



Grenztemperatur – Prüfung der Machbarkeit in Bezug auf Einlagerungs- und Rückholungsbetrieb

BGE TEC 2023-05



Grenztemperatur – Prüfung der Machbarkeit in Bezug auf Einlagerungs- und Rückholungsbetrieb

BGE TEC 2023-05

Autor(en) Niklas Bertrams
Juliane Leonhard

Datum 05.01.2024

Auftraggeber BGE mbH

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 3 |
| 2 | Vorüberlegungen | 6 |
| 2.1 | Kernaspekte der Machbarkeit | 6 |
| 2.2 | Einfluss der Endlagerauslegung | 6 |
| 2.3 | Fokussierung auf den Rückholungsbetrieb | 7 |
| 2.4 | Initiale Gebirgstemperatur | 8 |
| 2.5 | Wahl von Modellparametern | 8 |
| 3 | Rückholbarkeit im Steinsalz bei 170 °C Grenztemperatur | 9 |
| 3.1 | Stand von F&E | 9 |
| 3.2 | Wettertechnische Bewertung | 14 |
| 3.2.1 | Modellaufbau | 15 |
| 3.2.2 | Modellparameter | 16 |
| 3.2.3 | Auswertung der Simulationsrechnungen | 17 |
| 3.3 | Offenhaltung der Strecken | 18 |
| 3.3.1 | Berechnung der Konvergenz | 18 |
| 3.3.2 | Kriterium der Gebrauchstauglichkeit | 20 |
| 3.3.3 | Auswertung | 21 |
| 3.4 | Ergebnis | 22 |
| 4 | Rückholbarkeit im Tongestein bei 120 °C Grenztemperatur | 24 |
| 4.1 | Stand der F&E | 24 |
| 4.2 | Wettertechnische Bewertung | 26 |
| 4.2.1 | Modellaufbau | 27 |
| 4.2.2 | Modellparameter | 28 |
| 4.2.3 | Auswertung der Simulationsrechnungen | 30 |
| 4.3 | Offenhaltung der Strecken | 31 |
| 4.4 | Ergebnis | 32 |
| 5 | Rückholbarkeit im kristallinen Wirtsgestein bei 100 °C Grenztemperatur | 33 |
| 5.1 | Stand der F&E und Offenhaltung der Strecken | 33 |
| 5.2 | Wettertechnische Bewertung | 34 |
| 5.2.1 | Modellaufbau | 34 |
| 5.2.2 | Modellparameter | 35 |

| | | |
|------------------------------|--------------------------------------|-----------|
| 5.2.3 | Auswertung der Simulationsrechnungen | 36 |
| 5.3 | Ergebnis | 37 |
| Literaturverzeichnis | | 38 |
| Abbildungsverzeichnis | | 40 |
| Tabellenverzeichnis | | 41 |

1 Einleitung

Nach § 27 Abs. 4 StandAG gilt:

„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 °C an der Außenfläche der Behälter ausgegangen.“

Zur Untersuchung einer wissenschaftlich begründeten Festlegung der Grenztemperatur in den verschiedenen Wirtsgesteinen wurden durch die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH (GRS) und die BGE TECHNOLOGY GmbH (BGE TEC) im Auftrag der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) folgende Arbeiten durchgeführt:

- Erarbeitung eines geeigneten wirtsgesteinsspezifischen Temperaturbereichs für die Grenztemperatur aus Sicht der Langzeitsicherheit (GRS)
- Prüfung dieser Grenztemperaturen im Hinblick auf die Machbarkeit des Einlagerungs- und des Rückholungsbetriebs (BGE TEC)

Inhalt dieses Berichts ist die Darstellung von Vorgehensweise und Ergebnissen der Arbeiten der BGE TEC. Es wurden folgende Grenztemperaturen auf Machbarkeit hin untersucht:

- Steinsalz: 170 °C
- Tongestein: 120 °C
- Kristallines Wirtsgestein: 100 °C

Die Wärmeentwicklung der Behälter geht vom radioaktiven Zerfall der Abfälle aus. Während der Betriebszeit des Endlagers, also der Lagerung, dem Transport und der Einlagerung, werden die Behälter durch den Kontakt zu Luft bzw. untertege zu den zirkulierenden Wettern gekühlt. Die Grenztemperatur an der Außenfläche der Behälter wird erst nach der Verfüllung der Hohlräume um den Behälter erreicht. Nach Verfüllung sind die thermischen Eigenschaften der Verfüllmaterialien der Einlagerungsstrecken oder Einlagerungsbohrlöcher sowie das Wirtsgestein bestimend für die Temperaturentwicklung. Eine geringe Wärmeleitfähigkeit von Verfüllmaterial und Gebirge führt zu einem Wärmestau am Behälter; d. h., dass die Grenztemperatur schon bei geringer Wärmeleistung der Endlagergebinde erreicht wird. Andererseits fällt in diesem Fall die Temperatur mit zunehmendem Abstand vom Endlagergebinde stark ab. Eine höhere Wärmeleitfähigkeit erlaubt bei ansonsten gleichen Randbedingungen eine größere Wärmeleistung der Endlagergebinde. Die Temperatur wird sich außerdem in der Umgebung gleichmäßiger verteilen und mit zunehmendem Abstand vom Endlagergebinde weniger stark abfallen.

Mit fortschreitender Einlagerung und Verfüllung wird zunehmend Wärme in das Endlager eingebracht, die von den Endlagergebinden ausgehend eine Temperaturerhöhung im Endlagerbergwerk selbst und im umgebenden Gebirge verursacht. Diese „thermische Phase“ des Endlagerbergwerks beginnt mit der ersten Einlagerung. Sie endet, wenn der radioaktive Zerfall so weit abgeklungen ist, dass die Wärmeentwicklung vernachlässigbar klein wird. Die

Aufheizung der Behälteroberfläche erfolgt nach Verfüllung des umgebenden Hohlraums innerhalb einiger Jahre. Hohe Temperaturen werden voraussichtlich einige hundert Jahre lang auftreten (BGE 2022). Gemäß § 13 Abs. 1 EndlSiAnfV müssen die Behälter „... *bis zum Beginn der Stilllegung des Endlagers rückholbar sein.*“ D. h. eine mögliche Rückholung der Abfälle kann in den aus thermischer Sicht ungünstigsten Zeitpunkt maximaler Aufheizung des gesamten Endlagerbergwerks oder zumindest eines Teils der eingelagerten Abfälle fallen. Die Grenztemperatur kann also zum Zeitpunkt der Rückholung an den Behältern vorliegen. Zur Prüfung der Machbarkeit des Einlagerungs- und des Rückholungsbetriebs ist dieser ungünstigste Zeitpunkt einer möglichen Rückholung zu berücksichtigen.

Die Prüfung der Machbarkeit von Einlagerungs- und Rückholungsbetrieb in Abhängigkeit von der Grenztemperatur erfolgt in zwei Schritten: Nach Vorüberlegungen wird zunächst je Wirtsgestein das bestehende Wissen aus der Forschung und Entwicklung dargestellt. Anschließend erfolgt eine weitere Untersuchung mit dem Ziel, Erkenntnisse möglichst zu verallgemeinern. Abseits der gewählten Grenztemperatur wird dafür auf die Endlagerkonzepte der BGE mbH für die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) zurückgegriffen, insbesondere in Bezug auf die Einlagerungsvarianten nach BGE (2022). Für Steinsalz und für Tongestein wird demnach von Streckenlagerung ausgegangen. Für Kristallingestein wird die vertikale Einlagerung einzelner Behälter nach Vorbild des skandinavischen KBS-3V Konzepts betrachtet.

Eine Machbarkeitsprüfung hat auf den ersten Blick einen absoluten Anspruch und ein Ergebnis, das entweder positiv oder negativ ausfallen soll. Eine zwingende Herleitung nach Vorbild eines mathematischen oder logischen Beweises ist in betrieblichen Fragen jedoch nicht möglich, da theoretisch immer die Möglichkeit besteht, durch höheren technischen Aufwand doch noch zum Ziel zu kommen. Darüber hinaus steht eine Vielzahl von planerischen Entscheidungen und naturwissenschaftlichen Parametern mit Einfluss auf das Ergebnis noch gar nicht fest bzw. ist unbekannt. Nach § 13 Abs. 2 EndlSiAnfV (Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle) ist

„[d]ie Rückholung [...] so zu planen, dass der dafür voraussichtlich erforderliche technische und zeitliche Aufwand den für die Einlagerung erforderlichen Aufwand nicht unverhältnismäßig übersteigt.“

Die Einschätzung der Verhältnismäßigkeit des Aufwands der Rückholung ist mindestens teilweise subjektiv, weil sie auf der fachtechnischen Einschätzung der Autoren beruht. Leitgedanke der Einschätzung ist, dass für die Rückholung ein hoher Aufwand zulässig ist, da sie eine erhebliche ungeplante Störung im Einlagerungsbetrieb oder sogar seinen Abbruch darstellt. Maßstab für den Aufwand ist der aktuelle Stand der Technik, da zukünftige Entwicklungen nicht verlässlich vorhergesagt werden können.

Die Einschätzung der Machbarkeit fokussiert sich, auftragsgemäß, auf solche Aspekte, die von der Grenztemperatur abhängig sind. Eine allgemeine und vollständige Prüfung der Machbarkeit der Rückholung erfolgt nicht. Für die betrieblichen Prozesse wird im Folgenden auf konzeptionelle Überlegungen aus vorhandener Literatur verwiesen, die für alle Wirtsgesteine zu einem grundsätzlich positiven Ergebnis der Umsetzbarkeit kamen.

Der internationale Stand der Wissenschaft und Technik ist nur teilweise von Nutzen für diese Ausarbeitung: Im Steinsalz existiert außerhalb Deutschlands weltweit kein Konzept für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle mit entsprechender Wärmeentwicklung. Im Tongestein sind auf den ersten Blick die Planungen der NAGRA von Interesse, da diese eine ähnliche Einlagerungsvariante wie die BGE in laufenden Arbeiten (Streckenlagerung) verfolgt. Im Rückholungskonzept der NAGRA (Steils 2022) werden die notwendigen betrieblichen Abläufe der Rückholung prinzipiell beschrieben, jedoch werden die thermischen Randbedingungen (bis zu 140 °C an der Oberfläche des Endlagergebides) nur benannt. Ihre Beherrschbarkeit wird nicht weiter untersucht, sondern vorausgesetzt. Damit haben die Arbeiten der NAGRA für die hier vorgenommene Prüfung der Machbarkeit im Hinblick auf eine bestimmte Grenztemperatur keinen unmittelbaren Nutzen. Für die Einschätzung der Rückholbarkeit im kristallinen Wirtsgestein wurde in der verwendeten Literatur auf umfassende internationale und nationale Arbeiten bei zumindest ähnlichen thermischen Verhältnissen zurückgegriffen.

2 Vorüberlegungen

2.1 Kernaspekte der Machbarkeit

Für die Betrachtung der Machbarkeit des Einlagerungs- und Rückholungsbetriebs wird vorausgesetzt, dass alle betrieblichen Abläufe unter den natürlichen thermischen Bedingungen, d. h. ohne Temperaturerhöhung durch eingelagerte radioaktive Abfälle, durchführbar sind. Dementsprechend werden nur Fragestellungen behandelt, die sich auf die erhöhten Temperaturen durch die Einlagerung beziehen. Als Grundlage für die Abschätzung der Temperaturerhöhung dient die jeweilige Grenztemperatur.

Grundsätzlich erscheinen zwei Fragestellungen als wesentlich für die Bewertung der betrieblichen Machbarkeit im Hinblick auf steigende Temperaturen:

1. Ist es möglich, die Strecken über einen ausreichenden Zeitraum zu stabilisieren, um die betrieblichen Arbeiten durchzuführen? Diese Frage ist vor allem gebirgsmechanisch bzw. thermomechanisch zu beantworten.
2. Sind die klimatischen Bedingungen in den Strecken derart, dass sie ein Arbeiten von Personen erlauben? Diese Frage bezieht sich auf die thermisch relevanten Eigenschaften der durchströmenden Wetter und die Einhaltung der KlimaBergV (Bergverordnung zum Schutz der Gesundheit gegen Klimaeinwirkungen).

Die Einschätzung der Machbarkeit basiert damit u. a. darauf, dass Personal gesetzlich in den Bereichen mit erhöhter Temperatur arbeiten darf. Eine Automatisierung oder reine Teleoperation des Rückholungsbetriebs in den Einlagerungsstrecken wird also nicht vorausgesetzt, da diese nach aktuellem Stand der Technik nur schwer vorstellbar ist. Darüber hinaus bestehen aus heutiger Sicht Bedenken gegen die Genehmigungsfähigkeit von Automatisierungen im Umgang mit radioaktiven Stoffen. Der Aufenthalt von Personal sollte also auch vor Ort möglich sein und dient als wichtiges Kriterium für die Einschätzung der Rückholbarkeit. Damit sind die Anforderungen der KlimaBergV nach geltendem Recht einzuhalten. Wenn Personaleinsatz in den Einlagerungsstrecken nicht ausgeschlossen werden kann, ist außerdem zu berücksichtigen, dass deren Tätigkeiten von großer sicherheitstechnischer Bedeutung sind und ein hohes Maß an Exaktheit und Korrektheit in der Ausführung verlangen (z. B. im Interventionsfall). Der Ansatz von klimatischen Bedingungen, die für den Personaleinsatz gerade noch gesetzlich zulässig sind, ist in dieser Hinsicht also eher abdeckend.

2.2 Einfluss der Endlagerauslegung

Während der Endlagerauslegung kann die Einhaltung der Grenztemperatur, also der maximal im Endlagerbergwerk zulässigen Temperatur, über die Einstellung mehrerer Parameter gewährleistet werden:

- die Beladung einzelner Behälter mit wärmeentwickelnden Abfällen zur Verringerung der Wärmeleistung je Endlagergebinde

- Abstände der Endlagergebinde zueinander zur Verringerung von Überlagerungen der Wärmeausbreitung einzelner Endlagergebinde
- Abstände von Strecken oder Bohrlöchern zueinander, die Endlagergebinde mit wärmeentwickelnden Abfällen enthalten; ebenfalls zur Verringerung von Überlagerungen der Wärmeausbreitung einzelner Endlagergebinde

Eine Variation dieser Parameter kann auch bei gleichbleibender Grenztemperatur den technischen Aufwand der Rückholbarkeit beeinflussen. Ideal für die Rückholbarkeit ist das Erreichen der Grenztemperatur durch die Beladung des einzelnen Endlagergebines und die vollständige Vermeidung der Überlagerung der Wärmeausbreitung benachbarter Endlagergebinde. Für diesen Fall werden Behälterabstände bzw. Bohrlochabstände und Streckenabstände möglichst groß gewählt. Das Gebirge und Verfüllmaterial zwischen den Endlagergebinden heizt sich dann vergleichsweise wenig auf. Es sind hohe Temperaturgradienten zwischen Behälteraußenfläche und Gebirge zu erwarten. Eine solche Auslegung kann das Ziel der „Konzentration“ (§10 Abs. 1 EndlSiAnfV) der radioaktiven Abfälle ggf. beeinträchtigen. Weiterhin kann eine solche Auslegung im Widerspruch zu §13 Abs. EndlSiAnfV stehen. Für die Einschätzung der Rückholbarkeit wird eine Endlagerauslegung zugrunde gelegt, die das vorhandene Gebirge im Einlagerungsbereich thermisch möglichst gut ausnutzt und eine kleine Endlagerfläche ergibt. Damit werden die Abfälle im Einlagerungsbereich konzentriert und das Gebirge möglichst wenig geschädigt. Diese Herangehensweise ist in Bezug auf die thermischen Randbedingungen der Rückholbarkeit abdeckend für alle weiteren Auslegungsvarianten.

