

ENTRIA-Arbeitsbericht-03

„Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und Geotechnische Aspekte für die Auslegung“

Vertikalprojekt 6:
Einlagerung in tiefe geologische
Formationen mit Vorkehrung zur
Überwachung und Rückholbarkeit

Autoren: Joachim Stahlmann
Rocio Leon-Vargas
Volker Mintzlauff

Institut für Grundbau und Bodenmechanik
TU-Braunschweig

ENTRIA-Arbeitsbericht-03

„Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und Geotechnische Aspekte für die Auslegung“

Vertikalprojekt 6: Einlagerung in tiefe
geologische Formationen mit Vorkehrung zur
Überwachung und Rückholbarkeit

**Joachim Stahlmann,
Rocio Leon-Vargas,
Volker Mintzloff**

Institut für Grundbau und Bodenmechanik
TU-Braunschweig

Kontakt:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Joachim Stahlmann
TU Braunschweig - Institut für Grundbau und Bodenmechanik
Beethovenstraße 51b, 38106 Braunschweig
Tel.: +49 531 391-62000 - Fax: +49 531 391-62040
Mail: j.stahlmann@tu-braunschweig.de

Dipl.-Geol. Volker Mintzlaff
TU Braunschweig - Institut für Grundbau und Bodenmechanik
Beethovenstraße 51b, 38106 Braunschweig
Tel.: +49 531 391-62012 - Fax: +49 531 391-62040
Mail: v.mintzlaff@tu-braunschweig.de

Dipl.-Ing. Rocio P. Leon-Vargas, M.Sc.
TU Braunschweig - Institut für Grundbau und Bodenmechanik
Beethovenstraße 51b, 38106 Braunschweig
Tel.: +49 531 391-62014 - Fax: +49 531 391-62040
Mail: r.leon-vargas@tu-braunschweig.de

ENTRIA ist ein in der Forschung zur Entsorgung radioaktiver Reststoffe in Deutschland neuartiges Verbundprojekt von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus unterschiedlichen Disziplinen, die bisher nur sporadisch kooperierten. Um seine neuen Arbeitsweisen und die Vielfalt integrierter disziplinärer Perspektiven transparent zu machen, werden in den Arbeitsberichten wichtige Zwischenergebnisse vorgestellt. Dies dient einerseits der projektinternen Information. Andererseits werden diese Zwischenergebnisse auch der interessierten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Letzteres geschieht, um Einblicke in die ENTRIA Forschungspraxis zu gewähren und Ausgangsmaterial für spätere Veröffentlichungen offenzulegen. ENTRIA lebt vom pluralen Austausch, der durch diese Arbeitsberichte gefördert wird. Die Beiträge geben die Meinung der Autorin oder des Autors wieder.

ENTRIA wird vom BMBF unter den Kennzeichen 02S9082 A bis F gefördert
(Zeitraum 2013 bis 2017).

Zitierweise

ENTRIA-Arbeitsbericht-03: Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und Geotechnische Aspekte für die Auslegung. Stahlmann, Joachim; Mintzlaff, Volker; Leon-Vargas, Rocio. Braunschweig, 2015

ISSN (Print): 2367-3532, ISSN (Online): 2367-3540

Inhalt

Vorwort	5
1. Einleitung	6
2. Wirtsgesteine	8
2.1. Allgemeines	8
2.2. Ideales Wirtsgestein	9
2.3. Spezielle Eigenschaften der Wirtsgesteine	12
2.3.1. Allgemeines	12
2.3.2. Steinsalz	15
2.3.3. Ton	17
2.3.4. Tonstein	18
2.3.5. Kristallingestein	19
3. Rückholbarkeit	20
4. Monitoringbasiertes Life-Cycle-Engineering der geotechnischen Schutzsysteme	24
5. Generische Referenzmodelle mit Rückholbarkeit der Abfälle	26
5.1 Allgemeines	26
5.2 Generisches Tiefenlagermodell für Steinsalz in flacher Lagerung	30
5.3 Generisches Tiefenlagermodell für Steinsalz in steiler Lagerung	31
5.4 Generisches Tiefenlagermodell im Ton	32
5.5 Generisches Tiefenlagermodell in Tongestein	34
5.6 Generisches Tiefenlagermodell in Kristallin	35
6. Zusammenfassung und Ausblick	36
Literaturverzeichnis	37
Quellenangaben	38
Anhang	39

Abbildungsverzeichnis

Anhang 1	40
Anhang 2	42
Anhang 3	44
Anhang 4	51
Anhang 5	54
Anhang 6	59
Anhang 7	62
Quellenangaben Anhang	65

Vorwort

Die Forschungsplattform ENTRIA befasst sich seit Anfang 2013 mit Optionen zur Entsorgung hochradioaktiver (wärmeentwickelnder) Reststoffe. Dabei werden die Optionen Endlagerung ohne Rückholbarkeit, Tiefenlagerung mit Rückholbarkeit und Langzeitzwischenlagerung untersucht. Die Struktur der Forschungsplattform umfasst drei Vertikal- und vier Transversalprojekte.

Im Rahmen des Vertikalprojektes „Einlagerung in tiefe geologische Formationen mit Vorkehrungen zur Überwachung und Rückholbarkeit“ werden zurzeit geotechnische Bewertungen von Tiefenlagerkonzepten unter Berücksichtigung der potenziellen Wirtsgesteine Salz in flacher und steiler Lagerung, Ton, Tonstein und kristallines Hartgestein vom Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt.

Unter der Prämisse, dass eine derartige Tiefenlagerung bei erwarteter Entwicklung in ein Endlager überführbar sein soll, ist das Ziel der Forschungen die Ermittlung der wirtsgesteinsspezifischen möglichen Dauer der Rückholoption.

Im Verlauf des ENTRIA-Projektes wurden die in diesem Bericht vorgestellten generischen Tiefenlagermodelle entwickelt. Diese orientieren sich am heutigen Stand der Technik in der Tiefenlagerung. Der Arbeitsbericht wurde als ein dynamisches Dokument konzipiert und bereits Anfang 2014 in der ersten Fassung (ENTRIA-Intern) veröffentlicht. Er hat seitdem eine stetige Weiterentwicklung erfahren und wird auch zukünftig fortgeschrieben werden.

1. Einleitung

Basierend auf der Einlagerung radioaktiver wärmeentwickelnder Reststoffe (HAW) in tiefen geologischen Formationen ist eine Vielzahl möglicher Szenarien für die Option einer Rückholung denkbar. Die zurzeit diskutierte Bandbreite reicht von einem technischen Abschluss nichtversetzter Einlagerungskammern mit Toren über den Versatz und Abschluss von Einlagerungsfeldern bis zum Verfüllen und Verschluss des Grubengebäudes mit Ausnahme der Schächte. Zur Gewährleistung der Überwachung des Verhaltens der Reststoffe, der Grubenbaue, der technischen und geotechnischen Barrieren sowie des Wirtsgesteins durch ein Monitoringsystem ist es nach dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik notwendig, im Nahbereich der Einlagerungsbereiche Grubenbaue offenzuhalten. Von diesen Grubenbauen, z. B. Monitoringstrecken, können dann ggf. auch über Bohrungen in den Nahbereich der Einlagerungskammern Messsysteme installiert und Messungen durchgeführt werden. Messungen an der Geländeoberfläche oder in deren Nahbereich reichen nicht aus bzw. sind zeitlich zu verzögert, um wirksam gegen unplanmäßige naturwissenschaftliche oder ingenieurwissenschaftliche Ereignisse vorgehen zu können. Unplanmäßige Ereignisse, die sich aus der Veränderung der Zivilgesellschaft oder deren Entscheidungen ergeben, sind nicht Gegenstand dieses Dossiers. Bei erwartungsgemäßer Entwicklung und der Entscheidung gegen eine Rückholung der radioaktiven Reststoffe schließt sich die Überführung des Tiefenlagers in ein Endlager an. Aus der Maßgabe heraus, dass „Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung oder Bergung getroffen werden, [...] die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen“ [BMU, 2010] sollen, ist die Integrität des Wirtsgesteins im Nah- aber auch Fernfeld der Einlagerungstrecken möglichst weitgehend zu erhalten. Aus diesem Grund müssen in Abhängigkeit der Eigenschaften der verschiedenen Wirtsgesteine Maßnahmen zur Minimierung der Auflockerungszonen angeordnet werden. Generell ist jedoch festzuhalten, dass mit dem Grad und der Dauer der Offenhaltung die passive Sicherheit reduziert und das technische Risiko erhöht wird.

Auf der Grundlage der aufgeführten Aspekte ist es notwendig, die Bandbreite möglicher Szenarien für die Umsetzung einer Rückholung einzuschränken.

Hierbei stehen die Kriterien für ein geeignetes Monitoring des Tiefenlagersystems sowie der weitgehende Erhalt der Funktionsfähigkeit der technischen und geotechnischen Barrieren und der Integrität der geologischen Barriere in Abhängigkeit der verschiedenen Wirtsgesteine im Vordergrund. Für die Errichtung eines Tiefenlagers in Deutschland werden als potenzielle Wirtsgesteine zurzeit Kristallingestein, Ton, Tonstein und Steinsalz in flacher und steiler Lagerung diskutiert.

Diese haben auch im internationalen Raum Eingang in die Planungen gefunden. Die Eigenschaften dieser Wirtsgesteine unterscheiden sich allerdings deutlich, besonders wenn es um ihre Eignung für ein Tiefenlager mit der Option zur Rückholung der Reststoffe geht. Mit dem vorliegenden Dossier werden daher Optionen für generische Tiefenlagermodelle entwickelt, die als Referenzmodelle für die weiteren Forschungen verwendet werden sollen. Die Anpassung dieser Modelle aufgrund der im Verlauf der Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse ist möglich. Eine Abstimmung und ein Abgleich der Ansätze mit dem VP 5 ist von wesentlicher Bedeutung, da wie oben bereits erwähnt ein Tiefenlager bei erwarteter, d. h. planmäßiger Entwicklung in ein Endlager überführt werden soll. Infolgedessen dient dieses Dossier auch als Diskussionsgrundlage.

Die im Folgenden vorgeschlagenen Modelle wurden auf Basis von Literaturrecherchen über Tiefenlager mit Rückholoption in verschiedenen Wirtsgesteinen, die den zurzeit bestehenden Stand von Wissenschaft und Technik darstellen, entwickelt. Ziel der weiteren Forschungen ist es, auf der Grundlage vorgegebener Randbedingungen, wie beispielsweise eiszeitlich bedingter Teufenlagen, für die genannten Wirtsgesteine die erforderlichen Mindestteufen, die möglichen Offenhaltungsdauern, den Wartungsbedarf der offen gehaltenen Grubenbaue und den möglichen Grad der Offenhaltung zu ermitteln und gegenüberzustellen.

Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen resultieren dann die auf technischer Grundlage zu ermittelnden Risiken, die mit dem Risikoverständnis in der Zivilgesellschaft abgeglichen werden müssen.

2. Wirtsgesteine

2.1. Allgemeines

Als Wirtsgestein wird der Bereich der Geosphäre bezeichnet, der die radioaktiven Reststoffe aufnehmen soll. Im felsmechanischen Sinne muss zwischen Gestein und Gebirge unterschieden werden. Als Gestein wird eine natürliche Ansammlung von Mineralen bezeichnet, die konsolidiert, verkittet oder in einer anderen Form miteinander verbunden ist. Das Gestein ist in der Regel homogen und kann isotrop oder anisotrop ausgeprägt sein. Im Allgemeinen ist es anisotrop und behält diese Eigenschaft über lange Zeiträume bei. Die Eigenschaften von Gesteinen sind in der Regel nicht maßgebend für die Integrität und Standfestigkeit des Gebirges.

Diese Eigenschaften werden in hohem Maße von den Trennflächenscharren, d. h. der Schichtung und der Klüftung, aber auch von Störungszonen beeinflusst. Hiervon ausgenommen sind kriechfähige Gesteine wie beispielsweise Salzgestein, die einen isotropen Spannungszustand anstreben und bei denen auch eine Verheilung von ehemals vorhandenen Trennflächen beobachtet wird.

Trennflächensysteme entstanden durch die Genese des Gesteins und verändern sich infolge mechanischer oder hydraulischer Beanspruchung des Gebirges. Sie können beispielsweise als Abkühlungsklüfte, als Schichtflächen oder als tektonische Störungen ausgeprägt sein.

Felsmechanisch müsste deshalb von einem Wirtsgebirge gesprochen werden. Das Wirtsgebirge steht unter einem Gebirgsdruck, der maßgeblich vom lithostatischen Druck bestimmt wird. Dieser berechnet sich aus der Überlagerung (Wichte der Überlagerung \times Tiefe) und steigt in der Tiefe linear an. Zu diesem lithostatischen Druck können weiterhin Drücke aus der Tektonik, Quell- und Schwelldrücke hinzukommen.

Im Folgenden wird der in der Fachwelt eingeführte Begriff „Wirtsgestein“ verwendet, auch wenn „Wirtsgebirge“ gemeint ist.

2.2. Ideales Wirtsgestein

In den allgemeinen Betrachtungen wird zunächst davon ausgegangen, dass das Wirtsgestein und die technischen Barrieren einen Zutritt von Flüssigkeiten zu den Radionukliden verhindern. Dafür muss das Wirtsgestein eine möglichst geringe Permeabilität aufweisen oder die (geo-)technischen Barrieren müssen ein Eindringen verhindern. Sollte ein Zutritt von Flüssigkeiten eingetreten sein und kommt es zu einer Freisetzung von Radionukliden, sollte das Wirtsgestein idealerweise die Fähigkeit der Sorption von Radionukliden haben.

Infolge von in den Grubenbauen vorhandener Feuchtigkeit kommt es zur Korrosion von Metallen, vornehmlich Stahl, und hierdurch bedingt zur Bildung von Gasen. In abgedichteten Grubenbauen kann dies zum Aufbau eines Gasdruckes führen, der auf das Wirtsgestein und die Abdichtungsbauwerke einwirkt. Dieser Gasdruck sollte vom Wirtsgestein aufgenommen werden können, ohne dass durchgängige Fluidwegsamkeiten entstehen.

Mit der Einlagerung radioaktiver wärmeentwickelnder Reststoffe ist eine thermische Einwirkung auf das Wirtsgestein verbunden. Ein ideales Wirtsgestein sollte daher eine gute Wärmeleitfähigkeit aufweisen, um die entstehende Wärmelast abzuleiten. Darüber hinaus sollte das Wirtsgestein infolge des Wärmeeintrags keine für die Integrität und Tragfähigkeit nachteiligen Veränderungen erfahren.

