, 2015) Online Zitat vom 19.10.2015: mining.sandvik.com
- (Schneider, 2012) K.-J. Schneider (Hrsg.): Bautabellen für Ingenieure - mit Berechnungshinweisen und Beispielen, 20. Auflage, Werner Verlag, 2012
- (SKB, 2017) SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB: Costs from and including 2018 for the radioactive residual products from nuclear power, Basis for fees and guarantees for the period 2018–2020, TR-17-02, Stockholm, 2017
- (StrlSchV, 2017) Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), zuletzt geändert durch nach Maßgabe des Artikel 10 durch Artikel 6 des Gesetzes vom 27. Januar 2017 (BGBl. I S. 114, 1222)
- (Sulaiman et al., 2014) H. Sulaiman et al., Modern manned, unmanned and teleoperated excavator system, Journal of Mechanical Engineering and Technology, Vol. 7, No. 1, January-June 2015
- (VMT, 2016) Brochure: SLS Rockbolter, VMT-GmbH, http://vmt-gmbh.de/wp-content/uploads/2014/04/SLS-Rockbolter-advanced_DE.pdf
- (Vogt & Schulz, 2011) H.-G. Vogt; H. Schultz: Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes. 6. Auflage. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2011
- (Voß, 1981) J. Voß: Grubenklima – Grundlagen, Vorausberechnung, Wetterkühlung, Glückauf Verlag, Essen, 1981

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Typische Entwicklungsstufen eines Endlagers und Zuordnung der Rückholbarkeit und Bergung, nach (NEA, 2011)	5
Abbildung 3-1:	Darstellung des Grubengebäudes für die Streckenlagerung auf der Einlagerungssohle (870 m Sohle) (GRS, 2012)	10
Abbildung 3-2:	Versuchsstand zur Demonstration der Streckenlagerung von POLLUX®-10 Behältern (DBE TEC, 2008)	11
Abbildung 3-3:	oben: Endgültiges Profil der Rückholungsstrecke und Querschnitt der Einlagerungsstrecke, unten: Querschnitte der beiden Teilstrecken	13
Abbildung 4-1:	links: Profil der Doppelstrecken Nord und der Querschläge, rechts: Profil der Richtstrecke Süd (Angaben jeweils in mm) (GRS, 2012)	15
Abbildung 4-2:	Schematische Darstellung der Auffahrung aller Hauptstrecken und Querschläge	16
Abbildung 4-3:	Grubengebäude nach (GRS, 2012), im möglichen Rückholungsbetrieb	17
Abbildung 4-4:	Schematische Darstellung der Auffahrung von Richtstrecken, Querschlägen und Teilstrecken mit möglichen Betriebspunkten (gelbe Punkte), sowie Kontroll- (roter Bereich) und Überwachungsbereich (grün)	18
Abbildung 4-5:	Profil der Teilstrecken mit intaktem Pfeiler (rot) und POLLUX®-Behälter (Angaben in m)	21
Abbildung 4-6:	Abbruchroboter zum Freilegen der POLLUX®-Behälter, hier beispielhaft der BROKK 400 (Brokk, 2015)	22
Abbildung 4-7:	Darstellung mELVIS im angehobenen Zustand, mit Behälter	24
Abbildung 4-8:	Lage der Greifzangen in Relation zum Behälter	26
Abbildung 4-9:	Konstruktion der Zangen am Querträger im Tragrahmen	26
Abbildung 4-10:	Schematische Darstellung der Übergabestelle im Querschlag	28
Abbildung 4-11:	Konzept Plateauwagen für mELVIS, beladen	29
Abbildung 4-12:	Konzept Plateauwagen für mELVIS: a – mit Greifzangen des mELVIS, b – unbeladen, c – Oberwagen mit Schale POLLUX®, d – Fahrwerke einzeln	30
Abbildung 4-13:	19° Öffnungswinkel der Greifzangen erlauben Ausfahrt in beide Richtungen (Tragzapfen sind limitierend)	30
Abbildung 4-14:	Schale des Oberwagens mit POLLUX® (links) und Einsatz für CASTOR®-THTR (rechts)	31
Abbildung 4-15:	mELVIS im Querschnittprofil der Einlagerungsstrecke	55
Abbildung 4-16:	Möglicher Querschnitt Einlagerungsstrecke, angepasst an die Abmessungen der mELVIS	57
Abbildung 4-17:	Entwurf Teleskopstütze mit Hubhöhe 707 mm	59