2.3 Fokussierung auf den Rückholungsbetrieb

Nach BGE (2022) wird davon ausgegangen, dass die Einlagerung „im Rückbau“ stattfindet, d. h. am von den Tageszugängen am weitesten entfernten Ort des Einlagerungsbereichs beginnt und sich dann zu den Tageszugängen hin fortsetzt. Für die Bewertung der Machbarkeit des Einlagerungsbetriebs stellt sich damit die Frage, ob die Ausbreitung der Temperaturerhöhung von den eingelagerten Endlagergebinden aus so schnell stattfindet, dass sie den zu den Tageszugängen fortschreitenden Einlagerungsbetrieb einholt. Wenn die Temperaturerhöhung diesen einholt, wäre zu prüfen, inwieweit die resultierende Temperaturerhöhung die betrieblichen Prozesse beeinflusst. Jedoch können drei Thesen aufgestellt werden, durch die eine Machbarkeitsprüfung des Einlagerungsbetriebs durch den Nachweis der Machbarkeit der Rückholung abgedeckt wird:

1. „Der Beginn des Temperaturanstieges [in den Querschlägen] korreliert jeweils mit dem Beginn der Einlagerung in den [zugehörigen] Einlagerungsfeldern.“ Dies wurde für eine Grenztemperatur von 200 °C im stark wärmeleitenden Steinsalz gezeigt und darf deshalb pauschal für alle zu betrachtenden Grenztemperaturen und Wirtsgesteine angenommen werden (Herold et al. 2018b).
2. Wärmeenergie aus den schon eingelagerten radioaktiven Abfällen eines Einlagerungsfelds, die die bewetterten Strecken (Querschlag und offene Einlagerungsstrecken) erreicht, wird durch die laufende Bewetterung abgeführt.
3. Die thermischen Verhältnisse eines Rückholungsbetriebs, der in stark aufgeheiztes Verfüllmaterial und Gebirge vordringen muss, sind deutlich

anspruchsvoller zu beherrschen als der Einlagerungsbetrieb, bei dem eine Erwärmung gar nicht oder nur langsam einsetzt.

Aufgrund dieser drei Thesen wird im Folgenden nur noch die Machbarkeit des Rückholungsbetriebs geprüft. Wird der Rückholungsbetrieb als machbar eingeschätzt, ist dies auch für den Einlagerungsbetrieb zu erwarten. Für die Prüfung der Machbarkeit des Rückholungsbetriebs wird der ungünstigste thermische Fall betrachtet: die maximale mögliche Aufheizung.

2.4 Initiale Gebirgstemperatur

Neben der Grenztemperatur ist die initiale Gebirgstemperatur ein zusätzlicher Einflussfaktor auf die thermischen Randbedingungen während der Rückholung. Die initiale Gebirgstemperatur bezeichnet die Gebirgstemperatur vor Beginn der Einlagerung. Unabhängig von der Wahl der Grenztemperatur findet ein Teil des Rückholungsbetriebs in einem Bereich statt, der sich durch die Wärmeleistung der radioaktiven Abfälle nicht oder nur wenig aufgewärmt hat. Dies betrifft vor allem den Infrastrukturbereich und Teile der Richtstrecken. Die frischen Wetter zur Kühlung der Rückholungsstrecken im Bereich der ehemaligen Einlagerungsstrecken durchströmen diese vernachlässigbar erwärmten Gebirgsbereiche, bevor sie in den Rückholungsstrecken ankommen. Demnach ergibt sich für die Temperatur der Wetter vor Ort ein Unterschied, ob bis dahin Strecken mit einer Gebirgstemperatur von 20 °C, 30 °C oder sogar 50 °C durchströmt wurden. Je geringer die initiale Gebirgstemperatur ausfällt, desto größer ist der Kühleffekt der frischen Wetter in den Rückholungsstrecken (vorbehaltlich einer weiteren Wetterkühlung). Geringe Grenztemperaturen und geringe initiale Gebirgstemperaturen (und damit geringe Teufen) wirken sich also vorteilhaft auf die Machbarkeit der Rückholung aus. Dieser Aspekt wird durch die Parametrisierung der einströmenden Wetter in den wettertechnischen Modellen berücksichtigt.

2.5 Wahl von Modellparametern

Die Wahl geeigneter Modellparameter ist in hohem Maße entscheidend für das Simulationsergebnis und die Aussagekraft der Modellierung. Aus diesem Grund müssen die einzelnen gewählten Parameter begründet werden. Neben den im Folgenden vorgestellten Referenzwerten werden außerdem für die wesentlichen Einflussfaktoren auf das Ergebnis Variationsrechnungen durchgeführt. In Summe können die Referenzparameter als konservativ angesehen werden. Sie orientieren sich am Zeitpunkt der größten Aufheizung im heißesten Teil des Endlagerbergwerks, sie tendieren zur Überschätzung der angetroffenen Temperatur und sie berücksichtigen bei der Wahl und Auslegung der technischen Mittel (z. B. Kühlleistung) die benötigten Platzverhältnisse. Durch die Durchführung mehrerer Rechnungen mit Parametervariationen ergibt sich ein Gesamtbild, mit dem eine Einschätzung getroffen werden kann. Es werden bei berechneten Werten gerundete Werte verwendet.

3 Rückholbarkeit im Steinsalz bei 170 °C Grenztemperatur

3.1 Stand von F&E

Im Rahmen des Forschungsprojektes ERNESTA (Herold et al. 2018b) wurde unter anderem die Rückholung am Beispiel der Streckenlagerung der „Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben“ untersucht (Abbildung 1). Dieendlagerung im Salzstock Gorleben ging von einer Grenztemperatur von 200 °C aus. Im Vorhaben wurde eine Betriebsdauer von 40 Jahren zugrunde gelegt. Die Dauer der Rückholung wurde mit ebenfalls 40 Jahren angenommen. Um einen abdeckenden Fall zu betrachten, wurde als Rückholungszeitpunkt das Ende der Betriebszeit festgelegt. Zu diesem Zeitpunkt sind alle Behälter eingelagert und versetzt. Hier liegen aufgrund der bis dahin zunehmenden Aufheizung die schwierigsten thermischen Verhältnisse für eine Rückholung vor.

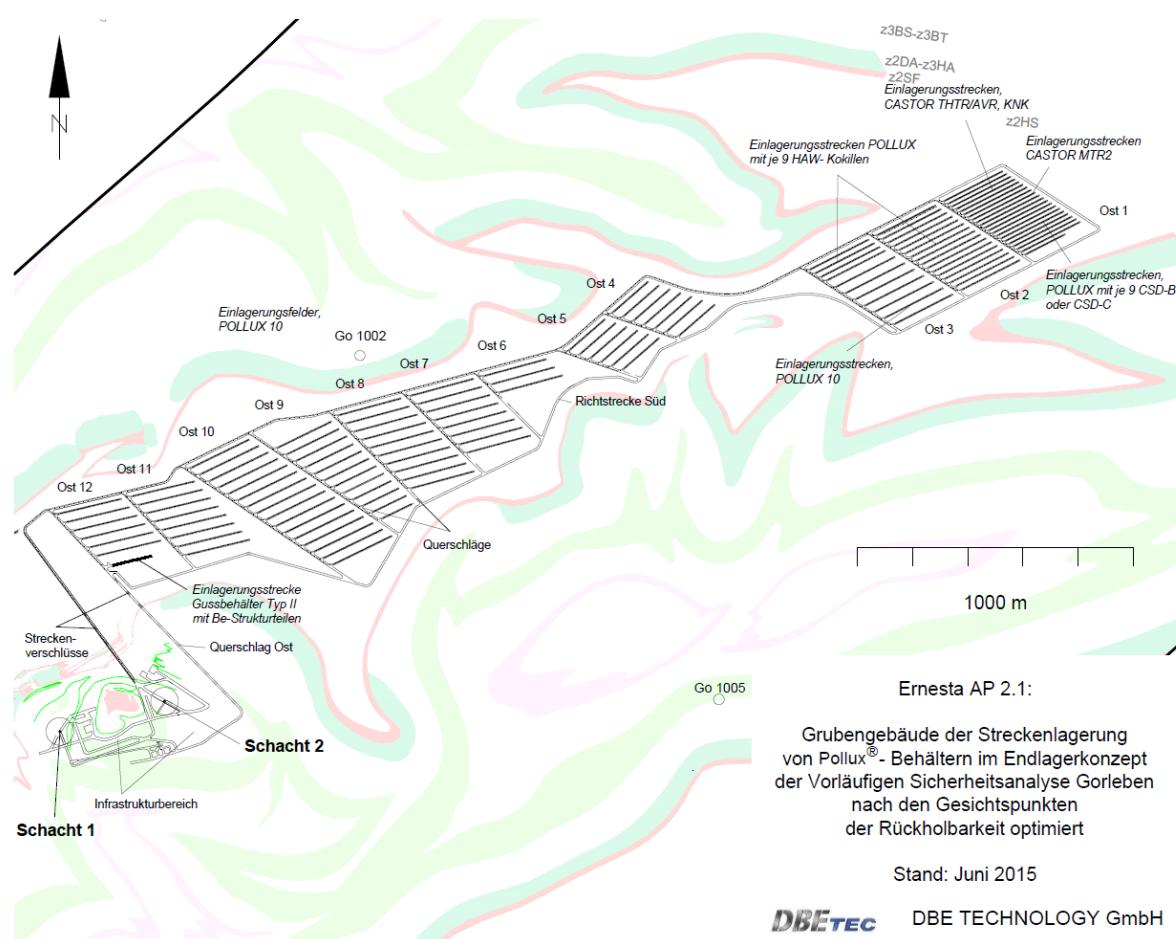


Abbildung 1: Skizze des Endlagerbergswerks der VSG angepasst nach den Anforderungen der Rückholbarkeit (Herold et al. 2018b).

Anhand von Simulationsrechnungen wurde die Temperaturentwicklung innerhalb des Rückholungszeitraumes im Nahbereich der Behälter und im gesamten Grubengebäude über die Zeit ermittelt. Temperaturen in Höhe der Grenztemperatur treten am Behälter und in unmittelbarer Behälternähe auf. Sie fallen in einigen Metern Entfernung deutlich ab, bleiben aber auf hohem Niveau (Abbildung 2).

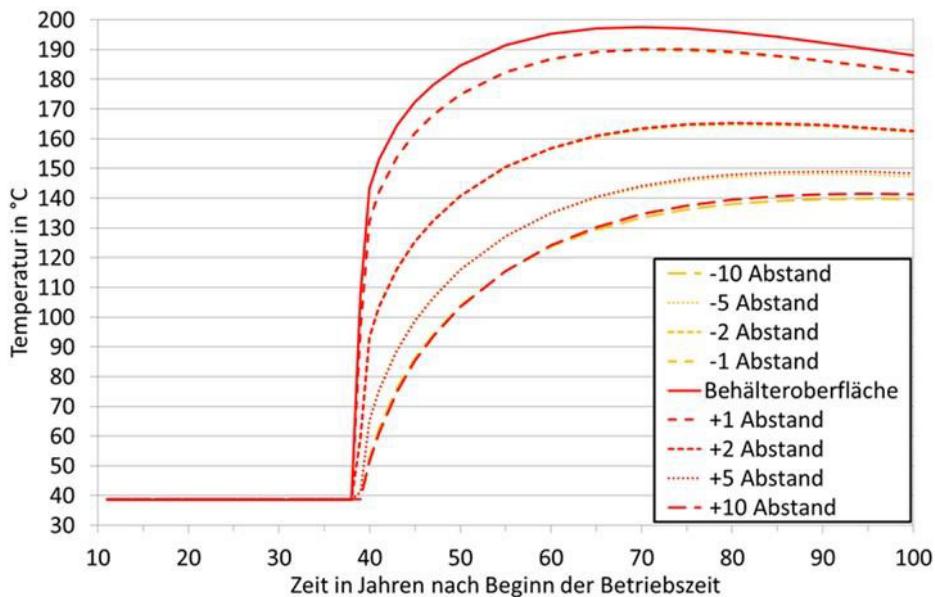


Abbildung 2: maximale Temperaturrentwicklung in verschiedenen horizontalen Abständen zum Endlagerbehälter; Abstand in m (Herold et al. 2018b).

Für die Rückholbarkeit und die damit verpflichtende Betriebssicherheit ist die Wettertechnik und die Möglichkeit der hinreichenden Abkühlung der Wetter entscheidend. In (Herold et al. 2018b) wurden Wetternetzmodelle erstellt, um diese Aspekte zu untersuchen. Die Ergebnisse der vorherigen Simulationsrechnungen zur Temperaturausbreitung dienten als Eingangsgrößen für die Modellierung der Wetter.

Im Zuge der Rückholung müssen die bereits verfüllten Richtstrecken, Querschläge und Einlagerungsstrecken wieder aufgefahren und bewettert werden. Die Wetterführung wird in den neu aufgefahrenen Strecken an erwärmtem Gebirge vorbeigeführt und nimmt dort die entsprechende Wärmemenge auf. Des Weiteren wurden für die Erstellung der Wetternetzmodelle die Temperatur und relative Feuchte im Jahresmittel in Deutschland berücksichtigt, da diese die Temperatur im Endlagerbergwerk vor allem im schachtnahen Bereich beeinflussen und die Wettermenge dementsprechend angepasst werden muss.

Die gesetzlichen Vorgaben für die Arbeitsbedingungen im Salzbergbau unter Tage müssen auch im Sonderfall des Rückholungsbetriebes eingehalten werden:

„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 Feuchttemperatur von mehr als 27 °C dürfen Personen im Salzbergbau nicht mehr beschäftigt werden. (KlimaBergV 1983)“ (Herold et al. 2018b)

Für die Berechnung der Wetternetze und die Klimavorausberechnung wurde die Software VentSim Visual™ 3 verwendet. Die anspruchsvollsten Bereiche für Bewetterung und Kühlung sind die Streckenvortriebe. Die hier eingesetzten Maschinen bringen einen zusätzlichen Wärmeeintrag in die Umgebung mit sich und erhöhen die erforderliche Wetterkühlung. Die Auffahrung der Richtstrecken für die Rückholung wurde in (Herold et al. 2018b) mit ca. drei Jahren angenommen. Zu diesem Zeitpunkt muss dort mit Gebirgstemperaturen von bis zu 76 °C gerechnet werden. In den Querschlägen muss mit über 80 °C Gebirgstemperatur gerechnet werden. Zusätzlich zu diesen hohen Temperaturen ist in den Einlagerungsstrecken mit Temperaturspitzen zu rechnen.

„Die extremen Umgebungsbedingungen sind in Verbindung mit den zusätzlichen Restriktionen der Sonderbewetterung [...] mit konventioneller Technik, wenn überhaupt, nur schwer zu beherrschen. Ziel ist es, über die gesamte Vortriebslänge [...] hinreichend günstige klimatische Bedingungen zu schaffen. Die Endtemperatur der Wetter [...] wird von den verschiedenen Wärmequellen beeinflusst. Der Wärmestrom vom Gebirge zu den Wettern ist an den neu aufgefahrenen Abschnitten (Ortsbrust) am höchsten. Die Einhaltung der Grenzwerte [der KlimaBergV] erfordert neben dem Einsatz zusätzlicher Kühltechnik eine Begrenzung der täglichen Vortriebslänge [...] 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 [pro Tag].“ (Herold et al. 2018b)

Nach (Herold et al. 2018b) soll die Rückholung der Behälter nach dem in Abbildung 3 dargestellten Schema erfolgen. Zunächst erfolgt die Auffahrung zweier Teilstrecken parallel zu den eingelagerten Behältern. Anschließend wird der zwischen den Teilstrecken liegende Pfeiler entfernt, der Behälter freigelegt und entnommen. Die endgültigen Strecken für die Rückholung sind aus diesem Grund breiter als die ursprünglichen Einlagerungsstrecken. Ziel dieser Herangehensweise ist die Kühlung des Endlagergebinde und des sie unmittelbar berührenden Verfüllmaterials durch den Wetterstrom der beiden Teilstrecken.