Mit der Auffahrung der Hohlräume ist deren Standsicherheit bis zum Verschluss zu gewährleisten. Dies betrifft den Zeitraum der Einlagerungsphase sowie den Zeitraum, in dem eine Rückholung möglich sein soll. Das Wirtsgestein sollte daher entweder eine langfristige Eigenstandfestigkeit aufweisen oder durch einen entsprechenden Ausbau gesichert werden. Die Ausbildung eines sogenannten Gebirgstragringes ist wünschenswert, da er einen erheblichen Anteil des Gebirgsdruckes aufnehmen kann. Weiterhin sollte das Wirtsgestein infolge der Änderung des geochemischen Milieus, beispielsweise durch wetterbedingte Zufuhr von Sauerstoff und Feuchtigkeit sowie durch Austrocknung, keine Degradationserscheinungen zeigen. Die Verträglichkeit des Wirtsgesteins mit den Versatz- und Ausbaumaterialien ist anzustreben.

Über einen Zeitraum von einer Million Jahre sollen die Radionuklide von der Biosphäre zurückgehalten werden. Dieser Zeitraum bedingt, dass das Tiefenlager in einem geologischen Umfeld liegen sollte, in dem keine Integritäts- und Standsicherheitsveränderungen in diesem Zeitraum zu erwarten sind. Deshalb sollten Gebiete mit potenziellem Vulkanismus, starken Hebungen und Erdbebengebiete über Zone 1 nach DIN 4149 ausgeschlossen werden. Auch Gegenden mit vielen geologischtektonischen Störungen sollten nicht in Betracht gezogen werden, da diese Störungszonen bei zukünftigen tektonischen Beanspruchungen reaktiviert werden können. Darüber hinaus sind Gesteine in Störungszonen deutlich anfälliger gegenüber Verwitterung [AkEnd, 2002].

Im Zeitraum der Lagerung der Reststoffe in tiefen geologischen Formationen werden mit hoher Wahrscheinlichkeit mehrere Eiszeiten eintreten, prognostiziert wird eine Periode von ca. 100.000 Jahren. Innerhalb einer Eiszeit gibt es mehrere Gletschervorstöße, die eine große Erosionskraft besitzen. Dadurch entstehen beispielsweise glazigene Rinnensysteme, die in Norddeutschland vereinzelt bis zu 500 m tief sein können, und nach der Eiszeit wieder mit Fluss- oder Stausedimenten verfüllt werden. Bei Lockersedimenten wie im Norddeutschen Becken ist die Erosionskraft eines Gletschers deutlich größer als auf einem Hartgesteinsuntergrund.

Im Periglazial, das sich vor dem Gletscher aufgrund der niedrigen Jahresdurchschnittstemperatur ausbildet, werden Permafrostböden entstehen. Dabei vereist das Grundwasser vollständig und der Boden ist praktisch impermeabel. Hierdurch bedingt können neue tieferliegende Grundwasserströmungen entstehen, die beispielsweise frisches Gletscherwasser an einen Salzstock bringen können [Bruns, 2011].

Das ein Tiefenlager aufnehmende Wirtsgestein muss daher eine ausreichende Mächtigkeit bis in die erforderlichen Tiefen aufweisen, um die oben genannten Einwirkungen von den Reststoffen in einem ausreichenden Abstand abzuhalten.



Steinsalz, flach gelagert



Steinsalz, steil gelagert



Ton



Tonstein



Kristallines Hartgestein

Abbildung 1: Potenzielle Wirtsgesteine für Deutschland¹

2.3. Spezielle Eigenschaften der Wirtsgesteine

2.3.1. Allgemeines

Kein natürliches Gestein erfüllt alle Anforderungen an ein ideales Wirtsgestein. Aus diesem Grund sind mögliche Gesteinsformationen hinsichtlich ihrer Eignung zu bewerten. Innerhalb der Bundesrepublik Deutschland gibt es fünf potenzielle Wirtsgesteinstypen. Infrage kommen: Steinsalz in flacher und in steiler Lagerung, Ton, Tonstein und kristallines Hartgestein. Abbildung 1 stellt einen visuellen Eindruck dieser Wirtsgesteine dar. In Tabelle 1 sind die wesentlichen Eigenschaften dieser Wirtsgesteine in einer qualitativen Bewertung für ein Endlager gegenübergestellt.

Eigenschaft	Steinsalz	Ton
Temperaturfähigkeit	hoch	gering
Durchlässigkeit	praktisch undurchlässig	sehr gering
Festigkeit	mittel	sehr gering
Verformungsverhalten	viskos (Kriechen)	plastisch
Hohlraumstabilität	Eigenstabilität	Ausbau notwendig
In-situ-Spannungen	lithostatisch isotrop	schwach anisotrop
Löslichkeit	hoch	sehr gering
Sorptionsfähigkeit	sehr gering	sehr hoch
Temperaturbelastbarkeit	hoch	gering

günstige Eigenschaft
 ungünstige Eigenschaft
 mittel

Jedes potenzielle Wirtsgestein weist Vor- und Nachteile auf. Zusätzlich ist für die Option der Rückholung die Gewährleistung der Standsicherheit der Hohlräume über den Zeitraum der Rückholoption maßgebend. Infolge der Viskoplastizität im Steinsalz und der Plastizität im Ton – wenn auch in geringerem Maße – wird der Gebirgstragring über die Zeit abgebaut, sodass es ohne Ausbausicherung zu einem Verbruch oder zum „Zukonvergieren“ der Hohlräume kommt. Eine Ausbausicherung würde über die Zeit durch den vollen lithostatischen Druck beansprucht werden. Demgegenüber ist im Kristallin und untergeordnet auch im Tonstein von einem Erhalt des Gebirgstragringes auszugehen, sodass von geringeren erforderlichen Ausbauerwartungen ausgegangen werden kann.

Tonstein	Kristallingestein
gering	mittel
sehr gering bis gering	sehr gering (ungeklüftet) bis durchlässig (geklüftet)
gering bis mittel	hoch
plastisch bis spröde	spröde
Ausbau notwendig	hoch (ungeklüftet) bis gering (stark geklüftet)
anisotrop	anisotrop
sehr gering	sehr gering
sehr hoch	mittel bis hoch
gering	gering

Tabelle 1: Endlagerrelevante Eigenschaften potenzieller Wirtsgesteine [nach BGR, 2007] (aufgrund der längeren Offenhaltungsdauer für Tiefenlager nicht vollständig gültig)

Abbildung 2 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Weiterhin ist die Gebirgstragfähigkeit, d. h. das Erfordernis eines Ausbauwiderstandes über kürzere Standzeiten, für die betrachteten Wirtsgesteine sehr unterschiedlich. Besonders Ton und Tonstein erfordern einen kurzfristigen Ausbauwiderstand, während Kristallingestein ggf. auch über die gesamte Dauer der Rückholopation nur mit einem geringen Ausbauwiderstand auskommt.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen möglichen Wirtsgesteine in ihren Eigenschaften beschrieben.

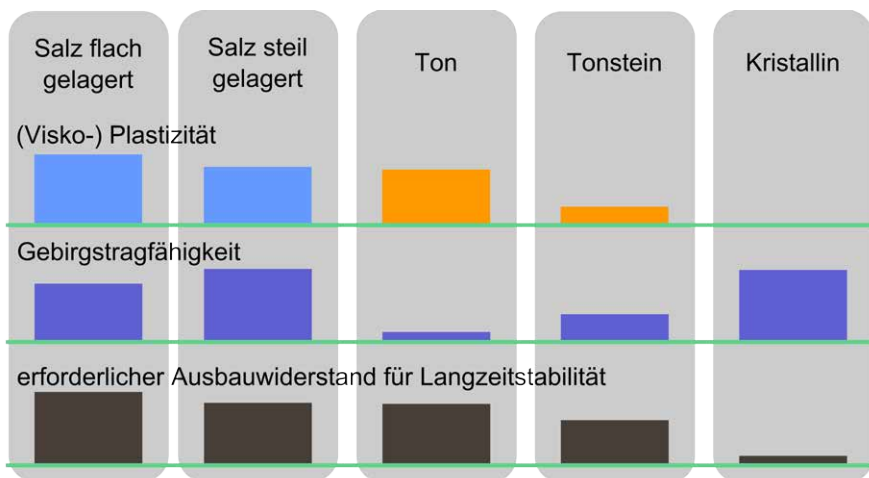


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen (Visko-)Plastizität, Gebirgstragfähigkeit und dem erforderlichen Ausbauwiderstand für die Langzeitstabilität

2.3.2. Steinsalz

Steinsalz (NaCl) ist ein chemisches Sediment, das bei der Verdunstung von Wasser als Rückstand entsteht. In größeren Mengen entsteht es durch Ausfällung in Binnenmeeren mit begrenztem Zufluss von Frischwasser bei hohen Verdunstungsraten. Es ist durch Klimaänderungen, Meeresvorstöße und -rückzüge mit anderen Sedimenten vergesellschaftet. Ein typischer Salzzyklus beginnt mit der Sedimentation von Ton. Darauf folgt eine unterschiedlich mächtige Schicht Calcit/Dolomit. Diese wird überlagert in der Reihenfolge der Löslichkeit in Wasser mit Gips/Anhydrit und schließlich Steinsalz. Kalisalze bilden sich bei weiterer Übersättigung des Meerwassers; beim Trockenfallen des Binnenmeeres folgt eine Salztonschicht. Diese Zyklen können sich wiederholen. Im Norddeutschen Becken sind während des Zechsteins vier Zyklen vollständig und drei Zyklen unvollständig abgelagert worden.

Direkt nach der Sedimentation liegt das Steinsalz in flacher Lagerung vor, wie es auch in Deutschland stellenweise vorkommt. Steinsalz hat Eigenschaften, die in der Geosphäre ungewöhnlich sind. Es verhält sich bei Verformung wie ein sehr zähflüssiges Fluid (viskoplastisch). Zudem besitzt es eine geringe Dichte. Wird Steinsalz tief genug versenkt, bildet sich eine Dichteinversion, da die überlagernden Gesteine eine größere Dichte haben als das Steinsalz. Durch tektonische Spannungen können sich im überlagernden Gestein Störungen bilden, an oder in denen das Steinsalz durch seinen Auftrieb aufsteigt. Es bilden sich durch Zusammenfließen zunächst Salzkissen. Kommt es durch Tektonik im Deckgebirge zu Rissen, kann das Steinsalz weiter aufsteigen und bildet einen Salzstock. Größere Salzstöcke werden als Salzdome bezeichnet; Salzstöcke von größerer lateraler Ausbildung als Salzmauern. Steinsalz, das durch diese halokinetischen oder durch salztektonische Prozesse verändert wurde, liegt in steiler Lagerung vor.

Für die generischen Tiefenlagermodelle, welche in Kapitel 5 näher beschrieben werden, werden beide Lagerungsformen getrennt voneinander berücksichtigt. Im Wesentlichen unterscheiden sich diese beiden Modelle in der Geometrie des Gebirges. Die Salzformationen in flacher Lagerung sind einfacher zu erkunden und zu prognostizieren als aufgefaltete Salzformationen in steiler Lagerung. Im steilgelagerten Salzgebirge sind besonders aufgefaltete spröde Anhydritblöcke zu beachten, die steifer sind und die Spannun-

gen aus dem Salzgebirge aufnehmen. Dabei könnten neue Trennflächen entstehen, die potenzielle Wasserwegsamkeiten darstellen würden.

Die positiven Eigenschaften von Steinsalz für ein Tiefenlager sind die sehr geringe Permeabilität des Gebirges, die hohe Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu anderen Gesteinen sowie die Standfestigkeit über kürzere Zeiträume. Die Kriechfähigkeit wirkt sich im Fall eines Endlagers durch den relativ schnellen vollständigen Einschluss der radioaktiven Reststoffe positiv aus. Infolge der zunehmenden Kriechfähigkeit bei zunehmender Temperatur gilt dies noch verstärkt für die Einlagerung radioaktiver wärmeentwickelnder Reststoffe. Für ein Tiefenlager mit Rückholoption, d. h. über längere Zeit offener, untertägiger Infrastruktur, ist diese Eigenschaft jedoch nachteilig, da Hohlräume im Steinsalz keine Langzeitstabilität aufweisen. Ein die Konvergenzen und damit die Ausbreitung der Auflockerungszone vermindern der Ausbau erfährt langfristig eine Beanspruchung, die aus der vollständigen Überlagerung resultiert. Hierin liegt der Zielkonflikt zwischen der Zugriffsmöglichkeit auf die radioaktiven Reststoffe und des für die Langzeitsicherheit wichtigen sicheren Einschlusses.

Weiterhin kann auch die Wärmeleitfähigkeit des Steinsalzes zu einem Zielkonflikt führen. So ist in einem Endlager mit kurzfristigem Abwurf der Einlagerungsfelder die Einlagerung von Reststoffen mit hoher Wärmeleistung möglich, während in einem Tiefenlager mit Rückholoption die erforderliche Bewitterung der Infrastrukturstrecken, Monitoringstrecken etc. bei der Auslegung des Tiefenlagers zu beachten ist.

Kritisch zu sehen ist die Wasserlöslichkeit von Steinsalz und Kaliflözen. Ein Salzstock beispielsweise besitzt normalerweise ein Hutgestein, das aus Lösungsrückständen wie Gips und Ton besteht. Dieses schützt den Salzstock, infolge von Grundwasserströmen am Salzspiegel weiter abzulaugen. Fehlt das Hutgestein, so steht der Salzstock mit Grundwasser in Kontakt. Das Steinsalz wird nun solange abgelautet, bis es sich mit dem Grundwasserleiter im Lösungsgleichgewicht befindet, sodass das Grundwasser am Salzstock in NaCl-gesättigter Lösung vorliegt. Die Dichte dieser Lösung ist größer als von ungesättigtem Süßwasser und bildet ein eigenes Grundwasserstockwerk. Das ungesättigte Süßwasser kann somit nicht mit dem Salzstock in Kontakt kommen.

Bildet sich durch Permafrost ein neues Grundwassermilieu aus, kann Süßwasser dem Salzstock erneut zufließen. Typische durchschnittliche Ablaufraten sind zum Beispiel am Salzstock Gorleben ermittelt worden und betragen 0,01 bis 0,02 mm pro Jahr [Mrgulla, 2011]. In dieser Zahl ist die Hebung des Salzstockes nicht berücksichtigt. Wenn den Grubenbauen ungesättigte Grundwässer zufließen würden, beispielsweise über klüftigen Anhydrit oder die Schächte, würden sich die Salzgesteine auflösen.

Aufgrund der Umlösekapazität entstehen dann Hohlräume, die die Integrität der geologischen Barriere beeinträchtigen. Weiterhin besitzt Steinsalz im Falle eines Flüssigkeitseinbruchs in das Grubengebäude und eines darauf folgenden Austrags kontaminierter Lösung im Gegensatz zum Ton keine Sorptionsfähigkeit gegenüber Radionukliden.