Abbildung 4-18: für die Einlagerung optimierte mELVIS in Ablageposition (links) und höchster Hubposition (rechts)	60
Abbildung 5-1: POLLUX®-Behälter (GRS, 2012)	64
Abbildung 5-2: Thermische Leistung eines Brennelementes in Abhängigkeit von der Zeit, beladungsäquivalent zu einem DWR-BE	65
Abbildung 5-3: Berechnungsmodell	67
Abbildung 5-4: Modell des Rückholungsquerschnittes im Detail	68
Abbildung 5-5: Simulationsablauf	69
Abbildung 5-6: Wärmeentwicklung im Gebirge	75
Abbildung 5-7: Temperatur über die Zeit (links), Temperatur über dem Behälterabstand (rechts)	76
Abbildung 5-8: Spannungsentwicklung während der Einlagerungsphase	77
Abbildung 5-9: Verschiebung von Messpunkten auf der Sohle über die Einlagerungsdauer	78
Abbildung 5-10: Spannungsentwicklung im Gebirge während der Rückholung	79
Abbildung 5-11: Konturverformungen über die Rückholungsdauer	81
Abbildung 5-12: Konvergenzen und Konvergenzraten während der Rückholung	82
Abbildung 5-13: Auswertung der Kurzzeitfestigkeitskriteriums im Modell	83
Abbildung 5-14: Thermische Auswertungspunkte in der Rückholungsstrecke	84
Abbildung 5-15: Berechnungsmodell für die thermische Optimierung	85
Abbildung 5-16: Temperatur-Antwortfläche am Aufpunkt des Behälters	86
Abbildung 5-17: Temperatur-Antwortfläche an der Kontur der Rückholstrecke	87
Abbildung 5-18: Konvergenzentwicklung über die Rückholungsdauer für verschiedene Endlagerkonfigurationen	88
Abbildung 6-1: Bewetterungsschema während der Rückholung	90
Abbildung 6-2: Schematische Darstellung des Grubengebäudes und dessen Einteilung in Strahlenschutzbereiche	91
Abbildung 6-3: Temperaturentwicklung in der Richtstrecke Nord ($N-Q_x$ = Streckenkreuz Richtstrecke und Querschlag x , $N-Q_{x.5}$ = halbe Strecke zwischen Querschlag x und Querschlag $x-1$, Nummerierung der Querschläge wie bei Einlagerung)	93
Abbildung 6-4: Temperaturentwicklung in der Richtstrecke Süd ($S-Q_x$ = Streckenkreuz Richtstrecke und Querschlag x , $S-Q_{x.5}$ = halbe Strecke zwischen Querschlag x und Querschlag $x-1$, Nummerierung der Querschläge wie bei Einlagerung)	94
Abbildung 6-5: Temperaturentwicklung in der Mitte der Querschläge (Nummerierung der Querschläge wie bei Einlagerung)	94