Im Gegensatz zur Einlagerung befinden sich sämtliche Bereiche der Rückholung vorsorglich innerhalb des Kontrollbereiches. Die einzige Ausnahme ist die Richtstrecke zur Versorgung mit frischen Wettern, die auch schon im Einlagerungsbereich zu diesem Zweck verwendet wurde und somit nie als Kontrollbereich eingestuft worden ist. Als Bewetterungskonzept für die Sonderbewetterung der Vortriebe wurde die saugende Bewetterung der blasenden Bewetterung vorgezogen. Dadurch kann potentiell kontaminierte Luft durch Lutten an der Ortsbrust eingesaugt, auf Radioaktivität gemessen und abgeführt werden.

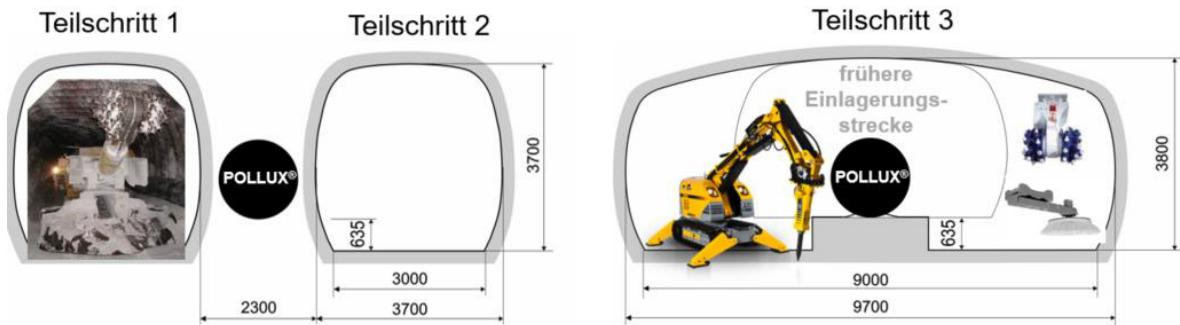


Abbildung 3: Schrittweise Auffahrung der Rückholungsstrecke (Herold et al. 2018b)

Die Kühlung der konturnahen Bereiche der Auffahrung kann durch eine angepasste Auffahrungsgeschwindigkeit beeinflusst werden. Folgende Prognosen für die Temperaturentwicklung ergaben sich aus den Wetternetzmodellen:

„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 [...]“ (Herold et al. 2018b).

Für das in (Herold et al. 2018b) angenommene Endlagermodell inklusive der zugehörigen Beladung und Anordnung der Einlagerungsbehälter ergibt sich aus den Modellberechnungen, dass eine Auffahrung im Bereich der Richtstrecken und Querschläge zwar noch technisch möglich sein kann, jedoch bereits mit hohem kühltechnischen Aufwand verbunden ist. Die Einlagerungsbereiche selber lassen sich von dort aus nicht vorab kühlen. Die Dauer der erforderlichen Abfuhr der Wärme durch eine Kühlung in Stillstandsphasen der Auffahrung wird als so hoch prognostiziert, dass sie in Anbetracht der erwarteten Konvergenzen im Steinsalz und dem damit verbunden Nachschnitt einen Vortrieb nahezu zum Erliegen bringen würden. Dies führt in (Herold et al. 2018b) zu der abschließenden Gesamtbeurteilung, dass eine Rückholung mit der vorausgesetzten Endlagerauslegung und einer Grenztemperatur von 200 °C nicht realisierbar ist. Mögliche Lösungsansätze sind eine geringere Behälterbeladung, mit der der Wärmeeintrag je Behälter gesenkt werden kann, sowie ein größerer Abstand zwischen den Behältern im Endlagerbergwerk, um den Wärmeeintrag gleichmäßiger und in größerem Abstand im Gebirge zu verteilen, vgl. Kapitel 2.2. Zur Annäherung an eine mögliche Grenztemperatur, die im Sinne der Rückholbarkeit noch technisch beherrschbar ist, wurden verschiedene Behälterbeladungen und Streckenabstände untersucht.

Der Einfluss größerer Streckenabstände bezogen auf die Temperaturentwicklung wurde anhand von drei alternativen Streckenabständen 30 Jahre nach Beginn der Einlagerung untersucht. Die maximale Temperatur am Stoß lässt sich über andere Streckenabstände deutlich senken (Tabelle 1). Da alle anderen Parameter beibehalten wurden, geht mit einem größeren Streckenabstand auch eine kleinere Grenztemperatur einher.

Tabelle 1: Temperaturentwicklung mit variierendem Streckenabstand (Herold et al. 2018b)

| Streckenabstand m | Jahre nach Einlagerung | Max. Temperatur am Behälter °C | Maximale Temperatur am Stoß °C |
|-------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 36 | 30 | 185 | 172 |
| 40 | 30 | 179 | 161 |
| 44 | 30 | 177 | 150 |
| 50 | 30 | 175 | 143 |

Die Variation der Streckenabstände und damit der maximal auftretenden Temperaturen im Endlagerbergwerk hat auch maßgebliche Auswirkungen auf die Konvergenz des Steinsalzes (Abbildung 4). Eine hohe Konvergenz hat zwar deutliche Vorteile für den raschen Einschluss der Endlagergebinde nach Einlagerung, für den Rückholungsbetrieb ist schnelle Konvergenz in die Teilstrecken bzw. die Rückholungsstrecke hinein eine zusätzliche Herausforderung, die regelmäßiges Nachschneiden nötig macht. Die Herstellung eines allgemeingültigen funktionalen Zusammenhangs zwischen Grenztemperatur und Konvergenz ist auf Basis von (Herold et al. 2018b) zwar nicht möglich, aber in Abbildung 4 in Zusammenhang mit Tabelle 1 ist deutlich erkennbar, dass eine Reduktion der Temperatur um 10 °C am Behälter (175 °C anstatt 185 °C) schon zu einer deutlichen Reduktion der Konvergenz führen kann.

Neben der Konvergenz wurden auch die Spannungen im konturnahen Gebirge untersucht, die sich durch die Wiederauffahrung und die thermischen Verhältnisse einstellen. Das Gebirge blieb standfest, sodass keine zusätzliche Sicherung (z. B. durch Anker) eingebaut werden musste (Herold et al. 2018b).

Durch entsprechende thermische Auslegung und Überschneiden der notwendigen Streckenkontur bei der Wiederauffahrung lässt sich also die temperaturgetriebene Konvergenz auch noch bei hohen Temperaturen beherrschen, wenn auch nicht bis zu einer Grenztemperatur von 200 °C. Dies gilt zumindest für die in (Herold et al. 2018b) beispielhaft verwendeten Parameter am Beispiel des Salzstocks Gorleben. Zur Betrachtung der Rückholbarkeit in einem (Teil-)Untersuchungsraum wäre zu prüfen, inwieweit sich das Gebirge ähnlich verhält. Trotzdem erlauben die Daten des Salzstocks Gorleben eine erste Einschätzung für das Verhalten von Steinsalz unter diesen Bedingungen für eine Tiefe von bis zu knapp 1.000 m.

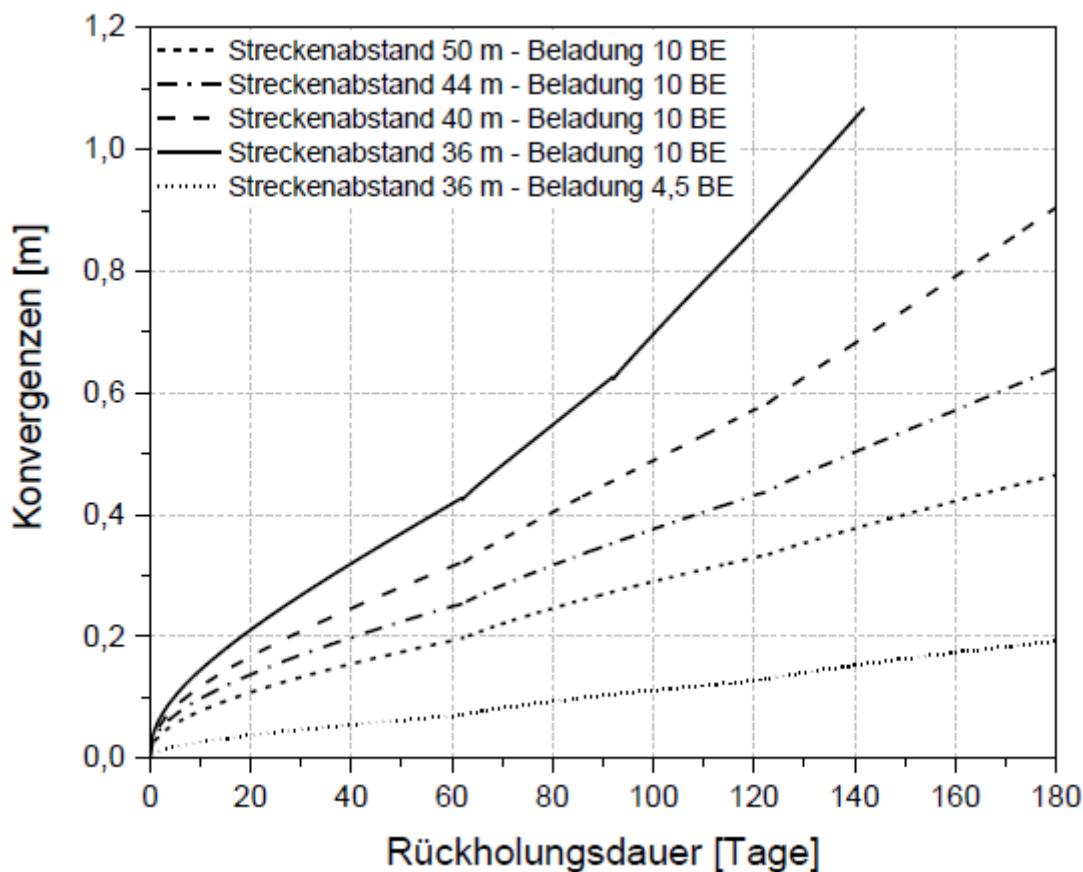


Abbildung 4: Konvergenz im Laufe der Zeit in Abhängigkeit von der Endlagerauslegung (Herold et al. 2018b)

Zusammenfassend kommen die Untersuchungen aus (Herold et al. 2018b) zu dem Ergebnis, dass eine Rückholung im Steinsalz bei einer Grenztemperatur von 200 °C technisch nicht mehr machbar ist. Anpassungen der Streckenabstände sowie veränderte Behälterbeladungen für sinkende Grenztemperaturen werden als mögliche Optimierungsansätze vorgestellt. Die zeitabhängigen Temperaturrentwicklungen im Grubengebäude bzw. Behälternahfeld nach erfolgter Einlagerung verdeutlichen, dass jedoch Spitzentemperaturen für den spätesten möglichen Rückholungszeitraum nur im näheren Umfeld der Endlagergebinde zu erwarten sind. Richtstrecken und Querschläge bleiben innerhalb des technisch machbaren Bereiches, auch wenn ein hoher zusätzlicher technischer Kühlauflwand notwendig ist.

3.2 Wettertechnische Bewertung

Für die Einschätzung der Machbarkeit des Rückholungsbetriebs werden die Abläufe aus Kapitel 3.1, welche im Rahmen (Herold et al. 2018b) erarbeitet wurden, herangezogen. Hier wurde gezeigt, dass für die betriebliche Machbarkeit die klimatischen Bedingungen ein entscheidender Aspekt sind. Maßstab für die betriebliche Machbarkeit aus klimatischer Sicht ist die Einhaltung der Anforderungen der KlimaBergV. Diese Einhaltung wird durch ein wittertechnisches Modell in der Software VentSim™ Design 5 geprüft.

3.2.1 Modellaufbau

Ziel des Modells ist eine möglichst allgemeingültige Aussage über die Machbarkeit der Rückholung bei einer Grenztemperatur im Steinsalz von 170 °C. Aus diesem Grund wird ein Betriebszustand modelliert, der den Rückholungsbetrieb den höchsten Temperaturen aussetzt, die zu erwarten sind. Dieser Fall tritt für das zu Grunde liegende Rückholungskonzept ein, wenn

- die erste Teilstrecke zur Rückholung fast vollständig aufgefahren wurde, aber noch nicht durchschlägig ist;
- noch kein Endlagergebinde rückgeholt wurde und somit alle ihre aktuelle Wärmeleistung weiter abgeben;
- zum Rückholungszeitpunkt im modellierten Bereich das Temperaturmaximum erreicht ist;
- der modellierte Bereich in der Mitte eines Einlagerungsfelds liegt, sodass keine Wärme seitlich ins Gebirge abgeführt werden kann und sich die Ausbreitung von Wärme benachbarter Wärmequellen überlagert.

Bestandteile des Modells sind damit

- eine sonderbewetterte (Teil-)Strecke,
- eine saugende Sonderbewetterung (Lutten und Lüfter),
- der Wetterstrom, der die Strecke betritt, sie durchströmt und durch die Lutten der Sonderbewetterung wieder von der Ortsbrust abgesaugt wird,
- Wärmequellen zur Simulation der Endlagergebinde und Vortriebstechnik,
- eine Wärmesenke („Kältequelle“) zur Simulation einer Wetterkühlung,
- das umliegende Gebirge.

Abbildung 5 zeigt das entsprechende VentSim™ Modell mit diesen Elementen. Das umgebende Gebirge ist nicht sichtbar, sondern wird nur parametrisiert. Der große Abstand der Lutte von der Strecke wurde aus Gründen der Sichtbarkeit gewählt und hat keine relevanten Auswirkungen auf das Modell.

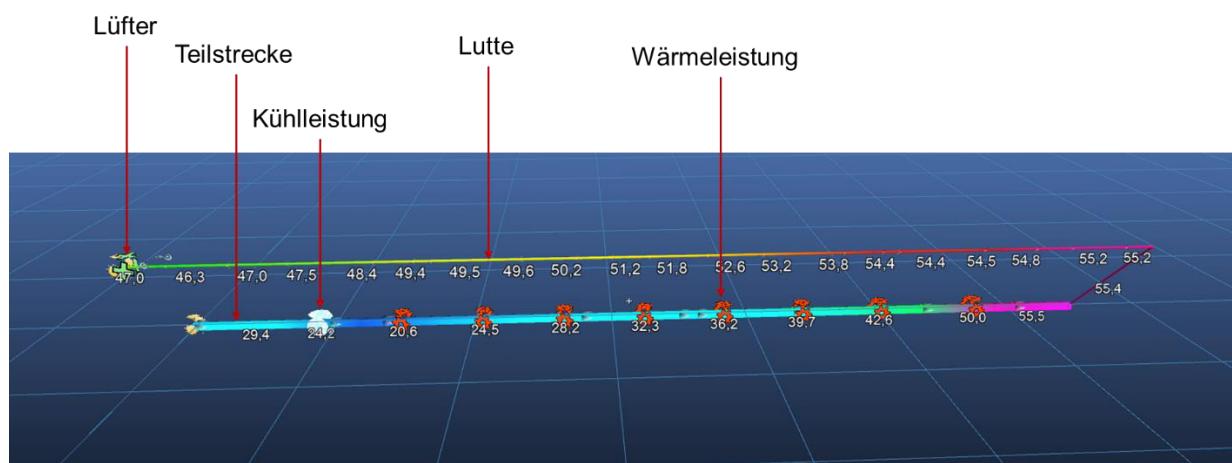


Abbildung 5: VentSim™ Modell

3.2.2 Modellparameter

Parameter der Teilstrecke

Nach (Herold et al. 2018b) wird eine bogenförmige („arched“) Teilstrecke verwendet mit einer Breite und Höhe von 3,7 m. Die Länge der Teilstrecke beträgt 400 m, wobei ein weiteres Streckenelement von 40 m eingesetzt wurde zur Messung der Wettoreigenschaften.