Mit diesem Dossier wird eine Unterscheidung zwischen Salz in flacher und in steiler Lagerung vorgenommen, da nach dem bisherigen Kenntnisstand davon auszugehen ist, dass sich das Spannungs-Dehnungsverhalten, der Lösungsgehalt und die Kriechfähigkeit unterscheiden. Neuere Untersuchungen geben jedoch Hinweise darauf, dass die Unterschiede nicht so groß wie angenommen sind. Die weitere Entwicklung des Kenntnisstandes bleibt abzuwarten.

2.3.3. Ton

Ton ist ein unverfestigtes Sediment, das überwiegend aus Partikeln kleiner als 2 µm besteht. Es setzt sich im Wesentlichen aus plättchenförmigen Tonmineralen zusammen, die aus SiO₄-Tetraeder-Schichten (T) und AlOH-Oktaeder-Schichten (O) bestehen. Die wichtigsten Tonminerale sind nicht quellfähige Zweischicht-Tonminerale (T-O) wie Kaolin und quellfähige Dreischicht-Tonminerale (T-O-T) wie Smektit. Natürliche Tonschichten bestehen normalerweise aus beiden Typen Tonmineralen und einem Anteil aus Quarz, Feldspat und Calcit.

Als Verwitterungsprodukte haben Tone eine unterschiedliche Zusammensetzung, je nachdem aus welchem Edukt und unter welchen klimatischen Bedingungen sie entstanden sind. Ton kann zudem Sandlinsen enthalten, die zu Standsicherheitsproblemen beim Auffahren von Hohlräumen führen

können. Deshalb muss das Verhalten der einzelnen Tonformationen speziell erkundet werden und kann auch innerhalb einer Formation variieren. Positive Eigenschaften des Tons sind die geringe Permeabilität, die Sorptionsfähigkeit gegenüber Radionukliden und die Quellfähigkeit, die bei Wasserzutritt ein Selbstabdichten von Trennflächen bewirkt.

Ton hat ein plastisches Verhalten, sodass bei mechanischer Belastung permanente Verformungen entstehen. Wegen seines geringen Verformungsmoduls erzeugen schon kleine Spannungen große Verformungen.

Aufgrund ihrer geologischen Vergangenheit (z. B. Eiszeit) sind die in Deutschland für ein Tiefenlager in Frage kommenden Tone überkonsolidiert, d. h. sie wurden höher belastet als rezent. Der durch die Belastung aufgebaute Porenwasserdruck kann sich durch die sehr geringe Durchlässigkeit des Tons nicht vollständig abbauen. Dies führt dazu, dass ein im überkonsolidierten Ton aufgefahrener Hohlraum eine Entspannung des Porenwasserdrucks bewirkt, die zu Konvergenzen des Hohlraums führt.

Beim Auffahren tief liegender Hohlräume in Ton kann die daraus resultierende Spannungsumlagerung nicht über das Gebirge abgetragen werden, es bildet sich kein Gebirgstragring aus. Der erforderliche Ausbau muss dann die Spannungen aus der Überlagerung aufnehmen. Ton ist empfindlich gegenüber Austrocknung. Seine Eigenschaften ändern sich durch die Bewetterung und durch den Temperatureintrag der radioaktiven wärmeentwickelnden Reststoffe. Bei hohen Temperaturen wandeln sich die Tonminerale um, der Ton verliert seine plastischen Eigenschaften und es können Schrumpfrisse auftreten. Aufgrund der Schichtung hat Ton eine anisotrope Wärmeleitfähigkeit, deren Komponenten sich in Abhängigkeit des Mineralgehaltes einstellen.

2.3.4. Tonstein

Tonstein ist ein durch Kompaktierung verfestigter Ton. Bei der Diagenese wird durch die Überlagerungsspannung die Kartenhausstruktur des unverfestigten Tons senkrecht zur Hauptspannung eingeregelt. Bei der Verfestigung verliert der Tonstein einen Großteil der ursprünglich vorhandenen Quellfähigkeit und es bildet sich ein Trennflächensystem senkrecht zur Hauptspannung. Das Trennflächensystem kann potenzielle Wasserwegsamkeiten bieten, doch ist

die Wasserdurchlässigkeit von Tonsteinformationen in der Regel sehr gering. Das Selbstheilungsvermögen von Wasserwegsamkeiten ist deutlich geringer als bei Ton.

Genauso wie Ton besitzen die Tonminerale des Tonsteins die Fähigkeit, Radionuklide zu sorbieren. Der Tonstein ist standfester als Ton. Die in Deutschland zur Endlagerung vorgeschlagenen Tonsteinformationen sind überkonsolidiert und zeigen druckhaftes Verhalten. Die Spannungsumlagerung nach dem Auffahren von Hohlräumen kann in Teilen über das Wirtsgestein abgetragen werden. Im Zusammenhang mit dem druckhaften Verhalten entstehen hierbei aber weiträumige Auflockerungszonen. Eine Ausbauschichtung ist erforderlich.

Auch Tonstein besitzt eine anisotrope Wärmeleitfähigkeit. Im Opalinuston (Schweiz und Süddeutschland) sorgt ein höherer Quarzgehalt in einzelnen Schichten für eine höhere Wärmeleitfähigkeit parallel zur Schichtung, senkrecht dazu sind die schlecht wärmeleitenden Tonminerale maßgebend. Im Bure-Tonstein (Frankreich) sorgt der Carbonatgehalt für eine bessere Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Schichtung [Brasser, 2008].

2.3.5. Kristallingestein

Die kristallinen Hartgesteine werden in der Literatur und umgangssprachlich oft vereinfachend als Granit bezeichnet. Sie umfassen jedoch eine Vielzahl mineralogisch unterschiedlicher Gesteine magmatischer (z. B. Granit, Granodiorit, Syenit) oder metamorpher (z. B. Granulit, Gneise) Genese. Alle diese Gesteine sind als Gestein dicht, weisen aber als Gebirge Trennflächen auf. Diese Trennflächen sind vor allem durch Zugspannungen bei der Abkühlung des Gesteinskörpers entstanden. Auch tektonische Spannungen können Trennflächen verursachen.

Die Festigkeit des Gebirges wird überwiegend von den Trennflächen bestimmt, sodass eine genaue Trennflächenkartierung und -ansprache im Kristallin nötig ist. Ein Ausbau ist normalerweise nur an besonders stark geklüfteten Abschnitten notwendig, da das Gebirge einen Gebirgstragring ausbildet und selbst tragfähig ist. Dies stellt auch die positive Eigenschaft dar.

Infolge der Trennflächen, die einen Kluftgrundwasserleiter darstellen, fließt Grundwasser dem Tiefenlager zu. Das Kristallingestein ist daher hinsichtlich seiner Permeabilität nicht als geologische Barriere wirksam. Diese Funktion muss durch (geo-)technische Barrieren, wie z. B. Bentonit, und chemisch inerte Behälter übernommen werden.

Hohe Temperaturen haben keine Auswirkungen auf das Mineralgefüge von Kristallingestein. Je nach Mineralbestand werden diese unterschiedlich abgeleitet. Die Wärmeleitfähigkeit ist gut, jedoch geringer als beim Steinsalz. Infolge der erforderlichen geotechnischen Barrieren, kann die Wärmeleitfähigkeit des Kristallingesteins jedoch nicht vollständig genutzt werden.

3. Rückholbarkeit

Die Rückholbarkeit der in tiefen geologischen Formationen gelagerten Reststoffe ist heutzutage ein wichtiger Aspekt im Umgang mit radioaktiven Reststoffen. Seit den 1970er Jahren beschäftigen sich zahlreiche nationale und internationale Organisationen und Arbeitsgruppen mit der Entwicklung eines Konzeptes der Entsorgung in tiefengeologischen Formationen. Seit den 1990er Jahren werden dabei die Konzepte zur Rückholbarkeit und Bergbarkeit in die Überlegungen einbezogen.

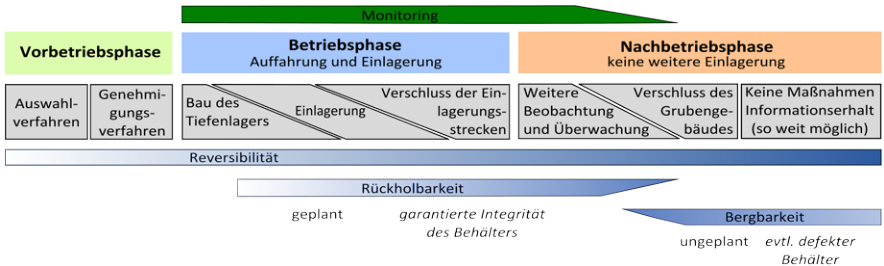


Abbildung 3: Zeitliche Zuordnung der Begriffe „Reversibilität, Rückholbarkeit und Bergbarkeit“ zu den „Lebensphasen“ eines Tiefenlagers.

Zu unterscheiden sind zunächst die Begriffe Reversibilität, Rückholbarkeit bzw. Option zur Rückholung und Bergbarkeit. In der Abbildung 3 werden diese Begriffe in den „Lebenszyklus“ eines Tiefenlagers eingeordnet. Die Abbildung 4 zeigt eine zeitliche Zuordnung dieser Begrifflichkeiten.

Reversibilität bezieht sich auf Entscheidungsprozesse während und nach der Projektdurchführung, d. h. der Planung und Auslegung, dem Bau und Betrieb des Tiefenlagers bis hin zur vollständigen Rückabwicklung des Projektes. Es geht darum sicherzustellen, dass die Umsetzung und die Technologien flexibel bleiben. So sind in jeder Phase des Programms Umkehrungen oder Änderungen einer oder einer Reihe von früheren Entscheidungen möglich [NEA, 2001]. Eine Reversion der Entscheidung zur Einlagerung ist auch nach dem Verschluss eines Endlagers denkbar.

Rückholbarkeit bedeutet, dass über eine Zeitperiode hinweg technische Möglichkeiten bestehen, die Abfallbinde sicher und planmäßig wieder aus dem Tiefenlager zurückzuholen. Diese Zeitperiode kann die Betriebsphase der Einlagerung umfassen, aber auch deutlich darüber hinausgehen. Die technischen Schwierigkeiten wachsen stark an, wenn die Handhabbarkeit der Einlagerungsbehälter nicht mehr gegeben ist. Rückholbarkeit ist die technische Folgerung aus dem Prinzip der Reversibilität, d. h. die Möglichkeit die Entscheidung der Abfalleinlagerung umzukehren.

Von einer Bergung ist auszugehen, wenn das Endlager bereits stillgelegt und verschlossen ist. Sie erfordert bergmännische Verfahren für die Wiedergewinnung der Reststoffe, d. h. eine Bergung ist nur mit relativ großem technischem Aufwand zu erreichen [ESK, 2011]. Die Integrität der Abfallbehälter ist zu diesem Zeitpunkt nicht mehr notwendigerweise gewährleistet.

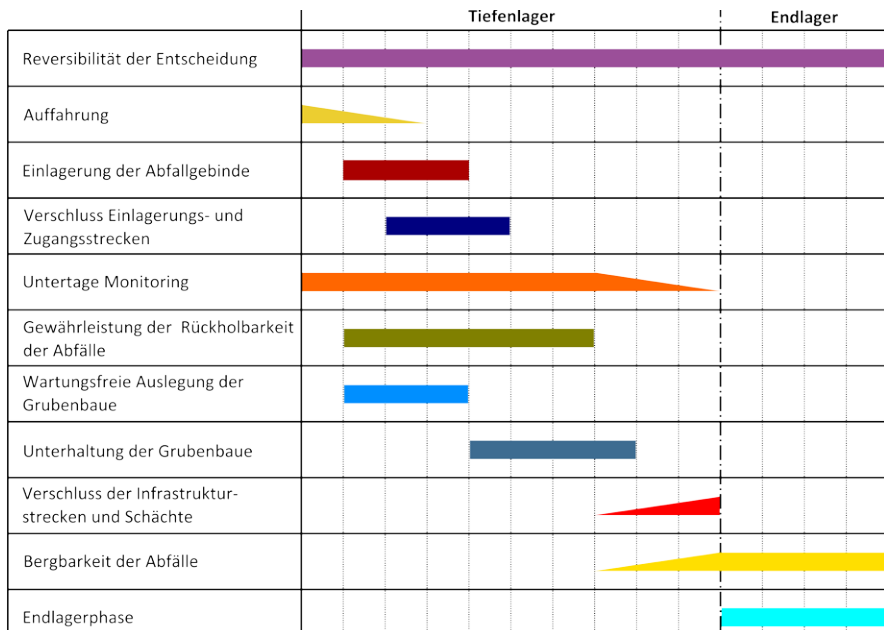


Abbildung 4: Zeitliche Einordnung der Reversibilität, Rückholbarkeit und Bergbarkeit

Die zweite Bedeutung des Begriffes wird im Standortauswahlgesetz (§ 2 StandAG, 23.07.2013) definiert: Bergung sei die ungeplante Rückholung von radioaktiven Reststoffen aus einem Endlager und eine Notfallmaßnahme. Der Begriff Bergbarkeit definiert damit nur, dass eine Bergung möglich ist [BMU, 2010]. Die Betriebsphase eines Tiefenlagers beginnt mit dem Auffahren der Schächte und der Strecken. Ab diesem Zeitpunkt ist mit den untertägigen Messungen im Rahmen des Monitorings zu beginnen.

Die Einlagerung der Abfallgebinde erfolgt nach der Auffahrung der ersten Einlagerungsstrecken. Mit Beginn der Einlagerung ist auch die Rückholbarkeit der Reststoffe zu gewährleisten. Wie im Folgenden noch eingehender erläutert wird, sind die Einlagerungsstrecken nach der Einlagerung der Behälter zu versetzen und mit einem Abdichtungselement zu verschließen.

Während der Betriebsphase soll, soweit möglich, das Tiefenlager wartungsfrei betrieben werden, um eine kontinuierliche Einlagerung zu ermöglichen.

Nach dem Erreichen der Lagerkapazitäten beginnt die Nachbetriebsphase, in der, zeitlich begrenzt, die Rückholbarkeit aufrechterhalten wird. Die zeitliche Begrenzung wird durch die Degradation der technischen bzw. geotechnischen Systeme und die Integrität der geologischen Barriere oder aber durch entsprechende nichttechnische Entscheidungen bestimmt.

