



CHRISTA-II

Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallingestein in Deutschland

BGE TEC 2021-15



BGE TECHNOLOGY GmbH

CHRISTA-II

Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallingestein in Deutschland

BGE TEC 2021-15

Autor*innen

Michael Jobmann &
Victoria Burlaka

Datum

15.09.2021

Auftraggeber

BMWi

Vertreten durch den Projektträger Karlsruhe, KIT

Förderkennzeichen

02E11617A

Dieser Bericht wurde erstellt im Rahmen des FuE-Projektes
"Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland (CHRISTA-II)".

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



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



PTKA
Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	2
2.1	Einlagerungsoptionen	2
2.2	Bezug zum Sicherheitskonzept.....	3
2.2.1	Prämissen zur Konzeptentwicklung.....	3
2.2.2	Sicherheitsfunktionen, Leistungsziele und Designanforderungen.....	5
2.3	Verfüll- und Verschlusselemente und Materialien	7
2.3.1	Dichtelemente aus Bentonit.....	7
2.3.2	Dichtelemente aus Asphalt und Bitumen.....	8
2.3.3	Dichtelemente aus Beton	11
2.3.4	Dichtelemente aus Sorelbeton	12
2.3.5	Dichtelemente oder Widerlager aus Salzbeton.....	12
2.3.6	Widerlager aus Beton.....	12
2.3.7	Aufsättigungselemente.....	13
2.3.8	Pufferschichten (Bischofit).....	13
2.3.9	Streckenversatz	14
2.3.10	Filter- bzw. Übergangsschichten	14
3	Einlagerungs- und Verschlusskonzept für die Option multipler ewG.....	15
3.1	Behälter	18
3.2	Der einschlußwirksame Gebirgsbereich (ewG)	19
3.3	Geotechnische Verschlussbauwerke innerhalb eines ewG	21
3.3.1	Bohrlochverschluss	21
3.3.2	Versatz in der Bohrlochüberfahrungsstrecke.....	22
3.3.3	Streckenverschluss	22
3.3.4	Spezifikation der Dichtheitsanforderungen und Leistungsziele	24
3.3.4.1	Grundlagen.....	24
3.3.4.2	Systemanalyse	26
3.3.4.3	Leistungsziele und Designanforderungen	29
3.4	Geotechnische Verschlussbauwerke außerhalb der ewG	35
3.4.1	Verschlüsse im Bereich von hydraulisch wirksamen Klüften.....	35
3.4.2	Schachtverschluss	38
3.4.3	Rampenverschluss.....	42
3.5	Tabellarischer Überblick	44
4	Einlagerungs- und Verschlusskonzept für die Option überlagernder ewG.....	49
4.1	Behälter	50
4.2	Geotechnische Verfüll- und Verschlusselemente	52
4.2.1	Buffer und Versatz	53
4.2.2	Verschluss der Tageszugänge	55
4.2.2.1	Schachtverschluss.....	56
4.2.2.2	Rampenverschluss	59
4.3	Gesamtes Verschlussystem mit Sicherheitsfunktionen und Leistungszielen	63
5	Einlagerungs- und Verschlusskonzept für das modifizierte KBS-3-Konzept	68
5.1	Behälter	69
5.2	Buffer.....	71
5.3	Bohrlochwiderlager	72
5.4	Streckenversatz.....	74
5.5	Kluft- Schacht- und Rampenverschlüsse	77

5.6	Tabellarische Übersicht	77
6	Verschlusskonzept für Erkundungsbohrungen	82
7	Zusammenfassung	85
8	Literatur	86
	Abkürzungsverzeichnis	91

1 Einleitung

Grundlegende Elemente eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes bestehen aus der allgemeinen Sicherheitsstrategie, die auf nationalen Regularien (Sicherheitsanforderungen) und internationalen Richtlinien aufbaut, der geologischen Standortbeschreibung, sowohl was den Istzustand als auch die weitere Entwicklung betrifft, dem Endlagerstandortmodell inklusive der zugehörigen geowissenschaftlichen Datenbasis sowie einem Endlagerkonzept und dem damit verknüpften Verfüll- und Verschlusskonzept, welches speziell im Zusammenhang mit dem Integritätsnachweis zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) eine tragende Rolle einnimmt. Selbst der bestmögliche Standort kann mit dem ewG nur dann ein sicheres Endlager beherbergen, wenn es gelingt, die notwendigen Durchörterungen des ewG nach Abschluss der Einlagerung sachgerecht zu verschließen.