Volumenstrom der Bewetterung

Der Volumenstrom der Bewetterung wird auf 15 m³/s festgelegt. Damit entspricht er dem maximalen Durchsatz einer einzelnen Wetterkühlmaschine (s. Kälteleistung) und ist damit auf diese abgestimmt. Variationsrechnungen mit dem Volumenstrom erfolgen allerdings unabhängig von der Wetterkühlung. Durch die saugende Bewetterung ist der Wetterstrom durch eine entsprechende Anpassung des Lüfters gut zu bewerkstelligen. Dies gilt nicht in gleichem Maße für die wirksame Kälteleistung auf die in die Strecke einströmenden Wetter.

Kälteleistung

Die installierte Kälteleistung einer Wetterkühlmaschine wird auf Basis einer Herstellerrecherche mit 460 kW angegeben. Die tatsächliche Kühlleistung, die auf die einströmenden Wetter wirkt, weicht davon ab, da voraussichtlich nur ein Teilstrom erfasst werden kann. Sie wird mit 70 % von 460 kW, also 320 kW gewählt. Aus Platzgründen wird nur eine Wetterkühlmaschine betrachtet. Variationsrechnungen der Kälteleistung decken eine Bandbreite möglicher Wirkungsgrade ab.

Wärmeleistung Endlagergebinde

Auf der Basis vorhandener Rechnungen zur Endlagerauslegung im Steinsalz für Grenztemperaturen von 150 °C (Bertrams et al. 2020) und 200 °C (Herold et al. 2018b) wird die Wärmeleistung der Endlagergebinde entlang der Teilstrecke abgeschätzt. Hierzu wird eine überschlägige Berechnung mit den thermischen Auslegungsparametern aus den referenzierten Quellen verwendet: der gewählten Beladung der Endlagergebinde, der Endlagergebindelänge und dem Abstand der Endlagergebinde zueinander in der Einlagerungsstrecke (ELS):

$$\text{Wärmeleistung je m ELS} = \frac{\text{Wärmeleistung je BE} \times \text{Anzahl BE je Endlagergebinde}}{\text{Länge Endlagergebinde} + \text{Abstand Endlagergebinde}}$$

Die sich ergebenden Werte von 0,44 °C/m für 150 °C Grenztemperatur und 0,64 °C/m für 200 °C Grenztemperatur werden für 170 °C auf 0,5 °C/m interpoliert. Es wird davon ausgegangen, dass die entsprechend abgegebene Wärme ausschließlich durch den Wetterstrom abgeführt wird.

Wärmeleistung Teilschnittmaschine

Für den Vortrieb kommt eine ausreichend bemessene Teilschnittmaschine zum Einsatz, die nach Herstellerrecherche eine installierte Leistung von ca. 200 kW besitzt. Ca. 70 % davon (also 140 kW) werden in Wärme umgewandelt.

Einströmende Wetter

Durch die Wahl der Eigenschaften der in die Teilstrecke einströmenden Wetter wird unter anderem die initiale Gebirgstemperatur im Einlagerungsbereich bzw. das Durchströmen der Wetter durch schon aufgeheizte Teile des Endlagerbergwerks berücksichtigt. Anstatt hier die gesamte denkbare Bandbreite an Möglichkeiten abzudecken, werden Wettereigenschaften formuliert, die auch für große Teufen einstellbar und für alle Fälle abdeckend sind. Dafür wird festgelegt, dass der Hauptwetterstrom des Rückholungsbergwerks die Anforderungen der KlimaBergV einhalten muss, ohne eine reduzierte Beschäftigungszeit von Personal in diesen Verhältnissen zu erfordern. Für Steinsalz bedeutet dies nach § 3 Abs. 2 KlimaBergV eine maximale Trockentemperatur von 28 °C. Auch in großen Teufen und bei hohen initialen Gebirgstemperaturen kann diese Temperatur durch eine zentrale Wetterkühlung erreicht werden. Die initiale Luftfeuchtigkeit wird aufgrund der hygrokopischen Eigenschaften von Steinsalz mit 50 % angesetzt. Schlussendlich werden die einströmenden Wetter auf eine Temperatur eingestellt, die nach KlimaBergV ohne weitere Einschränkungen maximal zulässig, in allen im Standortauswahlverfahren betrachteten Teufen technisch einstellbar und schließlich für die Einschätzung der Rückholbarkeit abdeckend ist.

Gebirge

Für das Steinsalz werden nach Meleshyn et al. (2016) eine Dichte von 2.150 kg/m³, eine spezifische Wärmekapazität von 880 J/kgK und eine Wärmeleitfähigkeit von 3,5 W/mK angesetzt. Das Alter der Teilstrecke wird mit 60 Jahren festgelegt, um die ehemalige teilweise Funktion als Einlagerungsstrecke abzubilden. Als Gebirgstemperatur wird die Grenztemperatur von 170 °C gewählt, da als Betrachtungszeitpunkt die maximale Aufheizung gewählt wurde und abdeckend von einer homogenen Aufheizung ausgegangen wird.

3.2.3 Auswertung der Simulationsrechnungen

Kriterium für die Beherrschbarkeit der klimatischen Verhältnisse bei der Rückholung ist nach KlimaBergV die Vermeidung von Beschäftigungsverboten innerhalb der Teilstrecke. § 5 Abs. 1 KlimaBergV verhängt diese für Bergbau im Steinsalz ab 52 °C Trockentemperatur oder 27 °C Feuchttemperatur. Ein Personaleinsatz muss in jedem Fall regulatorisch und im Sinne des Arbeitsschutzes möglich bleiben.

Da sich die Wetter entlang der Teilstrecke aufheizen, ist der relevante Messpunkt am Streckenende vor Eintritt der Wetter in die Lutte der Sonderbewetterung. Tabelle 2 zeigt die Simulationsergebnisse für die Trocken- und Feuchttemperatur für den Referenzfall 1 mit den oben vorgestellten Parametern und acht weitere Variationsrechnungen sowie die Bewertung nach KlimaBergV. Die meisten Rechenfälle führen zu Temperaturen oberhalb der zulässigen Grenzwerte. Es zeigt sich jedoch auch, dass eine Erhöhung des Wettervolumenstroms auf 20 m³/s, eine Verringerung der Wärmeleistung der Endlagerergebinde durch eine angepasste thermische Auslegung (z. B. Variation der Beladung oder Vergrößerung der Behälterabstände) oder eine Verringerung der Luftfeuchtigkeit zur Einhaltung der Grenzwerte führen kann. Alle drei Möglichkeiten sind grundsätzlich technisch möglich.

Bei einer Grenztemperatur von 170 °C lassen sich also, mit verhältnismäßig akzeptablem Aufwand, klimatische Verhältnisse einstellen, die unterhalb der Grenzwerte zum

Beschäftigungsverbot der KlimaBergV liegen. Die Bewertung fällt jedoch nur knapp zu Gunsten der Machbarkeit aus.

Tabelle 2: Simulationsergebnisse für eine Grenztemperatur von 170 °C

| Nr | Eingangsdaten | | | | Simulationsergebnisse | | |
|----|---------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------------|---|--|-------------------------|
| | Wetterstrom m³/s | Wärme- leistung kW/m | Kühl- leistung kW | Initiale Luft- feuchte % | Trocken- temperatur °C < 52 °C | Feucht- temperatur °C < 27 °C | Bewertung KlimaBergV |
| 01 | 15 | 0,5 | 320 | 50 | 52,1 | 27,5 | Nicht o.k. |
| 02 | 10 | 0,5 | 320 | 50 | 70,1 | 31,1 | Nicht o.k. |
| 03 | 20 | 0,5 | 320 | 50 | 43,7 | 25,7 | o.k. |
| 04 | 15 | 0,4 | 320 | 50 | 50,0 | 26,9 | o.k. |
| 05 | 15 | 0,6 | 320 | 50 | 54,3 | 28,1 | Nicht o.k. |
| 06 | 15 | 0,5 | 230 | 50 | 54,6 | 28,8 | Nicht o.k. |
| 07 | 15 | 0,5 | 350 | 50 | 51,1 | 27,1 | Nicht o.k. |
| 08 | 15 | 0,5 | 320 | 40 | 50,0 | 26,1 | o.k. |
| 09 | 15 | 0,5 | 320 | 60 | 54,1 | 28,8 | Nicht o.k. |

3.3 Offenhaltung der Strecken

In (Herold et al. 2018b) wurden die grundsätzlichen Bedingungen gezeigt, mit denen die Rückholbarkeit in knapp 900 m Teufe am Beispiel des Salzstocks Gorleben als positiv bewertet werden kann. Im Standortauswahlverfahren sind jedoch auch größere Teufen bis 1.400 m denkbar. Da die Konvergenz im Steinsalz hauptsächlich neben der Temperatur auch vom Gebirgsdruck abhängt, der mit steigender Teufe zunimmt, ist bei vergleichbarer Grenztemperatur mit steigender Teufe mit einer schnelleren Konvergenz zu rechnen. Dementsprechend ist ein Ansatz zu wählen, durch den die Konvergenz in Abhängigkeit von der Grenztemperatur und der Teufe des Einlagerungsbereichs ermittelt werden kann. Diese Konvergenz ist dann gegen ein Kriterium der Gebrauchstauglichkeit zu prüfen, das die Möglichkeit der Offenhaltung der Strecken während des Rückholungsbetriebs bewertet. Der Betriebsablauf mit Auffahrung von Teilstrecken wird wieder aus (Herold et al. 2018b) übernommen.

3.3.1 Berechnung der Konvergenz

Im Gegensatz zu einer numerischen Lösung können mit einem analytischen Verfahren eine Vielzahl von Fällen berechnet werden, ohne die Festlegung von Modellparametern zu erfordern, die vollkommen ungewiss sind. Während numerische Ansätze also für konkrete Berechnungsfälle deutlich genauere Ergebnisse liefern können, bieten sich analytische Ansätze für grobe Abschätzungen an, wenn große Ungewissheiten bestehen. Aufgrund der Vielzahl an Ungewissheiten und dem Anspruch, eine möglichst allgemeingültige Abschätzung vorzunehmen, wird im Folgenden für die Berechnung der temperatur- und druckabhängigen Konvergenz eine analytische Lösung nach Jan Prij (1991) gewählt. Danach wird die volumetrische Konvergenzrate K definiert als

$$K = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \quad \text{Formel 1}$$

mit:

V: Streckenvolumen (m^3)

und berechnet mit

$$K = K^{ss} k(\tau, n) \quad \text{Formel 2}$$

wobei

$$K^{ss} = \sqrt{3} A e^{\frac{-Q}{RT}} \left(\frac{p \sqrt{3}}{n} \right)^n \quad \text{Formel 3}$$

mit

A: Fließfaktor (0,18 1/Tag)

Q: Aktivierungsenergie ($54,21 \times 10^3 \text{ J mol}^{-1}$)

R: Allgemeine Gaskonstante ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

T: Temperatur (K)

p: Gebirgsdruck (MPa)

n: Spannungsexponent (5)

Die angenommenen Werte wurden aus Kock et al. (2012) entnommen. Der Gebirgsdruck errechnet sich nach der grundlegenden Formel

$$p = \rho g h \quad \text{Formel 4}$$

mit

ρ : durchschnittliche Dichte des Gebirges oberhalb des Einlagerungshorizonts (Wahl: 2.200 kg/m^3)

g: Erdbeschleunigung ($9,81 \text{ m/s}^2$)

h: Tiefe unter Geländeoberkante (Teufe; variabel)

Der Term $k(\tau, n)$ wurde über das Abgreifen von 20 Datenpunkten für $n = 5$ (s.o.) approximiert. Die resultierende Funktion lautet:

$$\lg k = \lg k_2 + \frac{(\lg k_1 - \lg k_2)}{1 + e^{\frac{\lg \tau - \lg \tau_0}{\lg d \tau}}} \quad \text{Formel 5}$$

mit

$\lg k_1 = 4,540979$

$\lg k_2 = 0,247673$

$\lg \tau_0 = 0,620064$

$\lg d \tau = 1,524966$

k erhält die Einheit MPa^{-5} .

Die Variable τ stellt hier die Zeit dar, die allerdings normiert vorliegt und definiert wird als

$$d\tau = EAe^{\frac{-q}{RT}} \left(\frac{p\sqrt{3}}{1 - \lambda^{-2}} \right)^{n-1} dt \quad \text{Formel 6a}$$

mit

E: E-Modul von Steinsalz (25.000 MPa nach Kock et al. (2012)).

λ ist hier ein Faktor zur Angabe der Ausdehnung der Steinsalzmächtigkeit in Abhängigkeit von der Hohlraumgröße. Im Betrachtungsfall kann davon ausgegangen werden, dass die Steinsalzmächtigkeit deutlich größer ist als die Hohlraumgröße, weshalb der Nenner $1 - \lambda^{-2}$ für große Werte von λ auf 1 gesetzt werden kann. Die Formel kann also vereinfacht werden zu:

$$d\tau = EAe^{\frac{-q}{RT}} (p\sqrt{3})^{n-1} dt \quad \text{Formel 6b}$$

mit

t: Zeit in Tagen

Somit besteht die Möglichkeit, nach der Zeit aufzulösen.

Mit diesem Formelwerk kann schließlich über die Formel 2 die Konvergenzrate des Steinsalzes in Abhängigkeit von der Teufe (bzw. dem Gebirgsdruck) und der Gebirgstemperatur berechnet werden. Dabei wird für jede Kombination aus Druck und Temperatur ein Wert für K^{ss} und ein Wert von k berechnet. Letzterer ändert sich außerdem über die Zeit.

3.3.2 Kriterium der Gebrauchstauglichkeit

Als Kriterium der Gebrauchstauglichkeit wird betrachtet, wie lange die Teil- und Rückholungsstrecken (Kapitel 3.1) offenstehen müssen und welcher Aufwand bei ihrer Offenhaltung anfällt. Weitere Zugangsstrecken der Rückholung werden zu diesem Zweck nicht betrachtet, da diese im Rückholungsbetrieb so angelegt werden können, dass ihre Konvergenzraten gut beherrschbar bleiben (z. B. durch größeren Abstand zu den Einlagerungsstrecken). Die Wiederauffahrung in direkter Umgebung der Endlagergebinde ist jedoch alternativlos im Fall der Rückholung.

Nach (Herold et al. 2018b) wird die Dauer der Rückholung einer Einlagerungsstrecke auf ca. 150 Tage angesetzt. Der Wert wird hier als Richtgröße für die notwendige Lebensdauer der ersten Teilstrecke verwendet. Die aufgefahrene Rückholungsstrecke, die beide Teilstrecken und die ehemalige Einlagerungsstrecke einschließt, hat eine ungefähre Lebensdauer von 75 Tagen. Zur Bewertung der Gebrauchstauglichkeit der Strecken für die Rückholung wird nun angenommen, dass die Strecken im Laufe ihrer Betriebszeit im Rückholungsbetrieb nachgeschnitten werden müssen, da die Konvergenz des Gebirges das Hohlraumvolumen im Laufe der Zeit so verkleinert, dass ihr Gebrauch für die Rückholung gefährdet wird. Als Kriterien wird angenommen, dass

- die Teilstrecke während 150 Tagen maximal zweimal und
- die Rückholungsstrecke während 75 Tagen nur einmal

nachgeschnitten werden sollte, um Gebrauchstauglichkeit zu gewährleiten. Bei zweimaligem Nachschnitt kann in der Betriebszeit der Strecken ein vorgesehener Überschnitt der Streckenkontur also dreimal, bei einmaligem Nachschnitt zweimal durch die Konvergenz

verloren gehen, bevor die Gebrauchstauglichkeit bedroht ist. Mit einem initialen Überschreiten der Strecken von rund 20 % ergibt sich dann eine zulässige Konvergenzrate von 0,4 % bis 0,5 % pro Tag. Als Kriterium werden 0,45 % pro Tag gewählt. Dieser Wert kann mit den errechneten Konvergenzraten verglichen werden.