Bis zum Ende der Gewährleistung der Rückholbarkeit ist das untertägige Monitoring weiterzuführen. Die Infrastrukturstrecken und Schächte werden offengehalten. Im Fall der erwarteten, d. h. planmäßigen Entwicklung des Tiefenlagers und der Entscheidung die Reststoffe nicht zurückzuholen, erfolgt die Überführung des Tiefenlagers in ein Endlager. Damit werden alle Grubenbaue versetzt und das Grubengebäude verschlossen. Nach dieser Phase ist dann nur noch eine Bergbarkeit möglich. Aus dieser Abfolge ergeben sich die folgenden zukünftig zu untersuchenden Aspekte:

- Dauer der möglichen Offenhaltung der Infrastruktur- und Monitoringstrecken sowie Infrastrukturbereiche und Schächte
- Veränderungen der Integrität der Barrierensysteme
- Langzeitstabilität geotechnischer Schutzsysteme (Dämme, Ausbau etc.)
- Langzeitbeständigkeit von Behältersystemen
- Identifizierung der maßgebenden zu beobachtenden Einflussfaktoren auf Systemveränderungen
- Möglichkeiten des Monitorings im Nah- und Fernbereich der Abfälle
- Möglichkeiten der Wartung oder des Austausches von Messeinrichtungen
- Betrachten von Interventionstechniken zur sicheren Rückholbarkeit.

Weiterhin sind Szenarienanalysen bzw. Gefährdungsbilder und Risikoabschätzungen, wie z. B.:

- zu inakzeptablen gebirgsmechanischen Zuständen,
- zum Verlust der Gebrauchstauglichkeit der Hohlräume,
- zu nicht beherrschbarem Flüssigkeitszutritt und
- zur Schädigung der Behältersysteme

durchzuführen und eine Bewertung des technischen Risikos vorzunehmen.

Generell ist festzustellen, dass mit dem Grad und der Dauer der Offenhaltung eine höhere Beanspruchung des Ausbaus und des Wirtsgesteins entsteht. Dies beeinflusst den zeitlichen Rahmen der Offenhaltung.

4. Monitoringbasiertes Life-Cycle-Engineering der geotechnischen Schutzsysteme

Für die planmäßige Rückholbarkeit der Reststoffe muss die Zugänglichkeit der Einlagerungsbereiche sichergestellt werden. Dafür sind Ausbausicherungen und andere geotechnische Bauwerke erforderlich, deren Nutzungsdauer bis zum Ende der Rückholoption gewährleistet sein muss. Außerdem muss ebenso die Dauerhaftigkeit der geotechnischen Barrieren bis zum Zeitpunkt einer möglichen Rückholung der Reststoffe sichergestellt werden.

Um mögliche Störungen des Einlagerungsbetriebs zu vermeiden, werden wie oben bereits ausgeführt, der Ausbau und das Monitoringsystem vom Beginn bis zum Ende des Einlagerungsbetriebs möglichst wartungsfrei ausgelegt. Eine völlige Wartungsfreiheit über die Dauer der Rückholbarkeit zu erreichen, dürfte aufgrund der Einwirkungen auf die Grubenbaue kaum möglich sein, oder die Dauer der Rückholoption stark einschränken. Daher wird in der weiteren Bearbeitung des Forschungsvorhabens davon ausgegangen, dass nach der Einlagerungsphase eine Wartung und ggf. Sanierung der untertägigen Infrastruktur durchgeführt werden kann. Darüber hin-

aus können nach der Einlagerungsphase die Sicherheitskonzepte des Bergbaus angesetzt werden. Die Zustandsänderungen über die Lebensdauer der geotechnischen Bauwerke, des Ausbaus der Strecken und Schächte, Versatz- und Verfüllmaterial sowie der Abdichtungsbauwerke sollen auf der Grundlage eines noch zu entwickelnden Monitoringsystems messtechnisch erfasst werden. Außerdem sind das zeitlich veränderliche Verhalten der Baustoffe sowie die Einwirkungen der radioaktiven Reststoffe auf die Baustoffe und das Wirtsgestein zu berücksichtigen. Dafür werden mit dem weiteren Fortschritt der Bearbeitung des Forschungsvorhabens die im Bauwesen üblichen Methoden des Life-Cycle-Engineerings an die speziellen Erfordernisse von Tiefenlagern angepasst.

Auf der Grundlage des Life-Cycle-Engineerings werden die erforderlichen Sanierungsmaßnahmen und -zeitpunkte identifiziert, um die Dauerhaftigkeit und Funktionalität der Einlagerungsstrecken und -bohrlöcher, Infrastrukturstrecken und Schächte, sowie Abdichtungsbauwerke und damit die Lang-

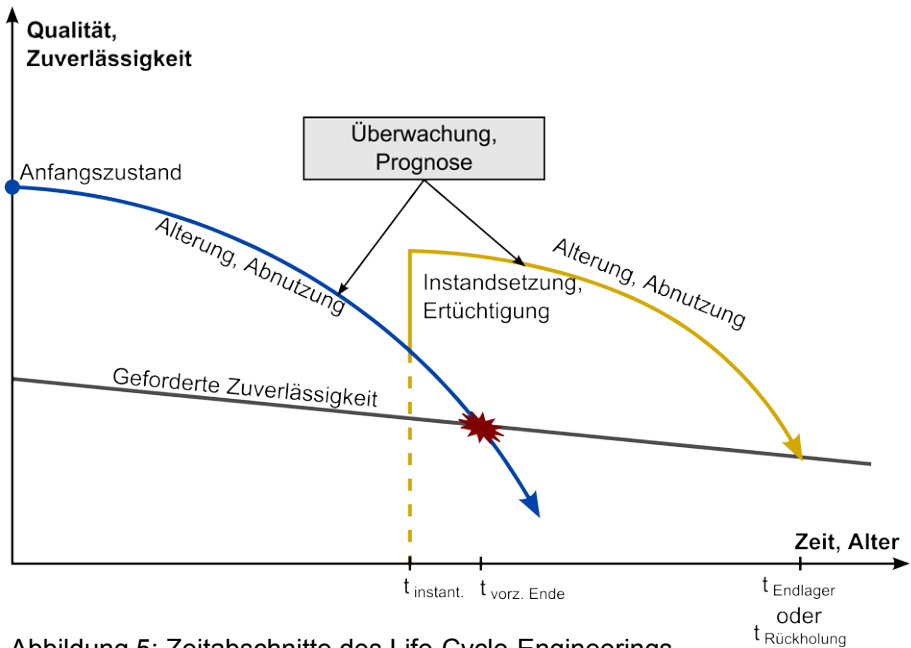


Abbildung 5: Zeitabschnitte des Life-Cycle-Engineerings

zeitsicherheit eines Tiefenlagers gewährleisten zu können (vgl. Abbildung 5). Die Zustandsänderungen der geotechnischen Bauwerke sowie des geologischen Nahfeldes müssen messtechnisch durch eine Standortüberwachung erfasst werden. Daten über den Spannungszustand im Gebirge, Verformungen und Verschiebungen, Porenwasserdrücke, Temperaturänderungen, Gasbildung und Luftfeuchtigkeit sind zu sammeln, auszuwerten und zu interpretieren. Von besonderer Bedeutung ist die Wartung und Langlebigkeit des Monitoringsystems. Wichtig ist auch die korrekte Datenerfassung und -übertragung. Die langen Zeiträume der Überwachung sind nach dem derzeitigen Stand der Technik nicht ohne periodischen Austausch der Messgeber möglich. Letztendlich sind die aus dem Monitoring hervorgehenden Daten und deren Interpretation eine Grundlage für die Entscheidung zur Rückholung oder zur Überführung in ein Endlager.

Die Analyse und Interpretation von Messdaten stellt jedoch eine große ingenieurtechnische Herausforderung dar. Der Konzeption von Messprogrammen werden im Allgemeinen Ingenieurmodelle zugrunde gelegt, die häufig Vereinfachungen enthalten und somit die Realität nicht genau abbilden. Dies kann dazu führen, dass die Messdaten hinsichtlich der Erwartungen nicht plausible Ergebnisse liefern und damit für weitergehende Entscheidungen unbrauchbar erscheinen. Diesem Konflikt ist im Zuge der Bearbeitung des Forschungsvorhabens intensiv nachzugehen.

5. Generische Referenzmodelle mit Rückholbarkeit der Abfälle

5.1. Allgemeines

Wie oben bereits beschrieben, ist es für die weitere Bearbeitung des Forschungsvorhabens notwendig, die Szenarien für die Option der Rückholung einzuschränken. Hierbei stehen die Kriterien für ein geeignetes Monitoring des Tiefenlagersystems sowie der weitgehende Erhalt der Funktionsfähigkeit der technischen und geotechnischen Barrieren und der Integrität der geologischen Barriere in Abhängigkeit der verschiedenen Wirtsgesteine im

Vordergrund. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die Szenarien in Abhängigkeit des Wirtsgesteins unterscheiden.

Eine Abstimmung und ein Abgleich der Ansätze mit dem VP 5 ist von wesentlicher Bedeutung, da ein Tiefenlager bei erwarteter, d. h. planmäßiger Entwicklung in ein Endlager überführt werden soll. Mit den vorgeschlagenen, generischen Modellen sollen daher die geotechnischen Aspekte der möglichen Offenhaltungsdauern, der erforderlichen Ausbausicherung, des Wartungs- bzw. Sanierungsbedarfs der offen gehaltenen Grubenbaue und der mögliche Grad der Offenhaltung für die potenziellen Wirtsgesteine ermittelt und gegenübergestellt werden (s. Abbildung 6). Eine wesentliche Zielgröße ist dabei die mögliche Dauer der Offenhaltung und damit die Beobachtung der Veränderung der Zustandsgrößen durch ein Monitoring.

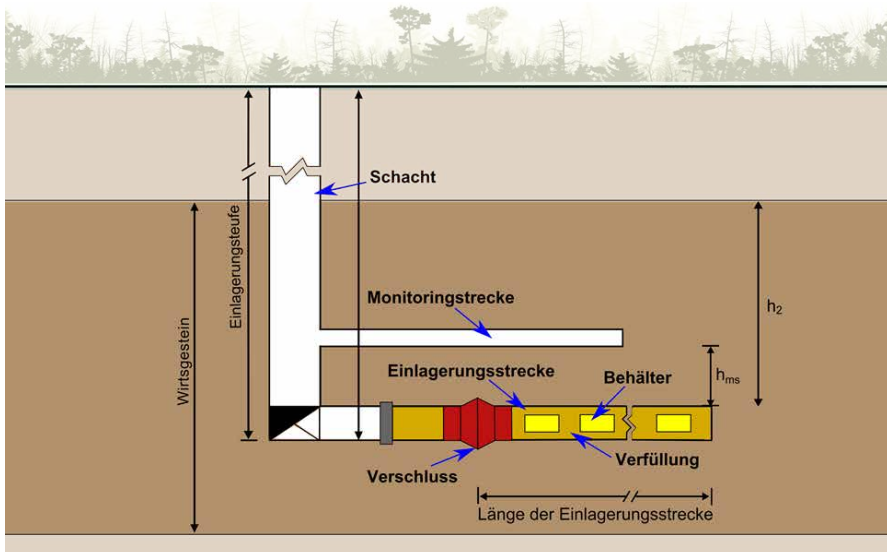


Abbildung 6: Konzept für das Modell eines generischen Tiefenlagers mit Option der Rückholung der Abfälle

Für die numerischen Berechnungen werden den generischen Modellen folgende Randbedingungen zugrunde gelegt:

- Eine planmäßige und sichere Rückholung der Abfallgebinde ist zu gewährleisten. Aus diesem Grund werden die Querschnitte der Endlagerungsstrecken, Schächte und Infrastrukturstrecken entsprechend dem Stand der Technik für Untertagetransporte gewählt.
- Es wird von der erwarteten Entwicklung des Tiefenlagers ausgegangen, d. h. kein Zutritt von Wasser oder Lösung durch unerwartetes Absaufen. Eventuell vorhandenes Formationswasser wird mit berücksichtigt.
- Die Einlagerung erfolgt in Behältern, deren Abmessungen den deutschen POLLUX-Behältern entsprechen. Diese werden in einer ersten Phase in Einlagerungsstrecken eingelagert. Untersuchungen zur Bohrlochlagerung erfolgen später.
- Für die Abmessungen der Grubenbaue werden die Vorgaben aus der Einlagerungstechnik für POLLUX-Behälter, Schachtdurchmesser 7,50 m, Zugangsstrecken $b/h = 7,60 \text{ m} / 3,80 \text{ m}$, Einlagerungsstrecken $b/h = 5,10 \text{ m} / 3,70 \text{ m}$ entsprechend der VSG [Bollingerfehr et al., 2011, Bollingerfehr et al., 2012] angenommen. In die Einlagerungsstrecken werden jeweils 6 Behälter eingelagert.
- Die Einlagerungsstrecken werden nach der Einlagerung der Abfallgebinde versetzt und mit einem Abdichtelement verschlossen, um einerseits das radiologische Risiko für die Beschäftigten sowie die Risiken bei unvorhergesehenen Entwicklungen, unbefugtem Zutritt etc. zu minimieren und andererseits einen Ausbauwiderstand zur Minimierung der Auflockerungszonen zu erzeugen (vgl. Abbildung 6). Das Abdichtungselement wird zunächst mit einer Länge von 10 m und einem Rechteckquerschnitt mit abgerundeten Ecken berücksichtigt. In Abhängigkeit von der Entwicklung der Auflockerungszone werden der Querschnitt und die Länge angepasst.

- Während der Einlagerungsphase wird das Erfordernis der Wartungsfreiheit unterstellt.
- Das Monitoring wird im Nahbereich der Einlagerungskammern vorgenommen, so dass Monitoringstrecken erforderlich sind. Hierbei wird zunächst angenommen, dass diese Strecken oberhalb der Einlagerungsstrecken liegen und 2,60 m hoch sind. Von den Monitoringstrecken werden Bohrlöcher in Richtung der Einlagerungsstrecken abgeteuft. Sollte im weiteren Verlauf der Untersuchungen festgestellt werden, dass Messungen im Nahbereich der Einlagerungskammern nicht vertretbar sind, wird ein Alternativkonzept mit einer Strecke mit „Dummy“-Einlagerungsbehältern weiterverfolgt.
- Die Sohlen der Monitoringstrecken liegen 40 m oberhalb der Einlagerungssohle.
- Die Schächte, die Infrastrukturstrecken und Monitoringstrecken werden offengehalten. Die Zeitdauer der Offenhaltung geht als Variable in die Untersuchungen ein.
- Während der Betriebsphase wird das Erfordernis einer weitgehenden Wartungsfreiheit unterstellt.
- Nach der Betriebsphase werden die Möglichkeit einer Sanierung und die Umstellung auf bergbauliche Sicherheitskonzepte für die noch offenen Grubenbaue unterstellt.
- Für die Wirtsgesteine wird ein plausibler Parametersatz zugrunde gelegt.
- Die Entwicklung von Gasdrücken aufgrund der Korrosion von Behältern und des Ausbaus wird in den Modellen nicht berücksichtigt.