Das Sicherheitskonzept für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen im Kristallingestein wird im Rahmen dieses Projektes erarbeitet. Auch erste generische Standortmodelle für unterschiedliche Einlagerungsoptionen werden mit einer geowissenschaftlichen Datenbasis, die als Grundlage für Analysemodelle dient, zusammengestellt. Im Rahmen des Projektes KONEKD (Bertrams et al. 2017) wurden im Vorfeld bereits technische Endlagerkonzepte für unterschiedliche Einlagerungsoptionen im Kristallingestein entwickelt, die als Grundlage für die Entwicklung von Verfüll- und Verschlusskonzepten dienen.

Ziel des vorliegenden Berichtes ist es, Verfüll- und Verschlusskonzepte zu beschreiben, die an die verschiedenen Einlagerungsoptionen und den damit verbundenen unterschiedlichen ewG-Optionen angepasst sind. Diese Verfüll- und Verschlusskonzepte sollen dann als Grundlage dienen, um einerseits die einschlusswirksamen und damit die wesentlichen Barriere auszuweisen, die Eingang in den FEP-Katalog finden sollen und um andererseits Integritätsanalysen an den geotechnischen Barrieren durchzuführen, um zu identifizieren, unter welchen Bedingungen das geotechnische Barrierensystem seine Sicherheitsfunktionen erfüllt.

2 Grundlagen

Im Folgenden werden die Grundlagen beschrieben, die für die Entwicklung von Verfüll- und Verschlusskonzepten herangezogen werden. Dies betrifft die erfolgshöffigen Einlagerungsoptionen, den Bezug zur allgemeinen Sicherheitsstrategie und die zur Konzeption vorgesehenen Verschlussmodule und deren Materialien.

2.1 Einlagerungsoptionen

Im Zuge der Machbarkeitsuntersuchung im Forschungsprojekt CHRISTA (Jobmann et al. 2016) wurde die Übertragbarkeit des in den Sicherheitsanforderungen verankerten ewG-Konzeptes für einen Sicherheitsnachweis in Kristallingestein geprüft. Die Überprüfung erfolgte derart, dass zunächst die Grundlagen für die Formulierung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes im Kristallingestein untersucht wurden. Dies betrifft die mögliche Ausweisung eines ewG im Kristallingestein, die Möglichkeit zum Nachweis der Integrität des Wirtsgesteins sowie Berechnungen zur Migration von Radionukliden. Darüber hinaus wurde geprüft, inwieweit bestehende Behälter- bzw. Einlagerungs- und Barrierenkonzepte auf deutsche Verhältnisse übertragbar wären.

Das Vorhaben kam zu dem Ergebnis, dass sich das auf rein geotechnischen Barrieren beruhende skandinavische KBS-3-Konzept (SKB 2010a) nicht direkt auf Deutschland übertragen lässt. Eine Übertragung ist nur unter spezifischen Modifikationen möglich. Unter Anwendung des ewG-Konzeptes, ergeben sich Optionen, bei denen das kristalline Wirtsgestein entweder selbst einen oder mehrere ewG enthält oder bei denen der ewG durch überlagernde Gesteine dargestellt wird. Es lassen sich demnach zwei ewG-Typen unterscheiden:

- Typ "multipler ewG": Hierbei werden mehrere kleinere ewG-Zellen ausgewiesen, die in gering geklüfteten Gesteinsblöcken positioniert werden (Abb. 2.1 links).
- Typ "überlagernder ewG": Hierbei wird die Einschlussfunktion durch überlagernde Sedimentgesteine mit geringer hydraulischer Durchlässigkeit (z.B. Steinsalz oder Tongestein) und dem Schacht- oder Rampenverschluss gewährleistet (Abb. 2.1 rechts).