3.3.3 Auswertung

Für die Berechnung der Konvergenzraten ist die Gebirgstemperatur entscheidend. Diese hängt zwar von der gewählten Grenztemperatur an der Behälteroberfläche ab, aber ebenso von der Parameterwahl in der Endlagerauslegung (z. B. Hohlraumgröße, Abstände der Endlagergebinde, Streckenabstände) und den Materialeigenschaften (z. B. thermische Eigenschaften des Verfüllmaterials), die teilweise zeitabhängig sind. Aufgrund der fehlenden Festlegung für ein bestimmtes Endlagerkonzept und bestimmte Materialparameter wird die Auswertung zunächst anhand der Gebirgstemperatur erläutert. Zum Ende des Kapitels erfolgt eine Betrachtung des Zusammenhangs mit der Grenztemperatur.

Als erstes wurde die Konvergenzrate für eine Gebirgstemperatur von 170 °C für 1.400 m Teufe berechnet. Hier liegt die Konvergenzrate deutlich über dem Kriterium zur Gebrauchstauglichkeit. Die Machbarkeit der Rückholung wird bei dieser Gebirgstemperatur also negativ bewertet. Die Konvergenzrate ist jedoch nicht nur temperatur-, sondern auch druckabhängig. Durch Reduktion der Teufe verringern sich also die Konvergenzraten. In einer Teufe von 850 m erreicht die Konvergenzrate bei einer Gebirgstemperatur von 170 °C schließlich akzeptable Werte und ein positives Ergebnis der Bewertung der Rückholbarkeit in Bezug auf die Offenhaltung des Hohlraums. Abbildung 6 zeigt Ergebnisse der Berechnungen, die zu dieser Erkenntnis geführt haben.

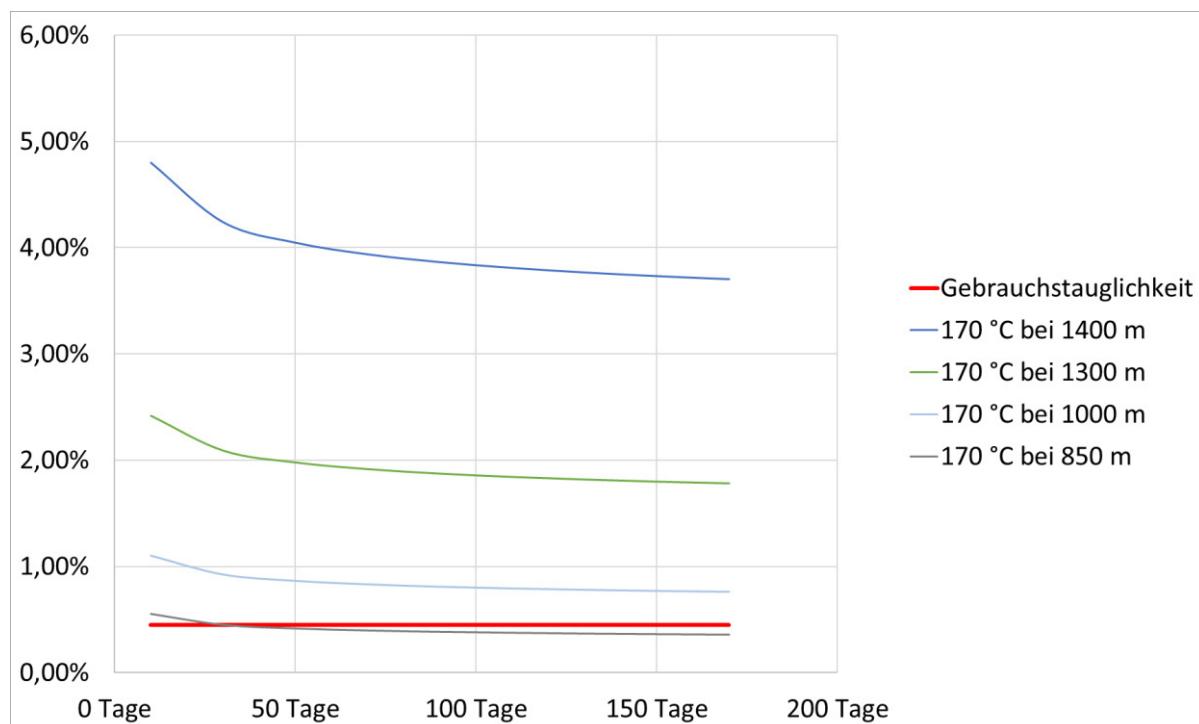


Abbildung 6: Konvergenzraten pro Tag für die Grenztemperatur von 170 °C in verschiedenen Teufen

Um die Frage nach zulässigen Gebirgstemperaturen in Teufen größer als 850 m zu beantworten, wurden weitere Berechnungen angestellt. Die als erfolgreich in Bezug auf die Machbarkeit der Rückholung bewerteten Ergebnisse zeigt Abbildung 7. In grober Näherung können ab 1.000 m Teufe je 100 m zusätzlicher Teufe 10 °C von der zulässigen Gebirgstemperatur abgezogen werden. Bei 1.400 m wird schließlich eine zulässige Gebirgstemperatur von etwa 100 °C erreicht.

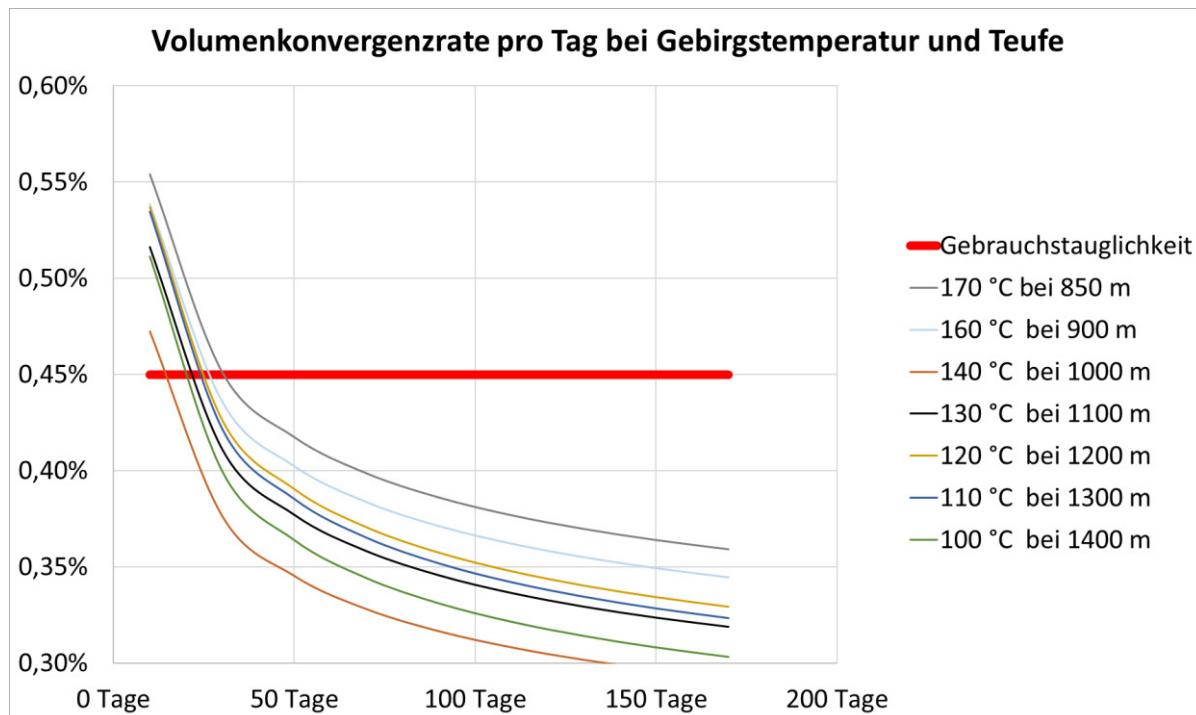


Abbildung 7: Rechenfälle mit akzeptablen Konvergenzraten in Abhängigkeit von Teufe und Gebirgstemperatur

Die Gebirgstemperatur entspricht jedoch nicht der Grenztemperatur. Nach (Herold et al. 2018b) ist für ein konkretes Beispiel bekannt, dass einerseits das Gebirge deutlich kühler bleibt als die Behälteroberfläche und andererseits das Gebirge nicht homogen aufgeheizt wird, sondern die Temperatur ins Gebirge hinein abfällt. Überschlägig ist zu erwarten, dass eine Grenztemperatur von 170 °C eine Gebirgstemperatur in der näheren Umgebung der Strecke von etwa 130 °C bis 150 °C erwirkt.

Dies stellt die Machbarkeit der Rückholung in Bezug auf die Offenhaltung der Strecken ab einer Teufe von etwa 1.000 m in Frage, da ab 1.000 m Teufe bei solchen Gebirgstemperaturen die Gebrauchstauglichkeit der Strecken in Frage steht.

3.4 Ergebnis

Auf Basis der vorangegangenen Überlegungen ergeben sich zwei wesentliche temperaturspezifische Herausforderungen in Bezug auf die Rückholbarkeit von Endlagergebinden im Wirtsgestein Steinsalz, die in Streckenlagerung mit einer Grenztemperatur von 170 °C eingelagert wurden:

- temperaturgetriebene Konvergenz und thermomechanisch verursachte Instabilität der Streckenkontur der wieder bzw. neu aufgefahrenen Strecken
- klimatische Verhältnisse im Rückholungsbetrieb in der Nähe der Endlagerergebinde

Die Beherrschung dieser Herausforderungen ist teilweise technisch machbar durch:

- Ausbaumaßnahmen während der Rückholung (Ankerung), falls Druck- und Temperaturverhältnisse die Stabilität der Kontur beeinträchtigen;
- Überschneiden und evtl. Nachschneiden des Streckenquerschnitts aufgrund der durch hohe Temperatur beschleunigten Konvergenz;
- Einstellung eines ausreichenden Volumenstroms der Wetter;
- Sicherstellung einer geringen Luftfeuchtigkeit der Wetter, was sich im Steinsalz auf natürlichem Weg einstellen sollte;
- Sicherstellung möglichst geringer Trocken- und Feuchttemperaturen der Wetter durch eine zusätzliche technische Kühlung (z. B. im Hauptwetterstrom des Endlagerbergwerks).

Außerdem, aber nicht zwangsläufig im Sinne einer für die Langzeitsicherheit optimierten Endlagerauslegung:

- Entsprechende Wahl der Parameter bei der Endlagerauslegung (ohne Änderung der Grenztemperatur; vorteilhaft erscheinen eine hohe Behälterbeladung mit großen Behälter- und Streckenabständen, sodass Versatz und Pfeiler zwischen Behältern und Strecken vergleichsweise kühl bleiben)

In Teufen größer als 1.000 m ist zu erwarten, dass der Rückholungsbetrieb durch die temperatur- und druckgetriebene Konvergenz erhebliche Schwierigkeiten erfährt, die seine Machbarkeit in Frage stellen. Hier ist empfehlenswert, diesen Effekt schon in der Endlagerauslegung zu berücksichtigen, die Endlagerauslegung anzupassen und/oder die Grenztemperatur zu verkleinern.

4 Rückholbarkeit im Tongestein bei 120 °C Grenztemperatur

4.1 Stand der F&E

Für Tongestein wurde im Rahmen des ERNESTA Projektes (Herold et al. 2018a) ebenfalls die Machbarkeit einer Rückholung untersucht. Als Modell für ein Grubengebäude (Abbildung 8) wurde das Referenzmodell Süd, welches auch in Lommerzheim & Jobmann (2015) verwendet wurde, angenommen. Die Eigenschaften des Tongesteins entsprachen den damals verfügbaren Daten für Opalinuston (Maßmann 2016). Im Vorhaben wurde eine Betriebsdauer von 40 Jahren zugrunde gelegt. Die Dauer der Rückholung wurde mit ebenfalls 40 Jahren angenommen.

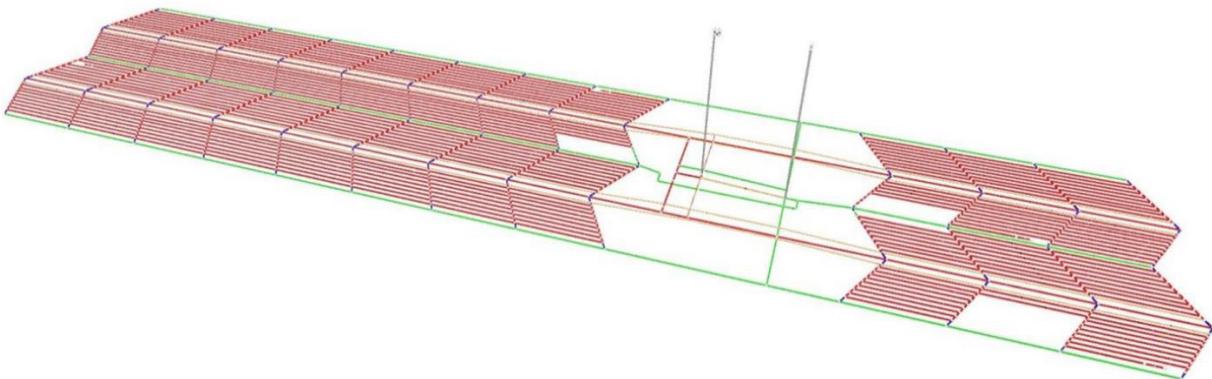


Abbildung 8: Grubengebäude für die Streckenlagerung von POLLUX®-3 Behältern (Jobmann & Lommerzheim 2015)

Die Einlagerungstechnik entspricht mit leichten Anpassungen derjenigen, die auch für die Streckenlagerung im Steinsalz vorgesehen ist. Der Prozess der Rückholung unterscheidet sich jedoch. Aufgrund der im Tongestein anspruchsvolleren gebirgsmechanischen Verhältnisse wurde in (Herold et al. 2018a) darauf geachtet, die Pfeiler zwischen den Einlagerungsstrecken während der Rückholung möglichst nicht zu schädigen sondern die Wiederauffahrung soweit möglich innerhalb der ausgebauten Bereiche des vorhandenen Endlagerbergwerks durchzuführen. Abbildung 9 zeigt den entsprechenden Rückholungsprozess innerhalb einer Einlagerungsstrecke für die Rückholung eines einzelnen Behälters mit beispielhafter Wahl der Baumaschinen und Rückholungstechnik.



Abbildung 9: Ablauf der Rückholung in der Streckenlagerung im Tongestein (Herold et al. 2018a)

Lommerzheim & Jobmann (2015) wählten eine Grenztemperatur von 150 °C. Diese wird anhand der Modellierungen bereits innerhalb der Betriebszeit erreicht und sinkt im Anschluss wieder ab (Abbildung 10). Mit zunehmendem Abstand vom Behälter sinkt die Temperatur außerdem aufgrund der vergleichsweise geringen Wärmeleitfähigkeit des Tongesteins deutlich ab (ebenfalls Abbildung 10).