Eine Übersicht über die einzelnen Abmessungen der Tiefenlagermodelle der unterschiedlichen Wirtsgesteine befindet sich in den Anhängen 1 und 2. Im Folgenden werden die Besonderheiten für jedes Referenzmodell erläutert, typische gemittelte Materialparameter angegeben und in Steckbriefen (Anhänge 3 bis 7) zusammengefasst.

5.2. Generisches Tiefenlagermodell für Steinsalz in flacher Lagerung

Das generische Tiefenlagermodell für Steinsalz in flacher Lagerung berücksichtigt die thermischen, hydraulischen und mechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins. Das Steinsalz in flacher Lagerung liegt sölilig vor und wird von einem nur wenig gestörten Deckgebirge überlagert, welches ebenfalls in söliliger Lagerung vorliegt. Die vergesellschafteten Sedimente wie Anhydrit und Ton- und Kalkstein bilden demnach zusammenhängende, flachlagernde Schichten. Da keine großen tektonischen Kräfte auf das Steinsalz gewirkt haben, muss nach den bisherigen Erkenntnissen im Vergleich zu Steinsalz in steiler Lagerung von vergleichsweise höheren Feuchtigkeiten im Steinsalz ausgegangen werden. Dies hat eine geringere Festigkeit und eine höhere Kriechfähigkeit des Salzes zur Folge. Aktuelle Untersuchungen geben allerdings Hinweise darauf, dass die Unterschiede nicht sehr groß sein müssen. Dem wird zukünftig weiter nachgegangen.

Die Grubengeometrie ist den Gegebenheiten anzupassen. Das zweisölilige Tiefenlager ist innerhalb einer ca. 150 m mächtigen Salzschieht angelegt. Oberhalb der Einlagerungssohle ist das Wirtsgestein mindestens 100 m mächtig. Zur Abdichtung der Einlagerungsstrecken wird ein Damm aus Salzbeton angenommen. Der Damm hat während der Offenhaltungsphase eine Abdichtfunktion. Deshalb wird vor dem Errichten die Auflockerungszone entfernt, der Durchmesser des Damms ist dadurch größer als die abzudichtende Strecke. Die Kontur ist der Strecke nachempfunden. Für das luftseitige Verfüllmaterial wird ebenso wie für die Einlagerungsstrecken und die später zu verfüllenden Infrastruktur- und Monitoringstrecken Salzgrus verwendet, welches in den Einlagerungsbereichen trocken eingebracht wird, damit keine Lösung an den Behälter gebracht wird. In den Infrastrukturbereichen wird es leicht angefeuchtet eingebracht, um ein schnelleres Zukriechen der Restporosität zu ermöglichen [vgl. Bollingerfehr, 2012]. Die Materialparameter für den Salzgrus sind im Anhang 3 aufgeführt.

Als Parameter werden für das Wirtsgestein eine Dichte von 2.200 kg/m^3 , ein Elastizitätsmodul von 31 GPa und eine Poissonzahl von 0,27 angesetzt. Die Berechnungen werden mit dem Stoffmodell BGRa durchgeführt, da das primäre und tertiäre Kriechen für die Aufgabenstellung zunächst von unterge-

ordneter Bedeutung sind. Für die Modelle mit Steinsalz in flacher Lagerung wird die Kriechklasse 5 angenommen. Der dazugehörige Kriechansatz und die Werte sind im Anhang 3 dargestellt.

Die Permeabilität des Steinsalzes liegt bei unter 10^{-20} m^2 und verdeutlicht, dass das Wirtsgestein im Vergleich zu anderen Bereichen der Geosphäre sehr gering permeabel ist. Die Wärmeleitfähigkeit wird mit $5,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, einem im Vergleich zu anderen Gesteinen sehr hohen Wert, berücksichtigt.

Als Einlagerungsteufe werden 600 m angesetzt. Die Teufe begründet sich im Schutz vor Oberflächenveränderungen auf das Tiefenlagersystem. Durch die eher südliche Lage der Vorkommen von Steinsalz in flacher Lagerung in Deutschland kann das Szenario einer Gletscherüberfahrung unberücksichtigt bleiben.

5.3. Generisches Tiefenlagermodell für Steinsalz in steiler Lagerung

Das generische Tiefenlagermodell für Steinsalz in steiler Lagerung berücksichtigt die thermischen, hydraulischen und mechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins und die besonderen Lagerungsgeometrien des Wirtsgesteins. Im Unterschied zum Steinsalz in flacher Lagerung haben beim Aufstieg eines Salzstockes die tektonischen Kräfte das Steinsalz mehr oder weniger intensiv verfaltet. Dabei ist besonders der in einzelne Blöcke zerbrochene Anhydrit zu beachten, da dieser nicht kriecht und deswegen Spannungen aufnehmen kann, die durch das Auffahren von Hohlräumen im Steinsalz entstehen. Dabei kann die Gesteinsfestigkeit überschritten werden und es können neue Wasserwegsamkeiten im Anhydrit entstehen. In einem Salzstock ist stärker kriechfähiges Steinsalz im Kern aufzufinden, die Kriechfähigkeit nimmt zum Rand hin ab. Bei einem Endlager werden die Infrastrukturstrecken daher im Randbereich eines Salzstockes aufgefahren, der Einlagerungsbereich im Zentralteil. Damit ist sichergestellt, dass für die schnell zu verfüllenden Einlagerungsbereiche ein zeitnahe Einschluss in das Wirtsgestein erreicht wird. Die Infrastruktur in den weniger kriechfähigen Bereichen am Rande des Salzstockes kann länger offengehalten werden.

Ob dieses Vorgehen bei einem Tiefenlager zielführend ist, ist im Rahmen der weiteren Bearbeitung des Forschungsvorhabens zu überprüfen. Infolge der längeren Offenhaltungsdauer dürften sich die Auflockerungszonen im kriechfähigeren Salzgestein auch stärker ausprägen, die dann wiederum höhere Permeabilitäten bedingen. Zwischen den Anhydritblöcken und den Einlagerungsbereichen wird in den Untersuchungen ein Sicherheitsabstand von 100 m unterstellt. Als Parameter werden für das Wirtsgestein, eine Dichte von 2.195 kg/m^3 ein Elastizitätsmodul von 29,75 GPa und eine Poissonzahl von 0,29 angesetzt. Die Berechnungen werden mit dem Stoffmodell BGRa durchgeführt, da das primäre und tertiäre Kriechen für die Aufgabenstellung zunächst von untergeordneter Bedeutung sind. Es wird die Kriechklasse 5 angenommen. Die dazugehörige Formel und die Werte sind im Anhang 4 dargestellt. Bei einer Modelloptimierung kann für den Schachtquerschnitt ggf. eine niedrigere Kriechklasse angenommen werden. Für das Dammbauwerk gelten die gleichen Annahmen wie beim Steinsalz in flacher Lagerung.

Die Werte für Wärmeleitfähigkeit und Permeabilität entsprechen den Werten für Steinsalz in flacher Lagerung. Als Einlagerungsteufe werden 800 m angesetzt, der Abstand der Einlagerungssohle zum Hutgestein beträgt mindestens 200 m. Diese Werte begründen sich im Schutz des Endlagersystems vor Oberflächenveränderungen, wie Vereisungen der Erdoberfläche, eventuelle Subrosion des Salzes, und dem weiteren Salzaufstieg.

5.4. Generisches Tiefenlagermodell im Ton

Auch für das generische Tiefenlager im Ton werden zunächst dieselben geometrischen Abmessungen der Hohlräume wie bei den anderen Wirtsgesteinen angesetzt. Um Hohlräume dieser Größe in diesem Wirtsgestein standicher zu halten, ist ein steifer Ausbau erforderlich. Die Dimensionierung des Ausbaus wird im Rahmen des Modellierungsprozesses näher untersucht.

Als Eingangsparameter für die Festigkeit werden die Werte des belgischen Boom Clays verwendet. Es wird von isotropen Materialeigenschaften ausgegangen. Der Boom Clay hat vergleichbare Eigenschaften mit den im Tertiär abgelagerten und als mögliche Tiefenlagerstandorte in Betracht kommenden Tonen in Deutschland. Seine Dichte beträgt 2.000 kg/m^3 . Der E-Modul wird mit 0,3 GPa in die Untersuchungen eingehen, die Poissonzahl

mit 0,43, sodass nahezu isotrope Spannungszustände zu erwarten sind. Die Permeabilität liegt bei $3,06 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$. Das Wirtsgestein ist demnach ähnlich dicht wie das Steinsalz.

Der Wärmeleitfähigkeitskoeffizient wird mit 1,69 W/m-K berücksichtigt. Um mögliche Schädigungen des Wirtsgesteins durch Mineralumwandlungen zu vermeiden, wird angenommen, dass die Einlagerungsbehälter bei einer Temperatur von höchstens 100 °C eingelagert werden. Die einzelnen Parameter sind im Anhang 5 zusammengefasst.

Als Verfüllmaterial wird Bentonit für die Einlagerungsstrecken angesetzt. Bentonit verringert beim Quellen seine Porosität und Permeabilität. Allerdings hängt der Grad des Quellens von der mineralogischen Zusammensetzung des Bentonits und den chemischen Bestandteilen des Grundwassers oder der Lösung ab. Die Permeabilität vom Bentonit ist von der Porosität abhängig, die in [GSS, 1984] mit $6,237 \cdot 10^{-10} \cdot n^{4,497}$ angegeben ist. Der Bentonit MX-80 entwickelt bei einer Einbaudichte von 1.700 kg/m^3 unter Laborbedingungen, d. h. einer Bewässerung mit destilliertem Wasser, einen Quelldruck von 10 MPa. Der Quelldruck ist abhängig von der Einbaudichte. Für die Kohäsion können im trockenen, gepressten Zustand ca. 15 MPa und für den Reibungswinkel 25° angenommen werden. Nach dem Quellen verringern sich aufgrund des Wassergehalts die Kohäsion zu 0,4 bis 2,5 MPa und der Reibungswinkel auf 6° . Bentonit hat eine Wärmeleitfähigkeit von 1,10 W/m-K bei 30% Wassersättigung, die linear auf 1,35 W/m-K bei vollständiger Wassersättigung ansteigt [Brenner, 1988]. Es wird von einer vollständigen Wassersättigung am Ende des Quellvorganges ausgegangen. Der Bentonit hätte dann eine Dichte von etwa 1.400 kg/m^3 . Im Modell wird von einer homogenen Aufsättigung ausgegangen, die allerdings in einer realistischen Umgebung kaum zu erreichen sein dürfte [vgl. Palacios et al., 2014].

Das Abdichtungsbauwerk in der Einlagerungsstrecke besteht ebenfalls aus Bentonit. Aufgrund des Quelldrucks, der sich bei der Aufsättigung entwickelt, ist zur Aufrechterhaltung dieses Druckes ein Widerlager erforderlich. Hierfür wird zunächst Beton oder Mauerwerk angenommen. Die Ausbauseicherung der Strecke muss bei der Errichtung des Abdichtungsbauwerkes rückgebaut werden. Der grubenseitige Bereich könnte mit artgleichem Ton verfüllt werden. Als Einlagerungsteufe wird 400 m angesetzt, es wird eine 100 m mächtige Tonschicht angenommen. Das Wirtsgestein ist oberhalb

der Einlagerungssohle mindestens 50 m mächtig. Die Einlagerungsteufe wird aufgrund des im Vergleich ungünstigeren Festigkeitsverhaltens etwas geringer als bei den anderen Wirtsgesteinen angesetzt. Damit ist auch eine Reduktion des Schutzes vor Oberflächenveränderungen verbunden.

5.5. Generisches Tiefenlagermodell in Tonstein

Tonstein ist ein Gestein, das ein Trennflächensystem parallel zur größten Hauptspannung bei der Versenkung ausgebildet hat. Er unterscheidet sich vom Ton durch eine geringere Quellfähigkeit und eine höhere Festigkeit. Für ein Tiefenlager in Tonstein wird deswegen deutlich weniger Ausbau benötigt als für ein Tiefenlager in Ton.

Zur Berücksichtigung des anisotropen Verhaltens werden senkrecht zur Schichtung ein E-Modul von 6 GPa, parallel ein E-Modul von 12 GPa sowie eine Poissonzahl von 0,27 angenommen. Diese Werte entsprechen den Ansätzen des in der Schweiz untersuchten Opalinustons, der auch in Deutschland vorkommt. Seine Dichte beträgt 2.450 kg/m^3 .

Die Permeabilitätswerte schwanken in Abhängigkeit von der Ausprägung der Trennflächen im Gebirgsbereich sehr stark. Sie reichen von 10^{-17} m^2 direkt nach der Auffahrung bis 10^{-22} m^2 nach der Selbstverheilung. Im Modell wird zunächst von einer Permeabilität von 10^{-22} m^2 ausgegangen. Die Wärmeleitfähigkeit wird mit $1,7 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ senkrecht zur Schichtung und $3,23 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ etwas höher angenommen als bei Ton. Auch hier wird, um mögliche Schädigungen des Wirtsgesteins durch Mineralumwandlungen zu vermeiden, vorausgesetzt, dass die Einlagerungsbehälter bei einer Temperatur von maximal $100 \text{ }^\circ\text{C}$ eingelagert werden. Die einzelnen Parameter sind im Anhang 6 zusammengefasst.

Als Verfüllmaterial wird Bentonit für die Einlagerungsstrecken verwendet. Es gelten die gleichen Randbedingungen wie beim Ton (Kapitel 5.4). Ein Damm hat die Schutzfunktion gegenüber Wasserzutritten aus dem offenen Grubengebäude. Er ist, wie beim Ton, aus Bentonit aufgebaut und erhält ein Widerlager. Der grubenseitige Bereich könnte mit artgleichem Ton verfüllt werden, der Schachtverschluss würde wieder aus Bentonit bestehen.

Als Einlagerungsteufe werden 600 m angesetzt, es wird eine Tonsteinformation mit mindestens 100 m Mächtigkeit angenommen. Das Wirtsgestein ist

oberhalb der Einlagerungstrecken 50 m mächtig. Auch hier liegt der Grund für die gewählte Teufe im Schutz der Tiefenlagersystems vor Oberflächenveränderungen, wie z. B. der Erosion. Für die süddeutschen Vorkommen wird hiermit auch den überlagernden Karstgrundwasserleiter Rechnung getragen.

5.6. Generisches Tiefenlagermodell in Kristallin

Für das generische Tiefenlagermodell im Kristallingestein sind besonders die Trennflächensysteme zu berücksichtigen. Durch diese Trennflächensysteme kann dem Tiefenlager Grundwasser zutreten. Aufgrund dessen sind die hohen Anforderungen an die geotechnischen Barrieren der wesentliche Unterschied zu den anderen Tiefenlagermodellen.