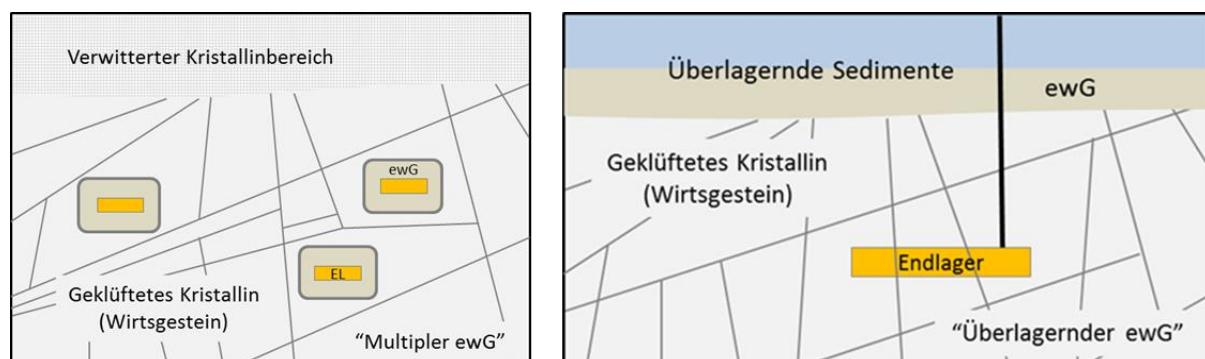


Abb. 2.1: Prinzipskizze für den ewG-Typ „multipler ewG“ (links) und den Typ „überlagernder ewG“ (rechts).

Basierend auf den so identifizierten ewG-Typen oder den notwendigen Modifikationen am KBS-3 Konzept wurden im Rahmen des Projektes KONEKD (Bertrams et al. 2017) für alle drei Konzepttypen technische Endlagerkonzepte entwickelt, die als Ausgangspunkte für die Entwicklung eines Verfüll- und Verschlusskonzeptes dienen.

2.2 Bezug zum Sicherheitskonzept

2.2.1 Prämissen zur Konzeptentwicklung

Hinweise zur Entwicklung eines Verfüll- und Verschlusskonzeptes wurden bereits im Sicherheitskonzept wiedergegeben (Jobmann et al. 2021a). Daraus lassen sich wesentliche Prämissen zur Konzeptentwicklung der Verschlussysteme ableiten.

Für die Optionen unter Einbeziehung eines ewG:

1. Die geotechnischen Verschlussbauwerke sollen, soweit wie möglich, in homogener oder diversitärer Redundanz konzipiert werden, um der Forderung der Robustheit des Barrierensystems zu genügen.
2. Zur vereinfachten Anpassung an verschiedene geologische Situationen, insbesondere im Bereich von hydraulisch wirksamen Trennflächen, soll das geotechnische Verschlussystem einen modularen Aufbau haben.
3. Eine Flüssigkeitsströmung innerhalb der Strecken soll so limitiert werden, dass eine Erosion von Versatz und Verschlussbauwerken vermieden werden kann.
4. Der Nachweis der Wirksamkeit des Dichtungssystems muss für jeden ewG erfolgen, unabhängig davon, ob der ewG einen Einlagerungsbereich umschließt oder überlagert.

Für die Option ohne Einbeziehung eines ewG:

5. Die Behälter stellen die wesentliche Barriere dar und sind so zu konstruieren, dass davon ausgegangen werden kann, dass sie die Radionuklide für den Bewertungszeitraum einschließen.
6. Die Einlagerungsbohrlöcher müssen so verschlossen werden, dass der den Behälter umgebende Buffer seine den Behälter unterstützende Funktion bestmöglich wahrnehmen kann.
7. Eine Flüssigkeitsströmung innerhalb der Bohrlochüberfahrungsstrecken soll so limitiert werden, dass eine Erosion des Versatzes vermieden werden kann.