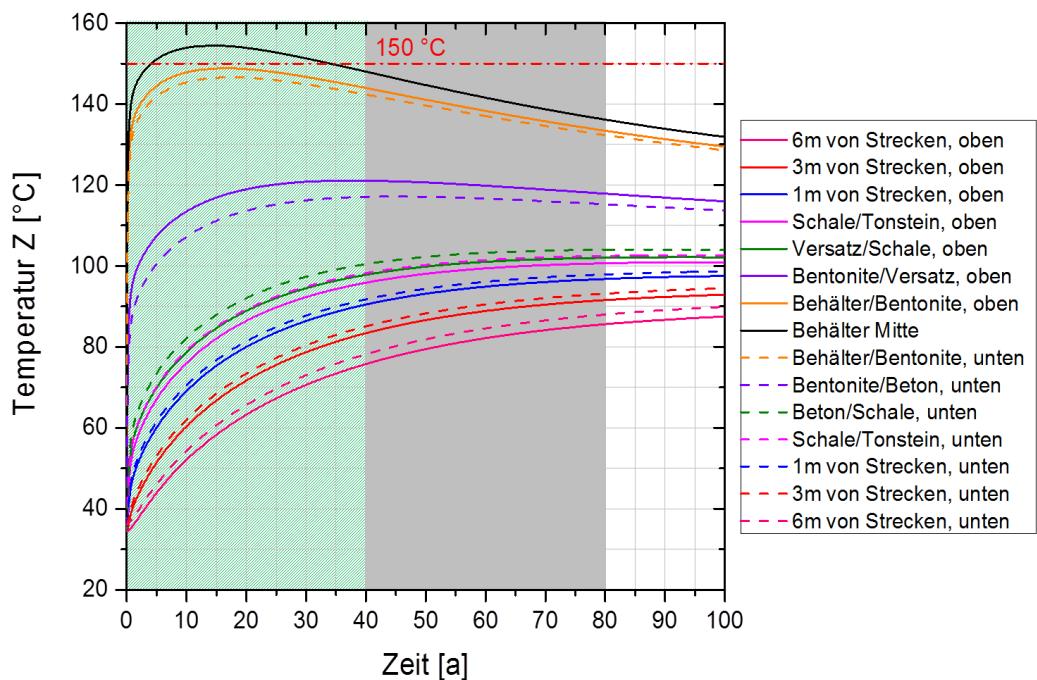


Abbildung 10: Temperaturrentwicklung radial zur Behälterachse, grün = Betriebszeit, grau = möglicher Rückholungszeitraum (Herold et al. 2018a)

In (Herold et al. 2018a) wurde im Anschluss an die thermische Simulation ein wettertechnisches Modell erstellt. Dafür wurde an den Behälterablageorten eine durchschnittliche Temperatur von 140 °C zum Zeitpunkt der Rückholung angenommen.

Die Effektivtemperatur im Bereich des Vortriebes bei der Wiederauffahrung wurde mit 34 °C ermittelt. Durch eine zusätzliche Wetterkühlung konnte diese auf einen zulässigen Wert von unter 30 °C nach KlimaBergV gesenkt werden. Mit Einsatz der Wetterkühlung ergab sich, dass die Rückholung mit hohem technischen Aufwand möglich ist.

4.2 Wettertechnische Bewertung

Die Untersuchungen aus (Herold et al. 2018a) schlussfolgern, dass eine Grenztemperatur von 150 °C zwar kühletechnisch anspruchsvoll, aber dennoch machbar ist. Im Rahmen der Eingangsgrößen für das exemplarisch betrachtete Einlagerungsszenario in (Herold et al. 2018a) kann also angenommen werden, dass eine geringere Grenztemperatur von 120 °C damit als ebenfalls machbar bewertet werden kann. Dies ist jedoch teufenunabhängig zu zeigen. Zur Prüfung wird ein wettertechnisches Modell in der Software VentSim™ Design 5 erstellt, um eine Grenztemperatur von 120 °C zu simulieren und zum Steinsalz vergleichbare Kriterien anzuwenden. Grundlage des Modells sind die Rückholungsprozesse aus (Herold et al. 2018a).

4.2.1 Modellaufbau

Ziel des Modells ist eine möglichst allgemeingültige Aussage über die Machbarkeit der Rückholung bei einer Grenztemperatur im Tongestein von 120 °C. Aus diesem Grund wird ein Betriebszustand modelliert, der den Rückholungsbetrieb den höchsten Temperaturen aussetzt, die zu erwarten sind. Dieser Fall tritt für das zu Grunde liegende Rückholungskonzept ein, wenn

- die Rückholung in der Einlagerungsstrecke am letzten Endlagergebinde angekommen ist, also die maximale Länge aufgeheizten Gebirges von den Wettern durchströmt wird;
- zum Rückholungszeitpunkt im modellierten Bereich das Temperaturmaximum erreicht ist;
- der modellierte Bereich in der Mitte eines Einlagerungsfeldes liegt, sodass keine Wärme seitlich ins Gebirge abgeführt werden kann.

Bestandteile des Modells sind damit

- eine sonderbewetterte Strecke,
- saugende Sonderbewetterung (Lutten und Lüfter),
- der Wetterstrom, der die Strecke betritt, sie durchströmt und durch die Lutten der Sonderbewetterung wieder von der Ortsbrust abgesaugt wird,
- Wärmeleistungsquellen zur Simulation eines einzelnen, verbleibenden Endlagergebines und der Vortriebstechnik,
- eine Kälteleistungsquelle zur Simulation einer Wetterkühlung,
- das umliegende Gebirge.

Abbildung 11 zeigt das entsprechende VentSim™ Modell mit diesen Elementen. Das umgebende Gebirge ist nicht sichtbar, sondern wird nur parametrisiert. Der große Abstand der Lutte von der Strecke wurde aus Gründen der Sichtbarkeit gewählt und hat keine relevanten Auswirkungen auf das Modell.

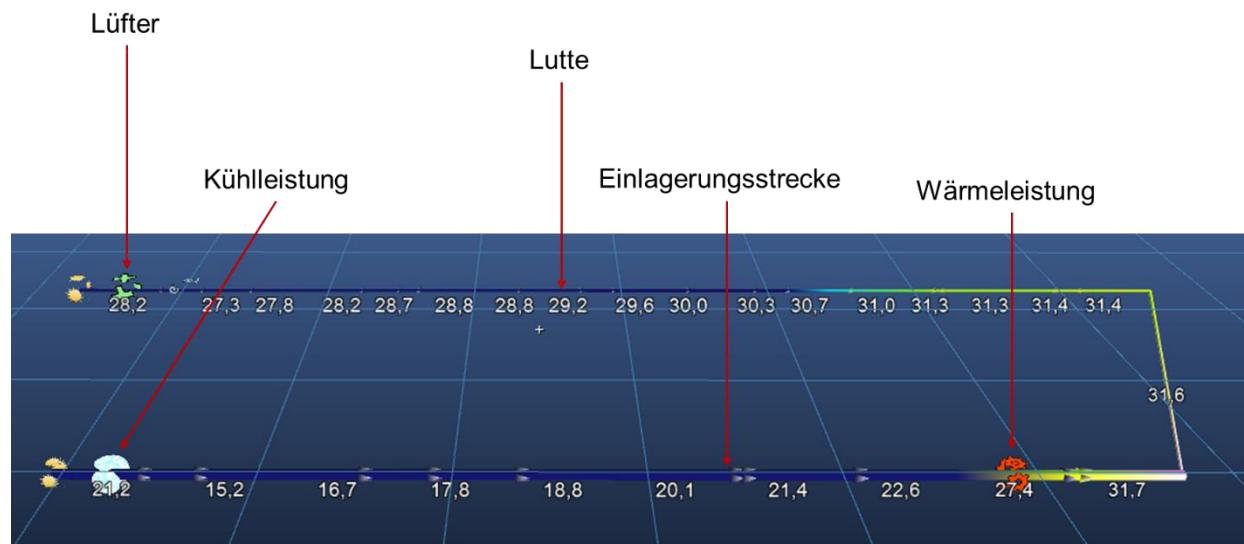


Abbildung 11: VentSim™ Modell

4.2.2 Modellparameter

Parameter der Teilstrecke

Nach aktuellen Arbeiten der BGE zur Endlagerauslegung wird als Einlagerungsstrecke ein kreisförmiger Querschnitt mit einem Durchmesser von 3,5 m verwendet. Die Länge der Strecke beträgt 400 m, wobei ein weiteres Streckenelement von 40 m eingesetzt wurde zur Messung der Wettereigenschaften. Innerhalb des kreisrunden Querschnitts ist die Sohlauffüllung zur Herstellung des Fahrwegs für die Berechnung der Querschnittsfläche des Wetterwegs abzuziehen (Abbildung 12).

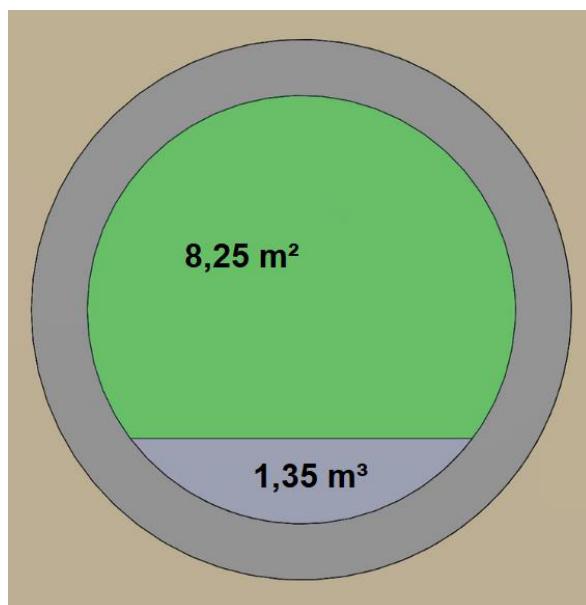


Abbildung 12: CAD Modell des Streckenquerschnitts der Einlagerungsstrecke mit Flächenangaben für den lichten Querschnitt und den Fahrweg

Volumenstrom der Bewetterung

Der Volumenstrom der Bewetterung wird im Basisfall auf $15 \text{ m}^3/\text{s}$ festgelegt. Damit entspricht er dem maximalen Durchsatz einer einzelnen Wetterkühlmaschine (s. Kälteleistung) und ist damit auf diese abgestimmt. Variationsrechnungen mit dem Volumenstrom erfolgen allerdings unabhängig von der Wetterkühlung. Durch die saugende Bewetterung ist der Wetterstrom durch eine entsprechende Anpassung des Lüfters gut zu bewerkstelligen. Dies gilt nicht in gleichem Maße für die wirksame Kühlleistung auf die in die Strecke einströmenden Wetter.

Kälteleistung

Die installierte Kälteleistung einer Wetterkühlmaschine wird auf Basis einer Herstellerrecherche mit 460 kW angegeben. Die tatsächliche Kühlleistung, die auf die einströmenden Wetter wirkt, weicht davon ab, da voraussichtlich nur ein Teilstrom erfasst werden kann. Sie wird mit 70 % von 460 kW, also 320 kW gewählt. Aus Platzgründen wird nur eine Wetterkühlmaschine betrachtet. Variationsrechnungen der Kälteleistung decken eine Bandbreite möglicher Wirkungsgrade ab.

Wärmeleistung Endlagerergebinde

Auf der Basis vorhandener Rechnungen zur Endlagerauslegung im Tongestein für Grenztemperaturen von 100 °C (Alfarra et al. 2020b) und 150 °C (Alfarra et al. 2020a) wird die Wärmeleistung des Endlagergerbindes entlang des relevanten Streckenabschnitts abgeschätzt. Hierzu wird eine überschlägige Berechnung mit den thermischen Auslegungsparametern aus den referenzierten Quellen verwendet: der gewählten Beladung des Endlagergerbindes, der Endlagergerbindelänge und dem Abstand der Endlagergerbinde zueinander in der Einlagerungsstrecke (ELS):

$$\text{Wärmeleistung je m ELS} = \frac{\text{Wärmeleistung je BE} \times \text{Anzahl BE je Endlagergerbinde}}{\text{Länge Endlagergerbinde} + \text{Abstand Endlagergerbinde}}$$

Die sich ergebenden Werte von 0,11 °C/m für 100 °C Grenztemperatur und 0,19 °C/m für 150 °C Grenztemperatur werden für 120 °C auf 0,14 °C/m interpoliert. Es wird davon ausgegangen, dass die entsprechend abgegebene Wärme nahezu ausschließlich durch den Wetterstrom abgeführt wird.

Wärmeleistung Teilschnittmaschine

Für den Vortrieb kommt eine ausreichend bemessene Teilschnittmaschine zum Einsatz, die nach Herstellerrecherche eine installierte Leistung von ca. 185 kW besitzt. Ca. 70 % davon (also 130 kW) werden in Wärme umgewandelt.

Einströmende Wetter

Durch die Wahl der Eigenschaften der in die Teilstrecke einströmenden Wetter wird u. a. die initiale Gebirgstemperatur im Einlagerungsbereich bzw. das Durchströmen der Wetter durch schon aufgeheizte Teile des Endlagerbergwerks berücksichtigt. Anstatt hier die gesamte denkbare Bandbreite an Möglichkeiten abzudecken, werden Wettereigenschaften formuliert, die auch für große Teufen einstellbar und für alle Fälle abdeckend sind. Dafür wird festgelegt, dass der Hauptwetterstrom des Rückholungsbergwerks die Anforderungen der KlimaBergV einhalten muss, ohne eine reduzierte Beschäftigungszeit von Personal in diesen Verhältnissen zu erfordern. Für Bergbau außerhalb des Salzbergbaus bedeutet dies nach § 3 Abs. 2 KlimaBergV eine maximale Trockentemperatur von 28 °C oder eine Effektivtemperatur von 25 °C. Auch in großen Teufen und hohen initialen Gebirgstemperaturen kann diese Temperatur durch eine zentrale Wetterkühlung erreicht werden. Da Tongestein keine hygrokopischen Eigenschaften besitzt, wird die Luftfeuchtigkeit im Basisfall mit einem für Deutschland typischen Wert von 70 % angenommen. Schlussendlich werden die einströmenden Wetter auf eine Temperatur eingestellt, die nach KlimaBergV ohne weitere Einschränkungen maximal zulässig, in allen im Standortauswahlverfahren betrachteten Teufen technisch einstellbar und schließlich für die Einschätzung der Rückholbarkeit abdeckend ist.

Gebirge

Für das Wirtsgestein werden keine thermischen Parameter angesetzt, da davon ausgegangen wird, dass im Tongestein die Streckenkontur durch mehrere Dezimeter Beton ausgebaut wurde. Demnach werden typische thermische Parameter für Beton angenommen: eine Dichte von 2 450 kg/m³, eine spezifische Wärmekapazität von 1.000 J/kgK und eine Wärmeleitfähigkeit von 2,1 W/mK (BauNetz 2023). Das Alter der Teilstrecke wird mit 60 Jahren festgelegt, um die ehemalige teilweise Funktion als Einlagerungsstrecke abzubilden. Als Gebirgstemperatur wird die Grenztemperatur von 120 °C gewählt, da als Betrachtungszeitpunkt die maximale Aufheizung gewählt wurde und abdeckend von einer homogenen Aufheizung ausgegangen wird. Dieser Wert überschätzt die tatsächlich auftretenden Verhältnisse auch deshalb, weil der durchströmte Teil der Einlagerungsstrecke, aus dem die Endlagerergebinde bereits rückgeholt wurden, durch die dauerhafte Bewetterung abkühlt.

4.2.3 Auswertung der Simulationsrechnungen

Kriterium für die Beherrschbarkeit der klimatischen Verhältnisse bei Rückholung ist nach KlimaBergV die Vermeidung von Beschäftigungsverboten innerhalb der Teilstrecke. § 4 Abs. 1 KlimaBergV verhängt diese für Bergbau außerhalb des Salzbergbaus ab 30 °C Effektivtemperatur (für die Definition der Effektivtemperatur siehe DIN 33403-3). Ein Personaleinsatz muss in jedem Fall regulatorisch und im Sinn des Arbeitsschutzes möglich bleiben.