Abbildung 6-6:	Temperaturverteilung im Grubengebäude am Ende der Einlagerung bzw. zu Beginn der Rückholung (ca. 40 Jahre nach Beginn der Betriebszeit), rechts Detailansicht der Einlagerungsfelder Ost 12 und 11	95
Abbildung 6-7:	Temperaturentwicklung an verschiedenen Beobachtungspunkten in einer horizontalen Ebene um einen Behälter in der Einlagerungstrecke 3, Feld Ost 12 innerhalb der ersten 100 Jahre nach Beginn der Betriebszeit	96
Abbildung 6-8:	Temperaturfeld an einem Behälter in der Einlagerungstrecke 3, Feld Ost 12, senkrecht zur Behältermitte zu verschiedenen Zeitpunkten nach der Einlagerung	97
Abbildung 6-9:	Temperaturverteilung Richtstrecke Nord nach Entnahme ohne Kühleffekte der Wetter ($N-Q_x$ = Streckenkreuz Richtstrecke und Querschlag x , $N-Q_{x.5}$ = halbe Strecke zwischen Querschlag x und Querschlag $x-1$, Nummerierung der Querschlüge wie bei Einlagerung)	98
Abbildung 6-10:	Temperaturverteilung Richtstrecke Süd nach Entnahme ohne Kühleffekte der Wetter ($S-Q_x$ = Streckenkreuz Richtstrecke und Querschlag x , $S-Q_{x.5}$ = halbe Strecke zwischen Querschlag x und Querschlag $x-1$, Nummerierung der Querschlüge wie bei Einlagerung)	98
Abbildung 6-11:	Temperaturentwicklung in der Mitte der Querschlüge nach Abschalten der Wärmequellen, ohne Kühleffekte der Wetter (Nummerierung der Querschlüge wie bei Einlagerung)	99
Abbildung 6-12:	theoretische Temperaturentwicklung am Standort des Behälters (Einlagerungstrecke 3, Feld Ost 12) nach der Rückholung innerhalb der ersten 100 Jahre nach Beginn der Betriebszeit	99
Abbildung 6-13:	Temperatur und relative Feuchte im Jahresmittel für Deutschland (DWD, 2015)	100
Abbildung 6-14:	Modelle zur Abbildung des Rückholungszeitraumes, (a) Gesamtansicht mit zeitlicher Einordnung, (b) bis (h) Teilmodelle 1 bis 7 mit Darstellung der ursprünglichen Gebirgstemperatur	103
Abbildung 6-15:	Beispiel lokale Verteilung Gebirgstemperaturen im Querschlag Ost 7 (Modell 2)	104
Abbildung 6-16:	Schematische Darstellung des Vortriebes	105
Abbildung 6-17:	Zeitliche Veränderung der Gebirgstemperatur und des Wärmestroms im Umfeld der Auffahrung	105
Abbildung 6-18:	Altersbeiwert als Funktion der Fourier- und Biot-Zahl nach (Voß, 1981), mit angepasster Näherungsfunktion	106
Abbildung 6-19:	zulässige Vortriebslänge pro Schicht in den Richtstrecken und Querschlügen, in Abhängigkeit der zulässigen trocken Temperatur an der Ortsbrust	107
Abbildung 6-20:	Schematische Darstellung einer blasenden Sonderbewetterung der Vortriebe inkl. Wetterkühler und Entstaubungsanlage	109

Abbildung 6-21: Schematische Darstellung einer saugenden Sonderbewetterung der Vortriebe in Kombination mit Wetterkühler und Entstaubungsanlage	109
Abbildung 6-22: Temperaturfeld um die Behälter 12.1.1 (links) und 12.1.14 (rechts) im Modell b zum Beginn der Rückholung (43 Jahre nach Einlagerungsbeginn))	110
Abbildung 6-23: Theoretische Kühlwirkung der Wetter ins Gebirge hinein	111
Abbildung 6-24: Vergleich des Gesamtwärmeeintrags während der Einlagerung und zum Zeitpunkt der Rückholung am schachtnahen Einlagerungsfeld (Modell 1)	112
Abbildung 6-25: Kühlwirkung vom Querschlag in das umgebende Gebirge hinein	113
Abbildung 6-26: links: Temperatur am Behälter in Abhängigkeit der Beladung und des Streckenabstandes, rechts: Temperatur am Stoß der Teilstrecke in Abhängigkeit der Beladung und des Streckenabstandes	115
Abbildung 6-27: Temperatur am Behälter und am Stoß der Teilstrecke für eine Beladung mit 10 BE (DWR) und variierendem Streckenabstand	116
Abbildung 6-28: Beispiel Feld Ost 12, VSG	117
Abbildung 6-29: Temperaturverlauf im Vortrieb bei 36 m Streckenabstand	119
Abbildung 6-30: Temperaturverlauf im Vortrieb mit 40 m Streckenabstand	120
Abbildung 6-31: Temperaturverlauf im Vortrieb mit 44 m Streckenabstand	120
Abbildung 6-32: Temperaturverlauf im Vortrieb mit 50 m Streckenabstand	121
Abbildung 6-33: Generische Modelle der gewählten Konfigurationen mit Gebirgstemperatur zu Beginn der Rückholung	122
Abbildung 6-34: Gesamtenergiebilanz im Vergleich	122
Abbildung 6-35: links: Temperatur an der Behälteroberfläche (OK) in Abhängigkeit der Beladung und des Streckenabstandes, rechts: Gebirgstemperatur am behälternahen Stoß der Teilstrecken, rot markiert: Temperatur bei der gewählten Auslegungskonfiguration 4,5 BE- 36 m Streckenabstand	124
Abbildung 6-36: Temperaturentwicklung an einer Teilstrecke der Rückholungsstrecke nach der Einlagerung und dem Versatz	126
Abbildung 6-37: Aufbau Sonderbewetterung im Vortrieb der Teilstrecken	126
Abbildung 6-38: Erwarteter Temperaturverlauf innerhalb des Vortriebs der Teilstrecke	127
Abbildung 6-39: Kühlwirkung der Wetter an der Ortsbrust	127
Abbildung 6-40: Gesamtwärmebilanz (links) und generisches Modell (rechts)	128
Abbildung 7-1: Bestandteile und Aufbau MOSAIK®-Behälter, (GNS, 2015)	131
Abbildung 7-2: Einlagerungskammer für Brennelementstrukturteile (rot) und Einlagerungskonfiguration, nach (GRS 2012)	132
Abbildung 7-3: Ansatzpunkte der ersten Teilauffahrung zum Freilegen der Behälter	133
Abbildung 7-4: Angepasste Streckenquerschnitte zur Erleichterung der Rückholbarkeit von Behältern für Brennelementstrukturteile	134