Ausgangspunkt für die oben genannten Prämissen ist die Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle (EndlSiAnfV 2020). Darin heißt es im § 6 u. a.:

- (1) [...] für die zu erwartenden Entwicklungen im Bewertungszeitraum [ist] die Integrität des Systems der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren zu prüfen und darzustellen und seine Robustheit zu begründen. Die für den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle relevanten Eigenschaften der weiteren Barrieren des Endlagersystems [...] sind zu spezifizieren. Es ist zu prüfen und darzustellen, dass diese Eigenschaften mindestens in dem Zeitraum erhalten bleiben, in dem sie nach dem Sicherheitskonzept erforderlich sind.
- (2) Hinsichtlich der Integrität des Systems der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren ist zu prüfen und darzustellen, dass die Sicherheitsfunktionen der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren nicht erheblich beeinträchtigt werden durch
 1. die im Einlagerungsbereich möglicherweise ablaufenden chemischen und physikalischen Prozesse, insbesondere Korrasion und Erosion,
 2. im umgebenden Gebirge auftretende Spannungen, Drücke und mögliche Gebirgsbewegungen und
 3. die Temperaturentwicklung.

Ein probates Mittel, die Robustheit eines Komponentensystems gegenüber äußeren Einflüssen zu optimieren, ist die Implementierung einer Redundanz, besser noch diversitären Redundanz in das Komponentensystem. In diesem Zusammenhang soll zunächst erläutert werden, was unter einer "Redundanz" bzw. „Diversität“ zu verstehen ist.

Redundanz bedeutet das zusätzliche Vorhandensein funktional gleicher oder vergleichbarer Ressourcen eines Systems, die bei einem störungsfreien Betrieb nicht benötigt werden. Redundante Messsysteme beispielsweise haben das Ziel, die Funktions- und Ausfallsicherheit eines Systems zu erhöhen. Bei dem Aufbau redundanter Systeme wird nach IEC (2011) je nach Verwendung gleichartiger oder verschiedenartiger Einheiten unterschieden zwischen:

- **Homogener Redundanz**, (Redundanz) die bedeutet das baugleiche Komponenten parallel arbeiten. Mit dieser Redundanz lässt sich der Entwicklungsaufwand durch identische Komponenten reduzieren. Bei homogener Redundanz besteht aber eine höhere Wahrscheinlichkeit für einen Gesamtausfall aufgrund systematischer Fehler, da die Komponenten gleich sind.
- **Diversitärer Redundanz**, (Diversität) die bedeutet das unterschiedliche Komponenten mit ggf. unterschiedlichen Funktionsprinzipien zusammenarbeiten. Bei dieser Art der Redundanz wird das Risiko eines systematischen Fehlers minimiert.

Bei der Übertragung der Redundanz auf das Barrierensystem lässt sich folgendes festhalten:

Die erste Barriere für die Radionuklide ist eine technische Barriere, nämlich der Behälter oder, im Fall der Wiederaufarbeitungsabfälle, die Glasmatrix zusammen mit dem Behälter. Versagt der Behälter, so stellt bei den Konzepten mit ewG, neben dem Wirtsgestein, das geotechnische Barrierensystem (inklusive Versatz) weitere Barrieren dar, die die Aufgabe haben, die Radionuklide soweit im ewG einzuschließen, dass die Grenzwerte gemäß der Anforderungsverordnung am Rand des ewG nicht überschritten werden. Grundsätzlich sind also für diese Einlagerungsoptionen zwei signifikant unterschiedliche Barrieretypen vorhanden. In dem geotechnischen Barrierensystem werden wiederum verschiedene Module und Materialien zur Abdichtung vorgeschlagen, womit allerdings das Konzept der diversitären Redundanz - innerhalb des geotechnischen Barrierensystems selber - nicht vollständig erfüllt, aber so weit wie möglich und sinnvoll angewendet wird. Inwieweit eine Redundanz vollständig erreicht werden kann, was voraussetzt, dass mindestens zwei Barrierenmodule innerhalb des Verschlusssystems vorhanden sind, die jedes für sich allein die Radionuklide über den Bewertungszeitraum im ewG zurückhalten, kann erst beurteilt werden, wenn die Integritätsanalysen durchgeführt wurden.