Für die isotropen mechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins wird ein generischer Granit verwendet. Es werden ein E-Modul von 73,8 GPa und eine Poissonzahl von 0,22 angenommen. Die anisotropen Eigenschaften infolge des Trennflächensystems werden im Projektverlauf bearbeitet. Die Permeabilität wird mit $5,6 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ deutlich höher angesetzt als bei den vorhergehenden aufgeführten Wirtsgesteinen. Sie ist ggf. den Trennflächensystemen noch anzupassen. Die Daten für das Modell sind im Anhang 7 zusammengefasst. Die Wärmeleitfähigkeit des Gebirges ist mit 3,0 W/m·K höher als bei den Tongesteinen. Die Einlagerungstemperatur wird allerdings durch die Empfindlichkeit der Bentonitbarriere auf 100 °C beschränkt. Sie ist besonders wichtig, da sie die Abfälle gegen die Wasserzuflüsse aus dem Gebirge abschirmt. Auch hier werden dem Bentonit die Eigenschaften, die im Kapitel 5.4. erläutert sind, zugeschrieben. Der Damm zum Verschluss der Einlagerungstrecken dient in diesem Fall im Wesentlichen als Widerlager für die Aufrechterhaltung des Quelldrucks. Die Geometrien der Querschnitte werden auch bei diesem Modell in gleicher Größe gewählt. Für das Tiefenlagermodell im Kristallingestein ist eine Einlagerungsteufe von mindestens 300 m vorgesehen. Kristallin als Hartgestein ist im Vergleich zu den anderen Wirtsgesteinen weniger von Erosion betroffen. Das Wirtsgestein reicht im Modell bis zur Erdoberfläche.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Durch Rückholoption der eingelagerten Reststoffe und das Monitoring ist ein längeres Offenhalten der Infrastrukturstrecken erforderlich als für ein Endlager. Zur Reduktion von Risiken mit radiologischen Auswirkungen und der Beeinträchtigung der Integrität des Wirtsgesteins im Nahbereich der Einlagerungsstrecken werden die vorgesehenen Untersuchungen mit versetzten und durch ein Abdichtungsbauwerk verschlossenen Einlagerungsstrecken durchgeführt. Diese Maßnahmen dienen dem Erhalt der passiven Sicherheit und erleichtern damit die Überführung des Tiefenlagers in ein Endlager bei erwarteter, d. h. planmäßiger Entwicklung und Entscheidung gegen eine Rückholung. Die entwickelten generischen Tiefenlagermodelle tragen dieser Vorgabe Rechnung. Die weiteren Untersuchungen werden für die zurzeit diskutierten optionalen Wirtsgesteine Salz in steiler und flacher Lagerung, Ton, Tonstein und kristallines Hartgestein durchgeführt. Die Lichtraumabmessungen der Grubenbaue orientieren sich am Stand der Technik für untertägige Transporte, werden aber den Erfordernissen der verschiedenen Wirtsgesteine ggf. angepasst.

Zur Gewährleistung eines Monitorings und der hierzu erforderlichen Wartung der Systeme sind entsprechende zusätzliche Strecken vorgesehen. Die Dauer der Rückholoption nach der Einlagerungsphase geht als variable Größe in die Untersuchungen ein und ist in diesen Untersuchungen abhängig von gebirgsmechanischen und konstruktiven Einflussfaktoren. Diese werden in numerischen Modellierungen untersucht, bewertet und ggf. angepasst. Zu einem späteren Zeitpunkt werden auch neben der Streckenlagerung Untersuchungen zur Einlagerung in Bohrlöchern begonnen. In Steinsalz in steiler Lagerung oder im Kristallingestein kann eine derartige Einlagerung von Kokillen in langen vertikalen Bohrlöchern erfolgen, in Wirtsgesteinen mit geringerer Mächtigkeit sind nur kürzere vertikale Bohrlöcher denkbar. In diesem Zusammenhang wird auch das Konzept der Einlagerung von POLLUX-Behältern in horizontalen Bohrlöchern überprüft.

Die vorgesehenen generischen Modelle sollen einen Vergleich der Tiefenlager in Abhängigkeit von den potenziellen Wirtsgesteinen aus geotechnischer Sicht ermöglichen. Ein Bezug zu konkreten Standorten ist nicht gegeben. Sie dienen darüber hinaus der internen Diskussion mit den Vertikal- und Transversalprojekten des ENTRIA-Projektes.

Literaturverzeichnis

Ad-hoc Group on Retrievability and Reversibility (2001): Considering reversibility and retrievability in geologic disposal of radioactive waste. Hg. v. Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD). Radioactive Waste Management Committee (RWMC); Nuclear Energy Agency (NEA).

AkEnd (2002): Empfehlungen des AkEnd - Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Abschlussbericht. Unter Mitarbeit von Detlef Appel, Bruno Balthes, Volkmar Bräuer, W. Brewitz, K. Duphorn, R. Gömmel et al. Köln (Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte).

Bollingerfehr, Wilhelm; Filbert, Wolfgang; Lerch, Christian; Tholen, Marion (2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5. GRS - 272. DBE TECHNOLOGY GmbH (Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, VSG).

Bollingerfehr, Wilhelm; Filbert, Wolfgang; Dörr, Sabine; Herold, Philipp; Lerch, Christian; Burgwinkel, Paul et al. (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6. GRS 281 (Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, VSG).

Brasser, T.; Miede, R. (2008): Anhang Verfüllen Technische Verfüll- und Verschlussmaßnahmen in einem Endlager. Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Reststoffe in Deutschland. GRS-247. Hg. v. Öko-Institut und Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS). Köln, Garching b.

München, Berlin, Braunschweig (Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Reststoffe in Deutschland).

Brenner, R. P. (1988): Bohrlochversiegelung: Materialeigenschaften von hochverdichtetem Bentonit mit Eignungsbeurteilung. Technischer Bericht 88-04. Nagra. Baden.

Bruns, J.; Boetticher, L.; Doose, H.; Cottrell, M.; Wolff, P.; Günther, R.-M. (2011): Glazigene Beeinflussung von Wirtsgesteinstypen Ton und Salz und deren Einflüsse auf die Eignung zur Aufnahme eines HAW-Endlagers. Abschlussbericht. Hg. v. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). GOLDER ASSOCIATES GmbH; IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH. Celle.

Entsorgungskommission (ESK) (2011): Rückholung/Rückholbarkeit hochradioaktiver Reststoffe aus einem Endlager. ein Diskussionspapier. Entsorgungskommission, RSK/ESK.

GSS, Beratender Ingenieure AG (1984): Verfüllen und Versiegeln von Stollen, Schächten und Bohrlöchern. Band 1. ntb84-33. Unter Mitarbeit von J. Studer, W. Ammann, P. Meier, C. Müller und E. Glauser. Hg. v. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA). Zürich.

Mrugalla, S. (2011): Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Bericht zum Arbeitspaket 2. GRS-275 (Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben).

Palacios, B.; Garcia-Siñeriz, J.L.; Mayor, J.C. (2014): Outcome of the Dismantling of "EB" Experiment. In Schäfers, A.; Fahland, S. (2014) International Conference on the Performance of Engineered Barriers. Proceedings, BGR, Hannover.

Radioactive Waste Management Committee, RWMC (2001): Reversibility and Retrieval in Geologic Disposal of Radioactive Waste. Reflections at the International Level. Nuclear Energy Agency (NEA).

Quellenangaben Inhalt

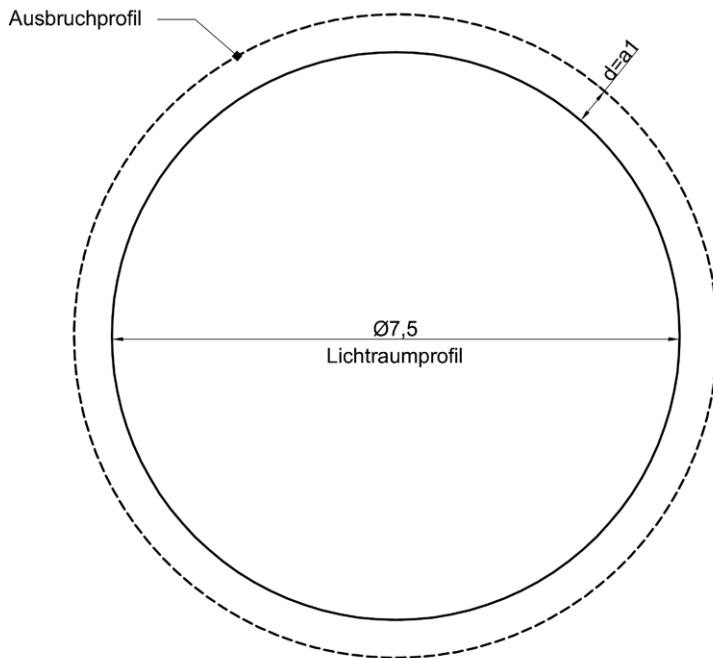
¹Quellen: Steinsalz flach gelagert: Bünsow, Rüdiger (Hg.) (2012): 100 Jahre Salzwerk Bernburg. 1912 - 2012. esco - European Salt Company. Kassel; Steinsalz steil gelagert: cc-by-nc D Tanner; Ton: Public domain; Tonstein: cc-by-sa V. Mintzlauff; Kistallin: Vira J. (2013): Challenges in implementation of geological repositories: In: European Commission (Hg.): Euradwaste'13. 8th EC Conference on Management of Radioactive Waste

Anhang

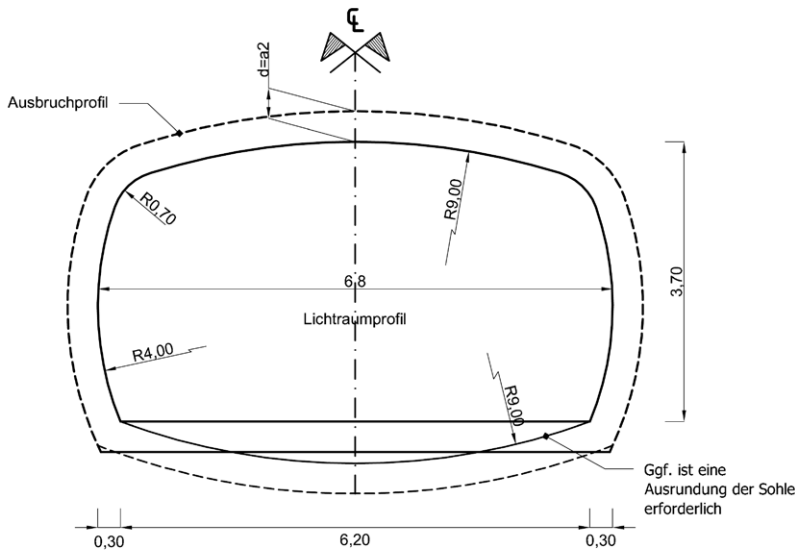


Anhang 1

Querschnitt des Schachtes (Schnitt A-A) Maßstab 1:100



Querschnittprofil der Infrastrukturstrecke Maßstab 1:100

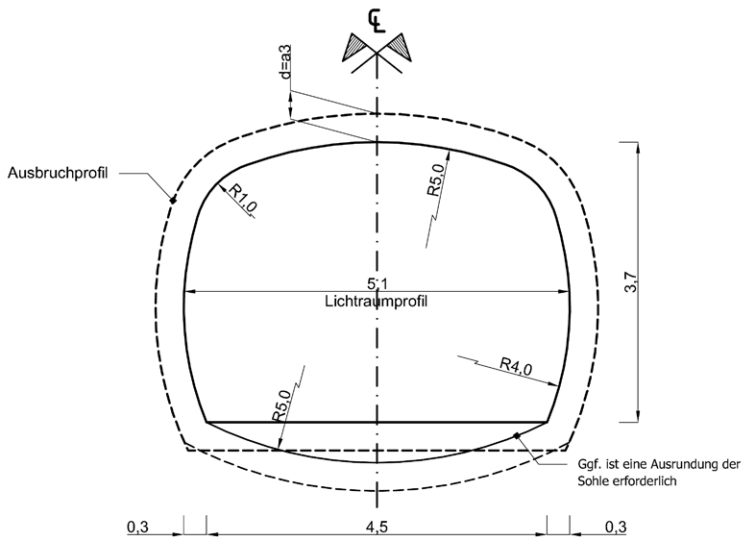


a1, Wirtgestein-Teufe-abhängig / a2, Wirtgestein-Teufe-abhängig

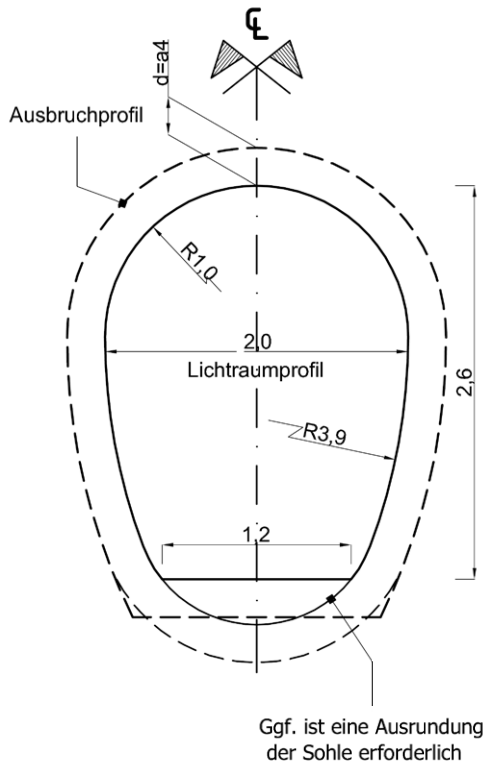
* Die Schnittführung ist den Abhängen 3 bis 7 zu entnehmen