Abbildung 7-5: Plateauwagen für MOSAIK®-Behälter, liegender Transport (GRS, 2011a)	136
Abbildung 7-6: Dreidimensionale Darstellung der neuen, befüllten Einlagerungsstrecke, der Teilstrecke zur Rückholung und des verbleibenden Pfeilers mit Nische und Zugangsstrecke	136
Abbildung 9-1: Lebenszyklus eines Endlagers und möglicher Rückholungszeitraum	141
Abbildung 9-2: Schematische Darstellung zum Ablauf der Hauptprozesse während des Rückholungsbetriebes	143
Abbildung 9-3: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte während der aktiven Rückholung der Behälter	145
Abbildung 9-4: Schematische Darstellung zum Ablauf Arbeiten innerhalb eines Einlagerungs-/Rückholungsfeldes	146
Abbildung 9-5: Schematische Darstellung zum Ablauf der eigentlichen Rückholungstätigkeit	147

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Amessungen und Gewicht der modifizierten Einlagerungsvorrichtung in Strecken im Vergleich zum bestehenden Prototyp (ELVIS)	24
Tabelle 4-2	Übersicht über die Betriebsstörungen	46
Tabelle 5-1:	mechanische Materialparameter und Stoffmodelle	72
Tabelle 5-2:	thermische Materialparameter	73
Tabelle 6-1:	Wetterbedarf der verschiedenen Betriebspunkte	92
Tabelle 6-2:	Auswirkungen veränderter Streckenabstände auf die Feldgröße	117
Tabelle 6-3:	Erwartete Temperaturen am Stoß und im Querschnitt der Teilstrecken für unterschiedliche Auslegungskonfigurationen	118
Tabelle 6-4:	Übersicht Kühlleistung je Vortrieb	119
Tabelle 6-5:	Übersicht	124
Tabelle 7-1:	Mögliche Anschlagpunkte zur Entnahme liegender Behälter	134
Tabelle 7-2:	Mögliche Anschlagpunkte zur Entnahme stehender Behälter	135
Tabelle 9-1:	Eigenschaften der berücksichtigten Auslegungskonfigurationen	144
Tabelle 9-2:	Übersicht Zeitbedarf für einzelne Arbeitsschritte im Vergleich zwischen den Auslegungskonfigurationen	147
Tabelle 9-3:	Kostenschätzung zur Rückholung der Streckenlagerung	149

BGE TECHNOLOGY GmbH

Eschenstraße 55

31224 Peine – Germany

T + 49 5171 43-1520

F + 49 5171 43-1506

info@bge-technology.de

www.bge-technology.de