Für den Behälter wurde im Rahmen des Projektes KONEKD ein Behälterkonzept vorgestellt, bei dessen Verwendung der sichere Einschluss der Radionuklide für die Optionen multipler ewG und modifiziertes KBS-3 Konzept über den Bewertungszeitraum von 1 Million Jahre erreicht werden kann. Darauf basierend soll nun der Versuch unternommen werden, die zweite Barriere, also ein geotechnisches Barrierenkonzept zu erarbeiten, das ebenfalls in der Lage ist, die Radionuklide im Bewertungszeitraum innerhalb des ewG einzuschließen. Gelingt dies, so wäre der Fall der diversitären Redundanz zumindest für das Konzept des multiplen ewG erfüllt.

Unabhängig von der angestrebten diversitären Redundanz ist noch Folgendes zu bedenken:

Das Risiko, dass ein Endlagerbehälter Produktionsfehler aufweist, die zu einem vorzeitigen Versagen führen können, wird grundsätzlich durch umfangreiche Prüfmaßnahmen bei der Behälterfertigung im Zuge der Qualitätssicherung minimiert. Angesichts der großen Anzahl einzulagernder Gebinde (ca. 15.000) ist gleichwohl für den Sicherheitsnachweis zu prüfen, ob Kontroll- und Fertigungsdefizite soweit ausgeschlossen werden können, dass möglichst kein Behälter während der Nachverschlussphase frühzeitig ausfällt.

Die SKB in Schweden hat in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) in Deutschland untersucht, welche Unsicherheiten bei der Prüfung der schwächsten Stellen des Kupferbehälters, also der Schweißnähte, verbleiben und welche Konsequenzen daraus zu ziehen sind. Als Ergebnis wurde festgestellt, dass Fertigungsfehler in Form von kleinen Rissen mit einer Tiefe von 4 mm mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % erkannt werden und Risse mit einer Tiefe von 10 mm mit nahezu 100 % (SKB 2011). Für die beiden Einlagerungsoptionen des „multiplen ewG“ und des „modifizierten KBS3-Konzeptes“ lässt sich daraus folgendes ableiten:

Im Falle des „multiplen ewG“ wird der Behälter durch eine 5 mm starke Kupferhülle umschlossen (vgl. Kap. 3.1). Für diesen Behältertyp kann davon ausgegangen werden, dass signifikante Fertigungsfehler mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % erkannt werden können. Es ist also nicht vollständig auszuschließen, dass einzelne Behälter im Bewertungszeitraum ausfallen. Mit dieser Aussage wird das Konzept der diversitären Redundanz der beiden Barrieren "Behälter" und "Verschlusssystem" rein formal nicht vollständig erfüllt. Wird für den Nachweis ein statistisch begründetes Behälterversagen unterstellt, so müssen im Rahmen des Nachweises allein das Verschlusssystem, also das geotechnische Barrierensystem, und das Wirtsgestein bzw. die ewG den sicheren Einschluss, speziell der Radionuklide, die im Zusammenhang mit den frühzeitig ausgefallenen Behältern freigesetzt wurden, gewährleisten. Die diversitäre Redundanz mit Behälter und Verschlusssystem wäre für diesen Fall a priori nicht gegeben. Auch bei der Vielzahl der Einlagerungsbohrungen verbleibt zu prüfen, ob ein statistisches Versagen im Zuge des Nachweises unterstellt werden sollte.