Anhang 2

Querschnitt der Einlagerungsstrecke (Schnitt B-B) Maßstab 1:100



Querschnittprofil der Monitoringstrecke (Schnitt C-C) Maßstab 1:50

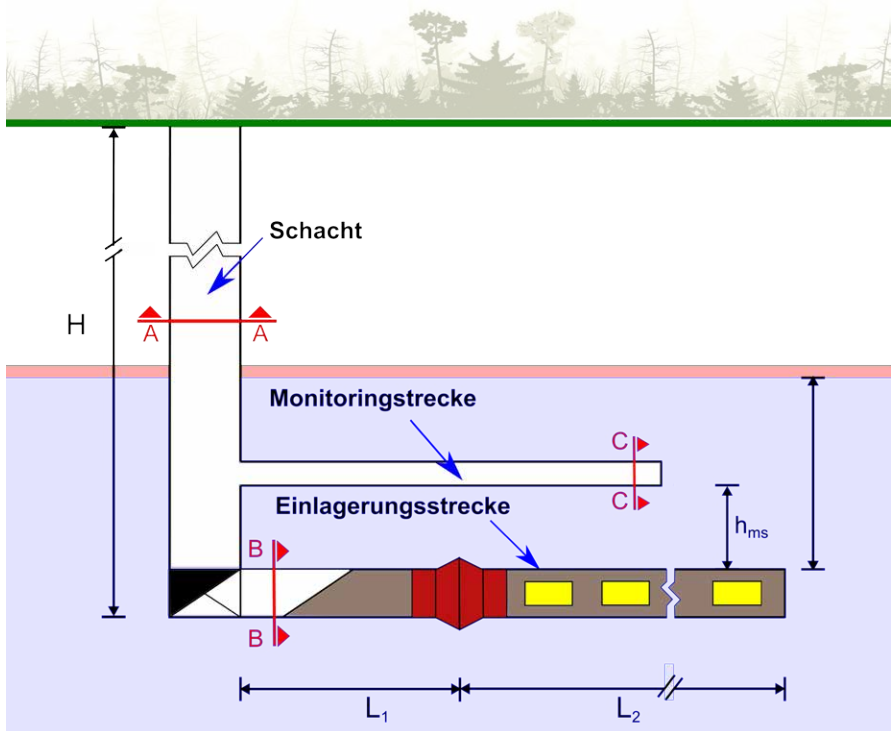


a3, Wirtgestein-Teufe-abhängig / a4, Wirtgestein-Teufe-abhängig

* Die Schnittführung ist den Abhängen 3 bis 7 zu entnehmen

Anhang 3

Generisches Tiefenlagermodell im Steinsalz in flacher Lagerung



Wirtsgesteinstyp: Steinsalz in flacher Lagerung

Mindestteufe: 600 m

Maße

$H \geq 600$ m

$h_1 = 40$ m

$h_2 \geq 100$ m

$L_1 = 40$ m

$L_2 = 57$ m

Mechanische Eigenschaften: isotrop

Parameter	Einheit	Min. Werte	Max. Werte	Angenommene Werte	Quelle
p Dichte	[kg/m ³]	2.110,00	2.190,00	2.200,00	[12]
E-Modul	[GPa]	31,00		31,00	[2]
v Poissonzahl	[-]	0,27		0,27	[12]
K Kompressionsmodul	[GPa]	20,70		20,70	
G Schubmodul	[GPa]	12,40		12,40	
Kriechparameter Kriechklasse 5					
A	[1/d]	0,18		0,18	[5]
Q	[kJ/mol]	54,00		54,00	[5]
R	[kJ/(mol·K)]	8,31E-03		8,31E-03	[5]
n	[-]	5,00		5,00	[5]
σ*	[MPa]	1,00		1,00	[5]

Hydraulische Eigenschaften

Parameter	Einheit	Min. Werte	Max. Werte	Angenommene Werte	Quelle
k _r Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]	1,00E-14		1,00E-14	[1]
k Permeabilität	[m ²]	1,00E-14		1,00E-21	[1]

Thermische Eigenschaften

Parameter	Einheit	Min. Werte	Max. Werte	Angenommene Werte	Quelle
λ Wärmeleitfähigkeitkoeffizient	[W/m·K]	5,50		5,50	[12]
C_p spezifische Wärmekapazität (T = 20 °C Normale Bedingungen)	[J/kg·K]	847 J / (kg·K) + 0,000274 · T(°C)			[12]
		847,005		847,005	
α_t Wärmeausdehnungskoeffizient	[1/°C]	3,50E-05	3,90E-05	3,70E-05	[12]

Verfüllungsmaterial: Salzgrus, trocken

Mechanische Eigenschaften: isotrop

Parameter	Einheit	Min. Werte	Max. Werte	Angenommene Werte	Quelle
p Dichte	[kg/m ³]	1.430,00	2.190,00	1.810,00	[7]
E-Modul	[GPa]	11,45		11,45	[7]
v Poissonzahl	[-]	0,28		0,28	[7]
K Kompressionsmodul	[GPa]	8,60		8,60	[7]
G Schubmodul	[GPa]	4,48		4,48	[7]
Kriecheigenschaften	μ [-]	abh. von Porosität			[7]
	A [1/d]	0,18		0,18	[7]
	Q [kJ/mol]	54,00		54,00	[7]
	R [kJ/(mol·K)]	8,314E-03		8,314E-03	[7]

Hydraulische Eigenschaften

Parameter	Einheit	Min. Werte	Max. Werte	Angenommene Werte	Quelle
k Permeabilität	[m ²]	6,237 10 ⁻¹⁰ · n ^{4,497} mit n > 0,3 %			[7]
n = 0,25 %		2,816E-21		2,816E-21	
n = 0,1 %		2,014E-23		2,014E-23	

Thermische Eigenschaften

Parameter	Einheit	Min. Werte	Max. Werte	Angenommene Werte	Quelle
λ Wärmeleitfähigkeit koeffizient T = 20 °C; n = 0,1 %	[W/m·K]	5,363		5,363	[7]
C_p spezifische Wärmekapazität T = 20 °C	[J/kg·K]	847,005		847,005	[7]
α_t Wärmeausdehnungskoeffizient	[1/°C]	4,20E-05		4,20E-05	[7]

Abdichtungsbauwerk: Salzbeton M2

Mechanische Eigenschaften: isotrop

Parameter	Einheit	Min. Werte	Max. Werte	Angenommene Werte	Quelle
p Dichte	[kg/m ³]	1.970,00		1.970,00	[8]
E-Modul: trockenes Endlager	[GPa]	15,00		15,00	[8]
28 Tage		11,70		11,70	
530 Tage		23,90		23,90	
v Poissonzahl (28 Tage)	[-]	0,33		0,33	[8]
K Kompressi- onsmodul	[GPa]	14,71		14,71	
G Schub- modul	[GPa]	5,64		5,64	
f _{ce} einaxiale Druckfestig- keit	[MPa]	33,00		33,00	[8]

Hydraulische Eigenschaften

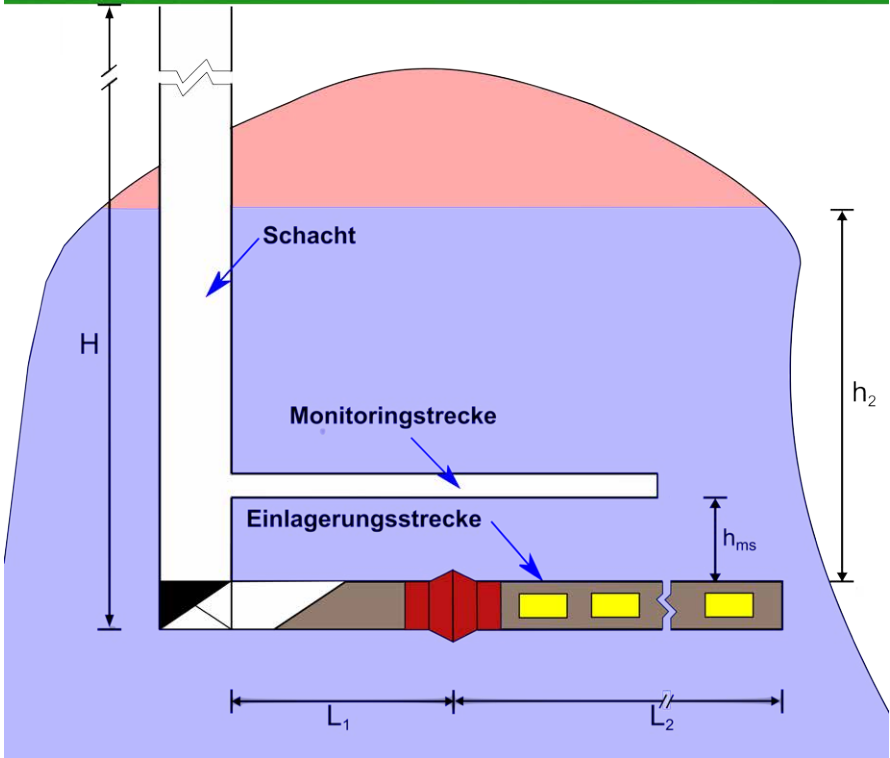
Parameter	Einheit	Min. Werte	Max. Werte	Angenommene Werte	Quelle
k Permeabilität	[m ²]	1,00E-18		1,00E-18	[9]
k Gaspermeabilität	[m ²]	3,70E-20		3,70E-20	[9]
k Permeabilität NaCl-Lösung	[m ²]	6,00E-24		6,00E-24	[9]
k Permeabilität Q-Lösung	[m ²]	3,00E-23		3,00E-23	[9]

Thermische Eigenschaften

Parameter	Einheit	Min. Werte	Max. Werte	Angenommene Werte	Quelle
λ Wärmeleitfähigkeitkoeffizient	[W/m·K]	1,14		1,14	[12]
C_p spezifische Wärmekapazität	[J/kg·K]	0,93		0,93	[12]
T = 20 - 90 °C					
α_t Wärmeausdehnungskoeffizient	[1/°C]				
<i>Erwärmung</i>		4,80E-05		4,80E-05	[14]
<i>Abkühlung von 60 °C auf 0 °C</i>		3,20E-05		3,20E-05	[14]

Anhang 4

Generisches Tiefenlagermodell im Steinsalz in steiler Lagerung



Wirtsgesteinstyp: Steinsalz in steiler Lagerung
Mindestteufe: 600 m

Maße

$H \geq 800$ m
 $h_1 = 40$ m
 $h_2 > 200$ m
 $L_1 = 40$ m
 $L_2 = 57$ m

Mechanische Eigenschaften

Parameter	Einheit	Min. Werte	Max. Werte	Angenommene Werte	Quelle
p Dichte	[kg/m ³]	2.190,00	2.200,00	2.195,00	[1]
E-Modul	[GPa]	25,00	34,50	29,75	[1]
v Poissonzahl	[-]	0,25	0,32	0,29	[1]
K Kompressionsmodul	[GPa]	16,67	31,94	24,31	
G Schubmodul	[GPa]	10,00	13,07	11,53	
Kriechparameter Referenzkriechgesetz BGRa					
A	[d ⁻¹]	0,18		0,18	[5]
Q	[kJ/mol]	54,00		54,00	[5]
R	[kJ/(mol·K)]	8,31E-03		8,31E-03	[5]
n	[-]	5,00		5,00	[5]
σ*	[MPa]	1,00		1,00	[5]

Hydraulische Eigenschaften

Parameter	Einheit	Min. Werte	Max. Werte	Angenommene Werte	Quelle
k _f Durchlässigkeitsbeiwert (sehr schwach durchlässig)	[m/s]	9,81E-17		9,81E-17	[1]
k Permeabilität	[m ²]	1,00E-21		1,00E-21	

Thermische Eigenschaften

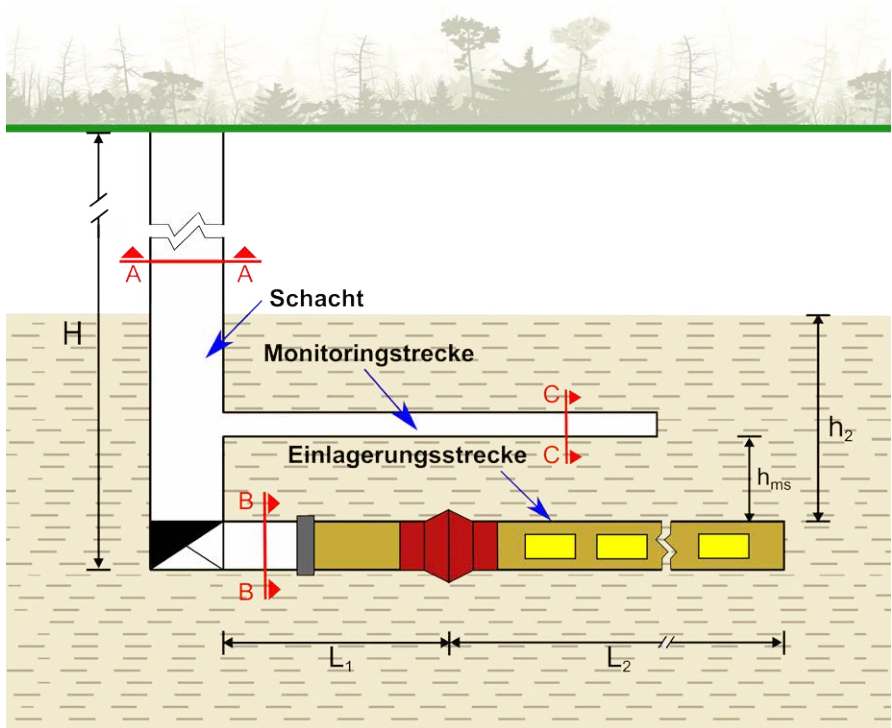
Parameter	Einheit	Min. Werte	Max. Werte	Angenommene Werte	Quelle
λ Wärmeleitfähigkeitskoeffizient	[W/m·K]	5,50		5,50	[3]
C_p spezifische Wärmekapazität	[J/kg·K]	847 kJ / (kg·K) + 0,000274 · T (°C)			[12]
T = 20 °C		847,005		847,01	[12]
α_t Wärmeausdehnungskoeffizient	[1/°C]	3,50E-05	3,90E-05	3,70E-05	[12]

Verfüllungsmaterial: Salzgrus, trocken (s. Anhang 3)

Abdichtungsbauwerk: Salzbeton M2 (s. Anhang 3)

Anhang 5

Generisches Tiefenlagermodell im Ton



Wirtsgesteinstyp: Ton
Mindesttiefe: 400 m

Maße
 $H \geq 400$ m
 $h_1 = 40$ m
 $h_2 \geq 50$ m
 $L_1 = 30$ m
 $L_2 = 63$ m

Mechanische Eigenschaften: Isotrop, Boom Ton

Parameter	Einheit	Min. Werte	Max. Werte	Angenommene Werte	Quelle
p Dichte	[kg/m ³]	2.000,00		2.000,00	[1]
E-Modul	[GPa]	0,20	0,40	0,30	[1]
v Poissonzahl	[-]	0,43		0,43	[1]
K Kompressionsmodul	[GPa]	0,48	0,95	0,72	
G Schubmodul	[GPa]	0,07	0,14	0,11	

Hydraulische Eigenschaften

Parameter	Einheit	Min. Werte	Max. Werte	Angenommene Werte	Quelle
k _f Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]	2,00E-12	4,00E-12	3,00E-12	[6]
k Permeabilität	[m ²]	3,06E-19		3,06E-19	[1]

Thermische Eigenschaften

Parameter	Einheit	Min. Werte	Max. Werte	Angenommene Werte	Quelle
λ Wärmeleitfähigkeitskoeffizient	[W/m·K]	1,69		1,69	[1]
C_p spezifische Wärmekapazität (wassergesättigt)	[J/kg·K]	1.440,00		1.440,00	[1]
α_t Wärmeausdehnungskoeffizient	[1/°C]	3,47E-04		3,47E-04	[1]