Da sich die Wetter entlang der Strecke aufheizen, ist der relevante Messpunkt am Streckenende vor Eintritt der Wetter in die Lutte der Sonderbewetterung. Tabelle 3 zeigt die Simulationsergebnisse für die Effektivtemperatur für den Referenzfall 1 mit den oben vorgestellten Parametern und 8 weitere Variationsrechnungen sowie die Bewertung nach KlimaBergV. Zur Nachvollziehbarkeit der Effektivtemperatur werden Trocken-, Feuchttemperatur und Wettergeschwindigkeit mit angegeben. Die Ermittlung der Effektivtemperatur erfolgte über das Yaglou-Diagramm nach DIN 33403-3.

Alle Rechenfälle führen zur Einhaltung des Grenzwerts. Besonders wirksam zur Verringerung der Effektivtemperatur sind die Erhöhung der Wettermenge und die Reduzierung der Luftfeuchtigkeit. Bei einer Grenztemperatur von 120 °C lassen sich also, mit verhältnismäßig akzeptablem Aufwand, klimatische Verhältnisse einstellen, die unterhalb der Grenzwerte zum Beschäftigungsverbot der KlimaBergV liegen.

Tabelle 3: Simulationsergebnisse für eine Grenztemperatur von 120 °C

| Nr | Eingangsdaten | | | | Simulationsergebnisse | | | | |
|----|--------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------|--|-------------------------|
| | Wetter- strom m³/s | Wärme- leistung kW/m | Kühl- leistung kW | Initiale Luft- feuchte % | Trocken- temp. °C | Feucht- temp. °C | Wetter- geschw. m/s | Effektiv- temperatur (< 30 °C) °C | Bewertung KlimaBergV |
| 01 | 15 | 0,14 | 320 | 70 | 35,3 | 24,1 | 1,7 | 27,2 | o.k. |
| 02 | 10 | 0,14 | 320 | 70 | 42,3 | 24,7 | 1,2 | 29,8 | o.k. |
| 03 | 20 | 0,14 | 320 | 70 | 32,1 | 23,9 | 2,3 | 25,5 | o.k. |
| 04 | 15 | 0,1 | 320 | 70 | 35,2 | 24,1 | 1,7 | 27,0 | o.k. |
| 05 | 15 | 0,2 | 320 | 70 | 35,5 | 24,1 | 1,7 | 27,2 | o.k. |
| 06 | 15 | 0,14 | 230 | 70 | 37,0 | 25,4 | 1,7 | 28,4 | o.k. |
| 07 | 15 | 0,14 | 350 | 70 | 34,8 | 23,6 | 1,7 | 26,8 | o.k. |
| 08 | 15 | 0,14 | 320 | 60 | 33,5 | 22,5 | 1,7 | 26,0 | o.k. |
| 09 | 15 | 0,14 | 320 | 80 | 37,1 | 25,6 | 1,7 | 28,6 | o.k. |

4.3 Offenhaltung der Strecken

Die Bewertung der Offenhaltung der Strecken im Tongestein ist im Wesentlichen eine gebirgsmechanische Herausforderung. Dabei ist die Bandbreite von Festigkeitseigenschaften der Tongesteine sehr groß und reicht von unverfestigtem Gestein wie Boom-Clay bis hin zu relativ standfesten Gesteinen wie dem Opalinuston. Fragestellungen, die sich durch die Wahl der Grenztemperatur ergeben, treten dabei vor den allgemeinen Fragen der gebirgsmechanischen Beherrschung von Tongestein während der Rückholung in den Hintergrund. Diese sind vor allem:

- Welche Art von Ausbau wird verwendet?
- Wie verhalten sich Gebirge und Ausbau mechanisch nach Verfüllung des Hohlraums?
- Wie wirkt sich die Temperaturerhöhung durch die Einlagerung auf das Ausbausystem und das Gebirge aus?
- Evtl. sind auch hydraulische Aspekte (Fluiddruck) zu berücksichtigen.

Die Antworten auf diese Fragen unterscheiden sich je nach Tongestein und Teufe. Die Beurteilung der Machbarkeit der Rückholung und die Auswirkung einer Grenztemperatur auf diese hängt also maßgeblich von der Planung des Endlagerbaus ab und ist auf Grund der großen Bandbreite der Tongesteine hier nicht pauschal zu entscheiden. Grundsätzlich kann angenommen werden, dass ein tragender Ausbau aus (Stahl-)Beton durch die Temperaturerhöhung nach Verfüllung des Hohlraums thermomechanische Spannungen erfährt, die ihn deutlich schädigen können.

Abseits davon zeigt (Herold et al. 2018a) für eine Grenztemperatur von 150 °C, dass nach Wiederauffahrung und beginnender Wetterkühlung eine deutliche Abkühlung des Gebirges erfolgt. Bei einer Grenztemperatur von 120 °C ist zu erwarten, dass sich relativ zügig Gebirgstemperaturen von weniger als 80 °C einstellen werden und nur lokale Temperaturspitzen an den Endlagergebinden selbst zu erwarten sind. Damit werden thermische Verhältnisse erreicht, die im tiefen Gewinnungsbergbau nachweisbar beherrscht wurden (Schacke 2009).

4.4 Ergebnis

Auf Basis der vorangegangenen Überlegungen ergibt sich eine wesentliche temperaturspezifische Herausforderung in Bezug auf die Rückholbarkeit von Endlagergebinden im Wirtsgestein Tongestein, die in Streckenlagerung mit einer Grenztemperatur von 120 °C eingelagert wurden:

- klimatische Verhältnisse im Rückholungsbetrieb in der Nähe der Endlagergebinde

Die Beherrschung dieser Herausforderungen ist vor allem machbar durch:

- Einstellung eines ausreichenden Volumenstroms der Wetter (Sonderbewetterung)
- Kühlung und Trocknung der Wetter des Hauptwetterstroms des Rückholungsbergwerks

5 Rückholbarkeit im kristallinen Wirtsgestein bei 100 °C Grenztemperatur

5.1 Stand der F&E und Offenhaltung der Strecken

Für die Rückholbarkeit im kristallinen Wirtsgestein liegen Erkenntnisse aus dem F&E Projekt KOREKT (Herold et al. 2020) vor. Hier wurden ebenfalls Simulationen zur Wärmeausbreitung und zur Bewetterung durchgeführt. Die grundlegenden Eigenschaften des Endlagerbergwerks wurden aus Bertrams et al. (2017) und Becker et al. (2020) entnommen. Im Gegensatz zu den anderen Wirtsgesteinen wurde nach Vorbild der skandinavischen Endlagerplanungen die Rückholung aus vertikaler Bohrlochlagerung untersucht. Relevant für die Bewertung der Rückholbarkeit sind vor allem die thermischen Verhältnisse in der Einlagerungsstrecke oberhalb der Bohrlöcher, da hier die wesentlichen Arbeiten stattfinden. Aufgrund des Abstands des Arbeitsbereichs von den eingelagerten Abfällen lässt sich pauschal konstatieren, dass aus thermischer Sicht die Rückholung aus Bohrlöchern einfacher ist als aus Strecken.

Die Auslegung des Endlagers aus Bertrams et al. (2017) und Becker et al. (2020) erfolgte mit einer Grenztemperatur von 100 °C und eine Tiefe von ca. 600 m. Für die Prüfung der Rückholbarkeit wurde in Herold et al. (2020) modelliert, wie sich die Temperatur im Nahfeld des Einlagerungsbohrlochs nach Einlagerung verändert. Mit den gewählten Parametern der Endlagerauslegung betragen die maximalen Temperaturen nach der Einlagerung an der Streckenknotur zwischen 70 °C und 80 °C (Abbildung 13 und Abbildung 14). Diese Temperaturen wurden im Gewinnungsbergbau, z. B. im Steinkohlebergbau, bereits unter Einhaltung der KlimaBergV beherrscht (Schacke 2009). Darüber hinaus kann kristallines Wirtsgestein als sehr standfest und wenig temperaturempfindlich gelten. Damit steht auch die Machbarkeit der Offenhaltung der Strecken nicht in Frage.

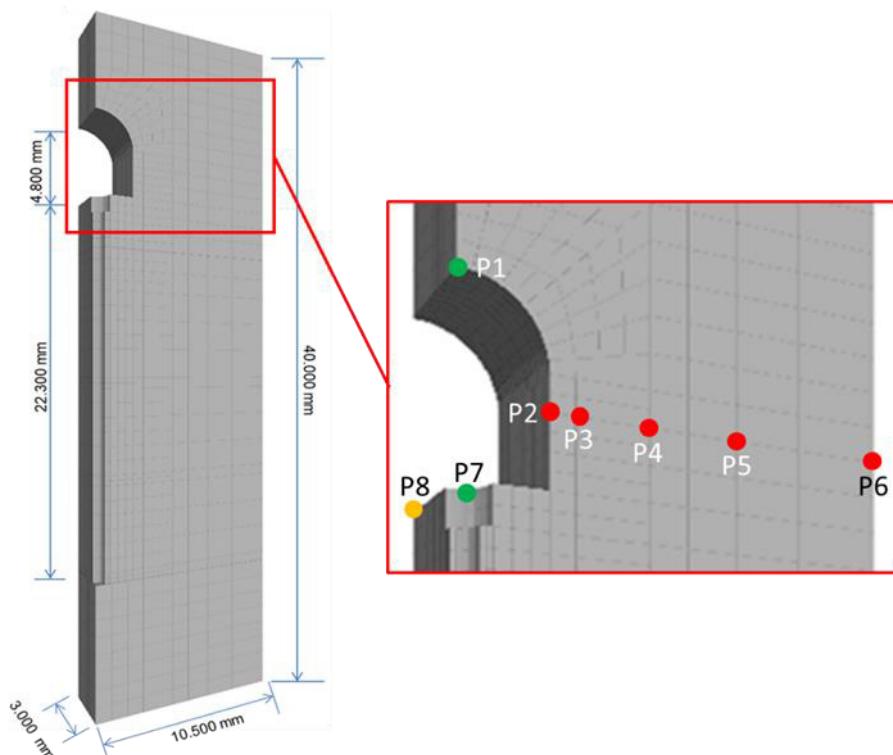


Abbildung 13: Modellaufbau für Beobachtungspunkte der Temperaturentwicklung (Herold et al. 2020)

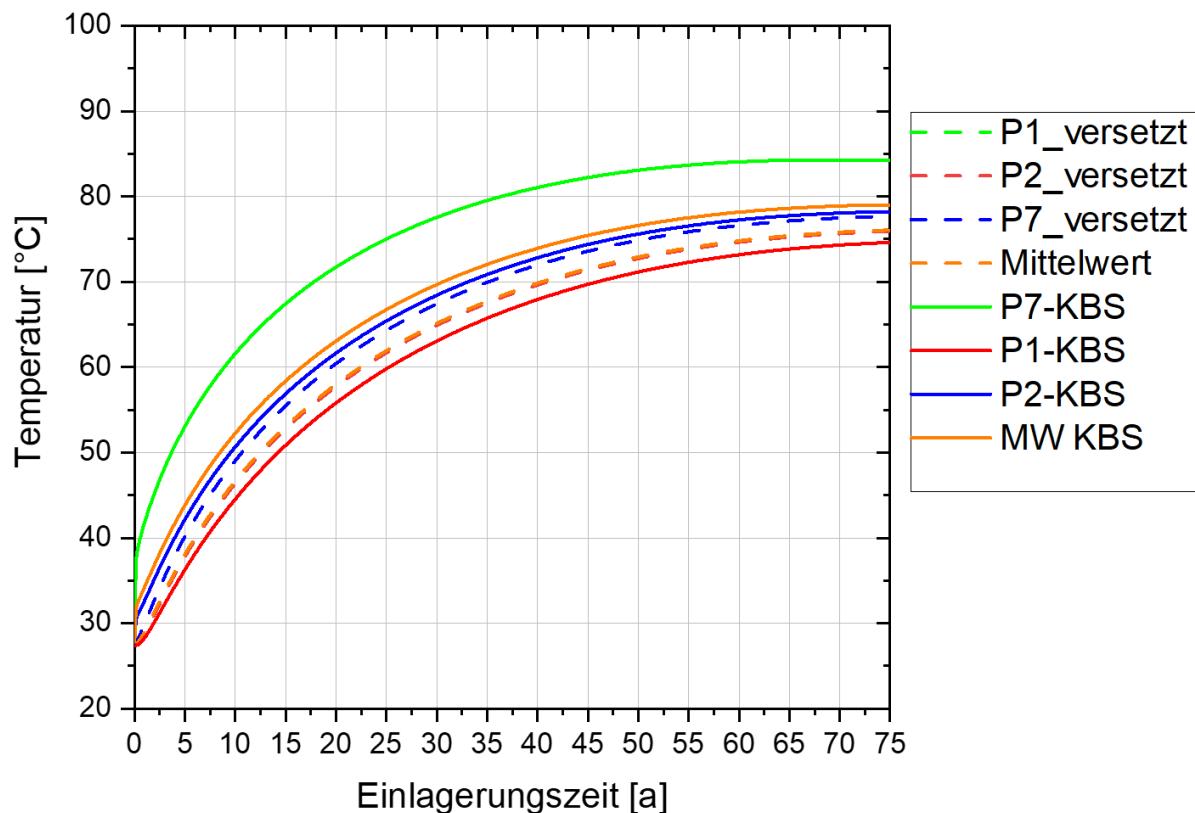


Abbildung 14: Temperaturrentwicklung innerhalb der versetzten Strecke oberhalb des Einlagerungsbohrlochs (Herold et al. 2020)

5.2 Wettertechnische Bewertung

Um eine allgemeingültige Aussage zur Beherrschbarkeit der wettertechnischen Bedingungen (auch in Teufen größer als 600 m) zu erhalten, wird auch im kristallinen Wirtsgestein ein wettertechnisches Modell in der Software VentSim™ Design 5 erstellt. Grundlage des Modells sind die Rückholungsprozesse aus Herold et al. (2018).

5.2.1 Modellaufbau

Ziel des Modells ist eine möglichst allgemeingültige Aussage über die Machbarkeit der Rückholung bei einer Grenztemperatur im kristallinen Wirtsgestein von 100 °C. Aus diesem Grund wird ein Betriebszustand modelliert, der den Rückholungsbetrieb den höchsten Temperaturen aussetzt, die zu erwarten sind. Dieser Fall tritt für das zu Grunde liegende Rückholungskonzept ein, wenn

- die Einlagerungsstrecke oberhalb der Bohrlöcher fast vollständig aufgefahren wurde;
- zum Rückholungszeitpunkt im modellierten Bereich das Temperaturmaximum erreicht ist;
- der modellierte Bereich in der Mitte eines Einlagerungsfelds liegt, sodass keine Wärme seitlich ins Gebirge abgeführt werden kann.

Bestandteile des Modells sind damit

- eine sonderbewetterte Strecke,
- saugende Sonderbewetterung (Lutten und Lüfter),
- der Wetterstrom, der die Strecke betritt, sie durchströmt und durch die Lutten der Sonderbewetterung wieder von der Ortsbrust abgesaugt wird,
- eine Kälteleistungsquelle zur Simulation einer Wetterkühlung,
- das umliegende Gebirge.

Im Gegensatz zu den Modellen für Tongestein und Steinsalz wird auf die Modellierung der Endlagergebinde als Wärmequellen verzichtet, da diese deutlich unterhalb der modellierten Strecke liegen. Sie werden über die Wahl der Gebirgstemperatur abgebildet. Der Modellaufbau ist damit optisch identisch zum Tongestein. Das Modell wird jedoch anders parametrisiert.