Im Falle des „modifizierten KBS3-Konzeptes“ wird der Behälter durch eine 50 mm starke Kupferhülle umschlossen (vgl. Kap. 5.1). Für diesen Behältertyp kann davon ausgegangen werden, dass selbst im Falle eines Defektes mit einer Tiefe von bis zu 10 mm immer noch ca. 40 mm der Kupferhülle als Korrosionsschutz verbleiben. Das im Nachweiskonzept definierte Kriterium zur Langzeitbeständigkeit kann damit erfüllt werden (Jobmann et al. 2021b, Kap. 7.2.5). Damit ist ein Ausfall während des Bewertungszeitraumes nicht anzunehmen.

Im Falle des „überlagernden ewG“ wird von einem Behälterkonzept ohne eine Kupferummantelung ausgegangen, um auch diesen Fall exemplarisch darzustellen. Ohne eine Kupferummantelung ist generell von einem Ausfall der Behälter im Bewertungszeitraum auszugehen.

2.2.2 Sicherheitsfunktionen, Leistungsziele und Designanforderungen

Gemäß der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV 2020) muss das Sicherheitskonzept eine Darstellung aller vorgesehenen Barrieren des Endlagersystems, insbesondere der „wesentlichen“ Barrieren, ihrer jeweiligen Sicherheitsfunktionen und ihres Zusammenwirkens, enthalten. Dabei gelten als „wesentliche“ Barrieren die Barrieren, auf denen der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle im Wesentlichen beruht. Darüber hinaus werden neben den „wesentlichen“ Barrieren als „weitere“ Barrieren die Barrieren definiert, die zusätzlich zu den „wesentlichen“ Barrieren und im Zusammenwirken mit ihnen eine Ausbreitung von Radionukliden be- oder verhindern.

Die **Sicherheitsfunktion** wird in dem Zusammenhang als eine Eigenschaft einer Komponente des Endlagersystems definiert, die sicherheitsrelevante Anforderungen an ein System oder Teilsystem oder an eine Einzelkomponente zum sicheren Einschluss der Radionuklide erfüllt. Bezuglich des Barrierensystems als Ganzes heißt das, dass das vorgesehene Endlagersystem den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle passiv und wartungsfrei durch ein robustes, gestaffeltes System verschiedener Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen zu gewährleisten hat.

Wie oben erwähnt, werden die Verschluszbauwerke unterteilt in „wesentliche“ Barrieren und „weitere“ Barrieren. Um die Funktionen der einzelnen Barrieren ebenfalls begrifflich zu unterscheiden, werden den „wesentlichen“ Barrieren **Sicherheitsfunktionen** und den „weiteren“ Barrieren **Schutzfunktionen** zugeordnet.

Leistungsziel

Messbare oder berechenbare Größe oder Charakteristik, anhand derer die Erfüllung der zugehörigen Sicherheitsfunktion quantitativ bewertet werden kann.

Damit diese Sicherheits- oder Schutzfunktionen von den einzelnen Komponenten auch übernommen werden können, müssen bei der Konzeption der einzelnen Module jeder Komponente bestimmte **Leistungsziele** zugeordnet werden. Leistungsziele, die von jeder Komponente erreicht werden müssen, damit sie die ihnen zugesetzte Funktion an der ihnen zugedachten Position auch erfüllen können. Ein Leistungsziel wird definiert als eine messbare oder berechenbare Größe oder Charakteristik, anhand derer die Erfüllung der zugehörigen Sicherheitsfunktion quantitativ bewertet werden kann.

Zur Erreichung dieser Leistungsziele wiederum ist es notwendig, dass für die Errichtung der Bauwerke bzw. ihrer einzelnen Module spezielle **Designanforderungen** formuliert werden. Anforderungen, bei deren Einhaltung die gewünschten Leistungsziele des Bauwerkes definitiv erreicht werden. Aus den Designanforderungen werden schließlich *Design-Spezifikationen* abgeleitet, die als Grundlage für die Herstellung und Konstruktion des Bauwerkes bzw. seiner einzelnen Teile dienen. Die Einhaltung der Designanforderungen ist unter Berücksichtigung einer Qualitätssicherung im Zuge der Errichtung des Bauwerkes zu überprüfen.

Designanforderung

Spezifische Anforderung an die Verschluszbauwerke bzw. ihrer einzelnen Komponente, bei deren Einhaltung die gewünschten Leistungsziele des Bauwerkes definitiv erreicht werden.