Verfüllungsmaterial und Abdichtungsbauwerk: Bentonit MX-80

Mechanische Eigenschaften: isotrop

Parameter	Einheit	Min. Werte	Max. Werte	Angenommene Werte	Quelle
ρ Dichte	[kg/m³]	1.400,00	2.000,00	1.700,00	[10]
E-Modul	[GPa]	0,18	0,53	0,36	[10]
ν Poissonzahl	[-]	0,20	0,50	0,35	[10]
K Kompressionsmodul	[GPa]				
G Schubmodul	[GPa]				
p_q Quelldruck	[MPa]	0,36		0,36	[10]

Hydraulische und thermische Eigenschaften

Parameter	Einheit	Min. Werte	Max. Werte	Angenommene Werte	Quelle
k Permeabilität	[m ²]	6,237 · 10 ⁻¹⁰ · n ^{4,497} mit n > 0,3 %			[10]
n = 0,3 %		2,78E-12	0,53	2,78E-12	[10]
C _p spezifische Wärmekapazität	[J/kg·K]				[15]
w = 35 % (ρ = 1.700 kg/m ³)				1.000,00	
w = 100 %				1.350,00	
λ Wärmeleitfähigkeit	[W/m·K]				[15]
w = 20 %		0,70		0,70	
w = 30 %		1,10		1,10	
w = 35 %		1,29		1,29	
α _t Wärmeausdehnungskoeffizient	[1/°C]				[15]
w = 35 %; T = 20 °C		3,00E-04		3,00E-04	
w = 100 %; T = 20 °C					

Ausbau: Beton C20/25

Mechanische Eigenschaften

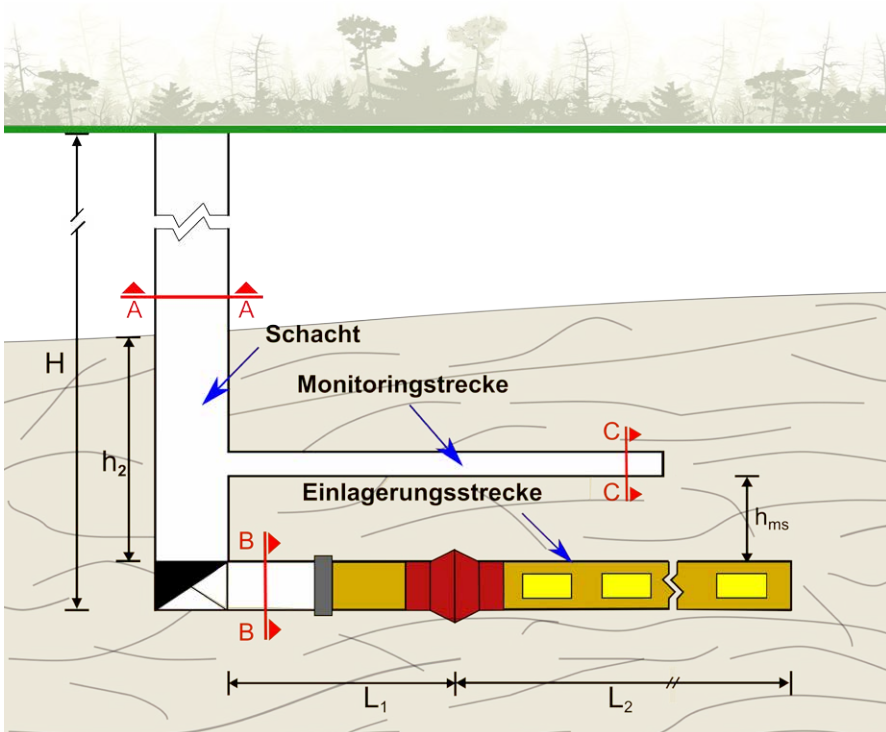
Parameter	Einheit	Min. Werte	Max. Werte	Angenommene Werte	Quelle
p Dichte	[kg/m ³]	2.400,00		2.400,00	[9]
E-Modul	[GPa]	29,00		29,00	[9]
v Poissonzahl	[-]	0,20		0,20	[9]
K Kompressionsmodul	[GPa]	16,11		16,11	
G Schubmodul	[GPa]	12,08		12,08	
f _{ctk;0,05} Zugfestigkeit	[MPa]	1,50		1,50	[9]
(unterer Norm-Quantilwert)					
f _{ck,cyl} Druckfestigkeit	[MPa]	20,00		20,00	[9]

Thermische Eigenschaften

Parameter	Einheit	Min. Werte	Max. Werte	Angenommene Werte	Quelle
k Permeabilität	[m ²]	1,00E-16		1,00E-16	[9]
λ Wärmeleitfähigkeit-koeffizient	[W/m·K]	1,37	1,70	1,54	[9]
C _p spezifische Wärmekapazität	[J/kg·K]	850,00		850,00	[9]
α _t Wärmeausdehnungskoeffizient	[1/°C]	1,20E-05		1,20E-05	[9]

Anhang 6

Generisches Tiefenlagermodell im Tonstein



Wirtsgesteinstyp: Tongestein

Mindestteufe: 600 m

Maße

$H \geq 600$ m

$h_1 = 40$ m

$h_2 \geq 50$ m

$L_1 = 30$ m

$L_2 = 63$ m

Mechanische Eigenschaften*: anisotrop

Parameter	Einheit	Min. Werte	Max. Werte	Angenommene Werte	Quelle
p Dichte (trocken)	[kg/m ³]	2.370,00	2.530,00	2.450,00	
p Dichte (gesättigt)	[kg/m ³]	2.430,00	2.650,00	2.540,00	
E-Modul (I-Schichtung)	[GPa]	3,20	7,80	5,50	[11]
E-Modul (≠Schichtung)	[GPa]	7,70	15,10	11,40	[11]
v Poissonzahl	[-]	0,27		0,27	[11]
K Kompressionsmodul (I-Schichtung)	[GPa]	3,90		3,90	
K Kompressionsmodul (≠Schichtung)	[GPa]	8,30		8,30	
G Schubmodul (I-Schichtung)	[GPa]	2,20		2,20	
G Schubmodul (≠Schichtung)	[GPa]	2,20		1,50	
		4,50		4,50	

* Kennwerte werden in Abhängigkeit des Trennflächensystems noch in Gesteins- und Gebirgskennwerte differenziert

Hydraulische und thermische Eigenschaften

Parameter	Einheit	Min. Werte	Max. Werte	Angenommene Werte	Quelle
k_f Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]	3,50E-15		3,50E-15	[1]
k Permeabilität (Opalinuston)	[m ²]	3,50E-22		3,50E-22	[11]
λ Wärmeleitfähigkeitskoeffizient (T Schichtung)	[W/m·K]	1,54	1,86	1,70	[11]
λ Wärmeleitfähigkeitskoeffizient (ε Schichtung)	[W/m·K]	3,12	3,34	3,23	[11]
C_p spezifische Wärmekapazität	[J/kg·K]	840,00	1.000,00	920,00	[11]
α_t Wärmeausdehnungskoeffizient	[1/°C]	1,50E-06	1,00E-05	5,75E-06	[11]

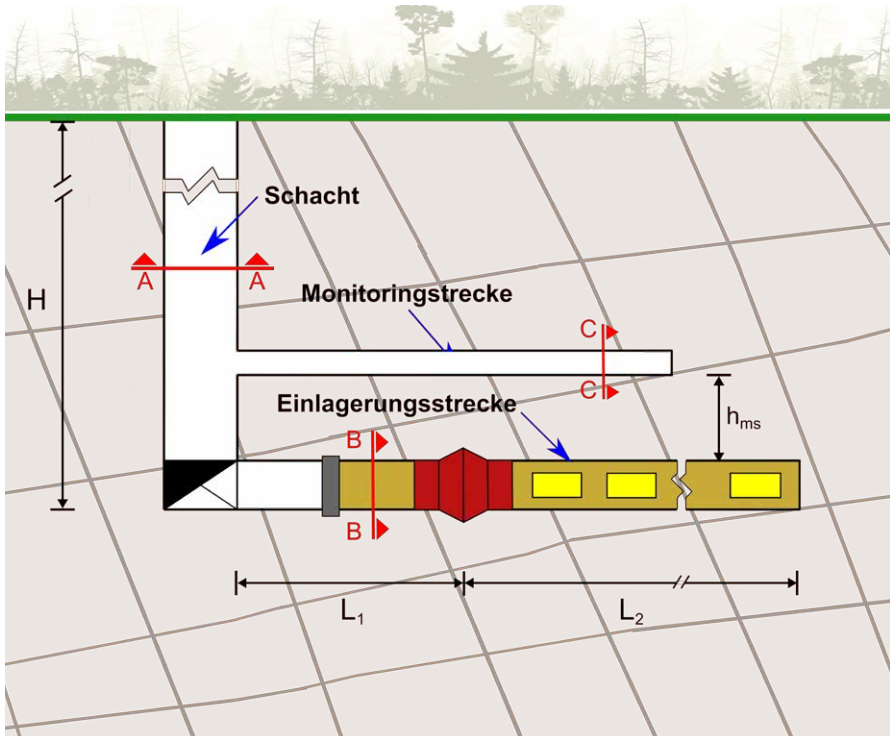
Verfüllungsmaterial und Abdichtungsbauwerk: Bentonit MX-80

(s. Anhang 5)

Ausbau: Beton (s. Anhang 5)

Anhang 7

Generisches Tiefenlagermodell im Kristallingestein



Wirtsgesteinstyp: Granit

Mindestteufe: 400 m

Maße

$H \geq 400$ m

$h_1 = 40$ m

$L_1 = 30$ m

$L_2 = 63$ m

Mechanische Eigenschaften*: anisotrop

Parameter	Einheit	Min. Werte	Max. Werte	Angenommene Werte	Quelle
ρ Dichte	[kg/m ³]	2.600,00	2.800,00	2.700,00	[1]
E-Modul	[GPa]	73,80		73,80	[4]
ν Poissonzahl	[-]	0,22		0,22	[4]
K Kompressionsmodul	[GPa]	43,90		43,90	[4]
G Schubmodul	[GPa]	30,20		30,20	[4]

* Kennwerte werden in Abhängigkeit des Trennflächensystems noch in Gesteins- und Gebirgskennwerte differenziert

Hydraulische Eigenschaften und thermische Eigenschaften

Parameter	Einheit	Min. Werte	Max. Werte	Angenommene Werte	Quelle
k_f Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]	2,23E-15	4,00E-04	2,00E-04	[1]
k Permeabilität	[m ²]	2,27E-22	4,08E-11	2,04E-11	[1]
λ Wärmeleitfähigkeitskoeffizient (unter Normalbedingungen)	[W/m·K]	1,35	3,40	3,00	[13]
C_p spezifische Wärmekapazität (wassergesättigt)	[J/kg·K]	840,00	1.260,00	1.050,00	[13]
α_t Wärmeausdehnungskoeffizient	[1/°C]	5,00E-06	1,10E-05	8,00E-06	[13]

Verfüllungsmaterial und Abdichtungsbauwerk: Bentonit MX-80
(s. Anhang 5)

Ausbau: Beton (s. Anhang 5)

Quellenangaben Anhang

[1]. Brasser, T.; Herbert, H.J.; Miehe, R.; Schmidt, G. (2008): Anhang Wirtsgesteine. Potenzielle Wirtsgesteine und ihre Eigenschaften. GRS - 247. Hg. v. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) und Öko-Institut. Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig (Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland).

[2]. Committee on the Waste Isolation Pilot Plant (1996): The Waste Isolation Pilot Plant. A Potential Solution for the Disposal of Transuranic Waste. Unter Mitarbeit von C. Fairhurst. H. Adler. J. Blomeke und S. B. Clark. Washington. D.C.: National Academy Press. zuletzt geprüft am 13.01.2014.

[3]. Kertz, W. (1969): Einführung in die Geophysik. Bibliographisches Institut, Mannheim (BI-Hochschul-taschenbücher. 275).

[4]. Flac3D Version 4.0 (2009). User's Guide. Itasca Consulting Group Inc. Minneapolis (Minnesota, USA).

[5]. Hunsche, U.; Schulze, O.; Walter, F.; Plischke, I. (2003): Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein. Abschlussbericht. Hg. v. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover (Projekt Gorleben). (nicht veröffentlicht).

[6]. Volckaert, G.; Bernier, F.; Sillen, X.; van Geet, M. (2004): Similarities and Differences in the Behaviour of Plastic and Indurated Clays. In: Europäischen Kommission (Hg.): EURADWASTE'04. EURADWASTE. Luxemburg-Kirchberg, 29.03.2004 - 31.03.2004.

[7]. Müller-Lyda, Ingo (1999): Eigenschaften von Salzgrus als Versatzmaterial im Wirtsgestein Salz. Bericht über den Workshop des Bundesamts für Strahlenschutz und des Projektträgers Entsorgung vom 18. und 19. Mai 1999. Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig: GRS (GRS, 143).

[8]. Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE) (2009): Anforderungen an Salzbeton als Baustoff für Abdichtungsbauwerke im Steinsalz. Hg. v. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben, G 296).

[9]. Pettenpohl, H.; Pier, J. (2006): Konzeptplanung für die Errichtung und Nachweisführung für die Funktionstüchtigkeit von temporären Abdichtungen ERAM. Hg. v. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben).

[10]. GSS, Beratender Ingenieure AG (1984): Verfüllen und Versiegeln von Stollen, Schächten und Bohrlöchern. Band 1. ntb84-33. Unter Mitarbeit von J. Studer, W. Ammann, P. Meier, C. Müller und E. Glauser. Hg. v. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA). Zürich.

[11]. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) (2002): Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. NAGRA NTB 02-03. Wettingen, zuletzt geprüft am 05.09.2013.

[12]. Bräuer, Volkmar (2011): Description of the Gorleben site - Part 4. Geotechnical exploration of the Gorleben salt dome. Unter Mitarbeit von Volkmar Bräuer, Ralf Eickemeier, Dieter Eisenburger, Christoph Grisseemann, Jürgen Hesser, Stefan Heusermann et al. Hg. v. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover (Geologisches Jahrbuch, C 74).

[13]. Schön, Jürgen (2011): Physical properties of rocks. A workbook. Oxford: Elsevier (Handbook of Petroleum Exploration and Production, v. 8).

[14]. Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlagern (DBE) (2004): Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen – Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2. Hg. v. Bundesamt für Strahlenschutz (Bfs) (Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben, S. 192).

[15]. Man, A.; Martino, J. B. (2009): Thermal, Hydraulic and Mechanical Properties of Sealing Materials. Hg. v. Nuclear Waste Management Organization (NWMO). Atomic Energy of Canada Limited. Toronto, Ontario (NWMO TR-2009-20).



ISSN (Print): 2367-3532
ISSN (Online): 2367-3540