5.2.2 Modellparameter

Parameter der Teilstrecke

Nach aktuellen Arbeiten zur Endlagerauslegung im Rahmen der rvSU wird eine Einlagerungsstrecke in Bogenform („arched“) mit 3,5 m Breite und 4,5 m Höhe angesetzt. Die Länge der Strecke beträgt 400 m, wobei ein weiteres Streckenelement von 40 m eingesetzt wurde zur Messung der Wettereigenschaften.

Volumenstrom der Bewetterung

Der Volumenstrom der Bewetterung wird im Basisfall auf 15 m³/s festgelegt. Damit entspricht er dem maximalen Durchsatz einer einzelnen Wetterkühlmaschine (s. Kälteleistung) und ist damit auf diese abgestimmt. Variationsrechnungen mit dem Volumenstrom erfolgen allerdings unabhängig von der Wetterkühlung. Durch die saugende Bewetterung ist der Wetterstrom durch eine entsprechende Anpassung des Lüfters gut zu bewerkstelligen. Dies gilt nicht in gleichem Maße für die wirksame Kühlleistung auf die in die Strecke einströmenden Wetter.

Kälteleistung

Die installierte Kälteleistung einer Wetterkühlmaschine wird auf Basis einer Herstellerrecherche mit 460 kW angegeben. Die tatsächliche Kühlleistung, die auf die einströmenden Wetter wirkt, weicht davon ab, da voraussichtlich nur ein Teilstrom erfasst werden kann. Sie wird mit 70 % von 460 kW, also 320 kW gewählt. Aus Platzgründen wird nur eine Wetterkühlmaschine betrachtet. Variationsrechnungen der Kälteleistung decken eine Bandbreite möglicher Wirkungsgrade ab.

Wärmeleistung Teilschnittmaschine

Für den Vortrieb kommt eine ausreichend bemessene Teilschnittmaschine zum Einsatz, die nach Herstellerrecherche eine installierte Leistung von ca. 185 kW besitzt. Ca. 70 % davon (also 130 kW) werden in Wärme umgewandelt.

Einströmende Wetter

Durch die Wahl der Eigenschaften der in die Teilstrecke einströmenden Wetter wird u. a. die initiale Gebirgstemperatur im Einlagerungsbereich bzw. das Durchströmen der Wetter durch

schon aufgeheizte Teile des Endlagerbergwerks berücksichtigt. Anstatt hier die gesamte denkbare Bandbreite an Möglichkeiten abzudecken, werden Wettgereigenschaften formuliert, die auch für große Teufen einstellbar und für alle Fälle abdeckend sind. Dafür wird festgelegt, dass der Hauptwetterstrom des Rückholungsbergwerks die Anforderungen der KlimaBergV einhalten muss, ohne eine reduzierte Beschäftigungszeit von Personal in diesen Verhältnissen zu erfordern. Für Bergbau außerhalb des Salzbergbaus bedeutet dies nach § 3 Abs. 2 KlimaBergV eine maximale Trockentemperatur von 28 °C oder eine Effektivtemperatur von 25 °C. Auch in großen Teufen und bei hohen initialen Gebirgstemperaturen kann diese Temperatur durch eine zentrale Wetterkühlung erreicht werden. Da kristallines Wirtsgestein keine hygrokopischen Eigenschaften besitzt, wird die Luftfeuchtigkeit im Basisfall mit einem für Deutschland typischen Wert von 70 % angenommen. Schlussendlich werden die einströmenden Wetter auf eine Temperatur eingestellt, die nach KlimaBergV maximal zulässig, in allen im Standortauswahlverfahren betrachteten Teufen technisch einstellbar und schließlich für die Einschätzung der Rückholbarkeit abdeckend ist.

Gebirge

Für das Wirtsgestein werden typische thermische Parameter für Granit angenommen: eine Dichte von 2.700 kg/m³, eine spezifische Wärmekapazität von 882 J/kgK und eine Wärmeleitfähigkeit von 3 W/mK (z.B. s. Bertrams et al. (2017)). Das Alter der Teilstrecke wird mit 60 Jahren festgelegt, um die ehemalige teilweise Funktion als Einlagerungsstrecke abzubilden. Als Gebirgstemperatur wird die Grenztemperatur von 100 °C gewählt, da als Betrachtungszeitpunkt die maximale Aufheizung gewählt wurde und abdeckend von einer homogenen Aufheizung ausgegangen wird. Dieser Wert überschätzt die tatsächlich auftretenden Verhältnisse (Kapitel 5.1).

5.2.3 Auswertung der Simulationsrechnungen

Kriterium für die Beherrschbarkeit der klimatischen Verhältnisse bei Rückholung ist nach KlimaBergV die Vermeidung von Beschäftigungsverboten innerhalb der Teilstrecke. § 4 Abs. 1 KlimaBergV verhängt diese für Bergbau außerhalb des Salzbergbaus ab 30 °C Effektivtemperatur (für die Definition der Effektivtemperatur siehe DIN 33403-3). Ein Personaleinsatz muss in jedem Fall regulatorisch und im Sinn des Arbeitsschutzes möglich bleiben.

Da sich die Wetter entlang der Strecke aufheizen, ist der relevante Messpunkt am Streckenende vor Eintritt der Wetter in die Lutte der Sonderbewetterung. Tabelle 4 zeigt die Simulationsergebnisse für die Effektivtemperatur für den Referenzfall 1 mit den oben vorgestellten Parametern und 6 weitere Variationsrechnungen sowie die Bewertung nach KlimaBergV. Zur Nachvollziehbarkeit der Effektivtemperatur werden Trocken-, Feuchttemperatur und Wettergeschwindigkeit mit angegeben. Die Ermittlung der Effektivtemperatur erfolgte über das Yaglou-Diagramm nach DIN 33403-3.

Fast alle Rechenfälle führen zur Einhaltung des Grenzwerts. Der Fall mit der Bewertung „Nicht o.k.“ und die Fälle mit Temperaturen knapp unter 30 °C Effektivtemperatur zeigen die Bedeutung, ausreichende Bewetterungsmengen zu gewährleisten und hohe Luftfeuchtigkeit zu vermeiden. Bei einer Grenztemperatur von 100 °C lassen sich also, mit verhältnismäßig

akzeptablem Aufwand, klimatische Verhältnisse einstellen, die unterhalb der Grenzwerte zum Beschäftigungsverbot der KlimaBergV liegen.

Tabelle 4: Simulationsergebnisse für eine Grenztemperatur von 100 °C

| Nr | Eingangsdaten | | | | Simulationsergebnisse | | | | Bewertung KlimaBergV |
|----|--------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------|--|------------|-------------------------|
| | Wetter- strom m³/s | Kühl- leistung kW | Initiale Luft- feuchte % | Trocken- temp. °C | Feucht- temp. °C | Wetter- geschw. m/s | Effektiv- temperatur (< 30 °C) °C | | |
| 01 | 15 | 320 | 70 | 37,4 | 24,9 | 1 | 28,5 | o.k. | |
| 02 | 10 | 320 | 70 | 45,3 | 25,9 | 0,7 | 31,0 | Nicht o.k. | |
| 03 | 20 | 320 | 70 | 33,7 | 24,5 | 1,3 | 27,0 | o.k | |
| 06 | 15 | 230 | 70 | 39,0 | 26,2 | 1 | 29,9 | o.k | |
| 07 | 15 | 350 | 70 | 36,9 | 24,5 | 1 | 28,1 | o.k | |
| 08 | 15 | 320 | 60 | 35,6 | 23,4 | 1 | 27,5 | o.k | |
| 09 | 15 | 320 | 80 | 39,2 | 26,3 | 1 | 29,9 | o.k | |

5.3 Ergebnis

Aus thermischer Sicht lässt sich die Rückholbarkeit im kristallinen Wirtsgestein bei Bohrlochlagerung und 100 °C Grenztemperatur positiv bewerten. Abseits der wettertechnischen Bedingungen, die eine ausreichende und gekühlte Bewetterung verlangen, werden keine weiteren wesentlichen Herausforderungen in der Rückholbarkeit gesehen, die von der Grenztemperatur abhängen.

Literaturverzeichnis

- Alfarra, A.; Bertrams, N.; Bollingerfehr, W.; Eickemeier, R.; Flügge, J.; Frenzel, B.; Maßmann, J.; Mayer, K.-M.; Mönig, J.; Mrugalla, S.; Müller-Hoeppen, N.; Reinhold, K.; Rübel, A.; Schubarth-Engelschall, N.; Simo, E.; Thiedau, J.; Thiemeyer, T.; Weber, J. R.; Wolf, J. (2020a): *RESUS: Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Tongesteinsformation geringerer Mächtigkeit bei einer höheren Auslegungstemperatur*. GRS-273. ISBN 978-3-947685-59-2. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Köln
- Alfarra, A.; Bertrams, N.; Bollingerfehr, W.; Eickemeier, R.; Flügge, J.; Frenzel, B.; Maßmann, J.; Mayer, K.-M.; Mönig, J.; Mrugalla, S.; Müller-Hoeppen, N.; Reinhold, K.; Rübel, A.; Schubarth-Engelschall, N.; Simo, E.; Thiedau, J.; Thiemeyer, T.; Weber, J. R.; Wolf, J. (2020b): *RESUS: Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Tongesteinsformation geringerer Mächtigkeit*. GRS-572. ISBN 978-3-947685-58-5. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Köln
- BauNetz (2023): *Normalbeton / Beton / Betonarten / Baunetz_Wissen*. Zugriff am: 18.09.2023. Verfügbar unter <https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/betonarten/normalbeton-150994>
- Becker, D.-A.; Bertrams, N.; Bollingerfehr, W.; Frenzel, B.; Krumpholz, M.; Maßmann, J.; Mayer, K.-M., Mönig, J.; Müller-Hoeppen, N.; Reinhold, K.; Rübel, A.; Schubarth-Engelschall, N.; Simo, E.; Thiedau, J.; Weber, J. R.; Wolf, J. (2020): *Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Kristallingesteinsformation mit Einschluss der Radionuklide durch technische und geotechnische Barrieren*. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Köln
- Bertrams, N.; Bollingerfehr, W.; Eickemeier, R.; Fahland, S.; Flügge, J.; Frenzel, B.; Hammer, J.; Kindlein, J.; LIU, W.; Maßmann, J.; Mayer, K.-M.; Mönig, J.; Mrugalla, S.; Müller-Hoeppen, N.; Reinhold, K.; Rübel, A.; Schubarth-Engelschall, N.; Simo, E.; Thiedau, J.; Thiemeyer, T.; Weber, J. R.; Wolf, J. (2020): *RESUS: Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in flach lagernden Salzformationen bei einer höheren Auslegungstemperatur*. GRS-570. ISBN 978-3-947685-56-1. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Köln
- Bertrams, N.; Herold, P.; Herold, M.; Krone, J.; Lommerzheim, A.; Prignitz, S.; Simo Kuate, E. (2017): *Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärme- entwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland Abschlussbericht*. TEC-20-2017-AB. DBE TECHNOLOGY GmbH. Peine
- BGE (2022): *Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH.
- Herold, P.; Bertrams, N.; Prignitz, S.; Simo Kuate, E. (2018a): *Technische Konzepte für die Rückholung der Einlagerungsvariante horizontale Streckenlagerung in Tongesteinsformationen*. BGE TEC 2018-10. BGE TECHNOLOGY GmbH. Peine
- Herold, P.; Keller, A.; Leonhard, J.; Leon Vargas, P.; Bertrams, N. (2020): *Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit*

- wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus einem HAW-Endlager in Kristallingestein. BGE TECHNOLOGY GmbH. Peine
- Herold, P.; Prignitz, S. Bertrams, N.; Kuate Simo, E.; Filbert, W.; Friedrich, C.; Becker, A. (2018b): *Technische Konzepte für die Rückholung der Einlagerungsvariante horizontale Streckenlagerung in Salzformationen*. BGE TEC 2018-09. BGE TECHNOLOGY GmbH. Peine
- Jan Prij (1991): *On the design of a radioactive waste repository*. Technische Universität Twente. Enschede
- Jobmann, M. & Lommerzheim, A. (2015): *Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Standortmodell SÜD*. TEC-26-2015-TB. DBE TECHNOLOGY GmbH. Peine
- Kock, I.; Eickemeier, R.; Frieling, G.; Heusermann, S.; Knaut, M.; Minkley, W.; Navarro, M.; Nipp, H.-K.; Vogel, P. (2012): *Integritätsanalyse der geologischen Barriere*. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-286. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Braunschweig
- Lommerzheim, A. & Jobmann, M. (2015): *Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell NORD*. TEC-14-2015-TB. DBE TECHNOLOGY GmbH. Peine
- Maßmann, J. (2016): *Methodik und Anwendungsbezug eines sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tongestein*. Endlagerstandortmodell SÜD (AnSichT) - Teil III: Auswahl von Gesteins- und Fluideigenschaften für numerische Berechnungen im Rahmen des Langzeitnachweises. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover. Hannover
- Meleshyn, A.; Weyand, T.; Bracke, G.; Kull, H.; Wieczorek, K. (2016): *Wärmeentwicklung / Gesteinsverträglichkeit*. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe K-MAT 64. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Braunschweig
- Schacke, V. (2009): *Entwicklung der Maßnahmen zur Kühlhaltung der Gruben unter besonderer Berücksichtigung der tiefen, warmen Bergwerke im östlichen Ruhrrevier*. Dissertation. Montanuniversität Leoben, Leoben
- Steils, T. (2022): *Rückholungskonzept für ein geologisches Tiefenlager*. NAB 21-13. NAGRA. Wettingen, Schweiz

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Skizze des Endlagerbergwerks der VSG angepasst nach den Anforderungen der Rückholbarkeit (Herold et al. 2018b). | 9 |
| Abbildung 2: maximale Temperaturentwicklung in verschiedenen horizontalen Abständen zum Endlagerbehälter; Abstand in m (nach Herold et al. 2018b). | 10 |
| Abbildung 3: Schrittweise Auffahrung der Rückholungsstrecke (Herold et al. 2018b) | 12 |
| Abbildung 4: Konvergenz im Laufe der Zeit in Abhängigkeit von der Endlagerauslegung (Herold et al. 2018b) | 14 |
| Abbildung 5: VentSim TM Modell | 15 |
| Abbildung 6: Konvergenzraten pro Tag für die Grenztemperatur von 170 °C in verschiedenen Teufen | 21 |
| Abbildung 7: Rechenfälle mit akzeptablen Konvergenzraten in Abhängigkeit von Teufe und Gebirgstemperatur | 22 |
| Abbildung 8: Grubengebäude für die Streckenlagerung von POLLUX®-3 Behältern (Jobmann & Lommerzheim 2015) | 24 |
| Abbildung 9: Ablauf der Rückholung in der Streckenlagerung im Tongestein (Herold et al. 2018a) | 25 |
| Abbildung 10: Temperaturentwicklung radial zur Behälterachse, grün = Betriebszeit, grau = möglicher Rückholungszeitraum (Herold et al. 2018a) | 26 |
| Abbildung 11: VentSim TM Modell | 27 |
| Abbildung 12: CAD Modell des Streckenquerschnitts der Einlagerungsstrecke mit Flächenangaben für den lichten Querschnitt und den Fahrweg | 28 |
| Abbildung 13: Modellaufbau für Beobachtungspunkte der Temperaturentwicklung (Herold et al. 2020) | 33 |
| Abbildung 14: Temperaturentwicklung innerhalb der versetzten Strecke oberhalb des Einlagerungsbohrlochs (Herold et al. 2020) | 34 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------------|--|----|
| Tabelle 1: | Temperaturrentwicklung mit variierendem Streckenabstand (Herold et al. 2018b) | 13 |
| Tabelle 2: | Simulationsergebnisse für eine Grenztemperatur von 170 °C | 18 |
| Tabelle 3: | Simulationsergebnisse für eine Grenztemperatur von 120 °C | 31 |
| Tabelle 4: | Simulationsergebnisse für eine Grenztemperatur von 100 °C | 37 |

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