2.3 Verfüll- und Verschlusselemente und Materialien

Um die Robustheit des geotechnischen Barrierensystems zu optimieren, sollen auch bei der Entwicklung des geotechnischen Verschlussystems (unabhängig vom Behälter) die Prinzipien der Redundanz und Diversität Berücksichtigung finden. In den folgenden Abschnitten werden Verfüll- und Verschlusselemente vorgestellt sowie die Materialien, aus denen diese aufgebaut sind. Diese Elemente werden dann modular zusammengesetzt, wobei sowohl bauliche Module als auch Module unterschiedlicher Bauart kombiniert werden. Die Sicherheitsfunktionen der Module sind vergleichbar, so dass prinzipiell diversitäre Redundanz im Verschlussystem enthalten ist. Für die Verschlusskonzepte der drei Einlagerungsoptionen werden sieben wesentliche Verfüll- und Verschlusselemente oder Module berücksichtigt:

- Dichtelemente aus Bentonit
- Dichtelemente aus Asphalt und Bitumen
- Dichtelemente aus Beton
- Widerlager aus Beton
- Aufsättigungselemente
- Streckenversatz
- Filter- bzw. Übergangsschichten

Das Verschlussystem besteht damit aus unterschiedlichen Dichtmaterialien und damit einhergehenden unterschiedlichen Wirkungsweisen womit zunächst aus Materialsicht die Prämissen der Diversität erfüllt ist. Die wesentlichen Eigenschaften und Vorzüge der verschiedenen Verschlusselemente werden nachfolgend beschrieben.

2.3.1 Dichtelemente aus Bentonit

Bentonit basierte Dichtelemente finden in allen Verschlusskonzepten in allen Wirtsgesteinen Anwendung. Unter dem Begriff Bentonit wird im Allgemeinen ein quellfähiges Gemisch verschiedener Tonminerale mit einem Montmorillonitgehalt von > 50 % bezeichnet. Entsprechend der Herkunft und mineralogischen Zusammensetzung können verschiedene Typen mit verschiedenen Eigenschaften unterschieden werden. Tonminerale weisen eine hohe Sorptionsfähigkeit gegenüber einer Vielzahl von Radionukliden auf. Bentonit weist bei einer entsprechenden Vorverdichtung nach Aufsättigung mit Lösung eine sehr geringe Permeabilität auf. Durch den Anteil quellfähiger Minerale reagiert das Material bei Lösungs-/Wasserzutritt mit einer Volumenvergrößerung durch Quellung oder einem Druckaufbau sofern das Bentonitmaterial eingespannt ist und sich somit nicht ausdehnen kann. Der Quellprozess reduziert die Permeabilität weiter.

Durch die Vielzahl günstiger Eigenschaften werden Dichtsysteme aus Bentonit für den Verschluss von Tageszugängen konventioneller Bergwerke, untertägiger Deponien und auch Endlager für radioaktive Abfälle genutzt. Die Herstellbarkeit und Funktionsfähigkeit von Querschnittsabdichtungen aus Bentonit in Schächten wurde bereits großtechnisch erprobt und kann als Stand der Technik beschrieben werden. Als **Referenzmaterial** für Dichtelemente der einzelnen Verschlüsse ist ein **Ca-Bentonit** vom Typ Salzdetfurth vorgesehen. Die Funktionalität dieses Materials wurde bei in-situ Versuchen im Zuge des Forschungsprojektes Schachtverschluss Salzdetfurth nachgewiesen (Breidung 2002, Jobmann 2002). Für das Schachtverschlusskonzept wurde der Bentonit als binäres Gemisch (Granulat/Presslinge) mit einem Wassergehalt < 10 % und einer Einbautrockendichte von $1.700 - 1.750 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ eingebracht. Bei den in situ Versuchen wurde eine Permeabilität von $1,0 \cdot 10^{-17}$ bis $7,8 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ erzielt. Der Quelldruck betrug ca. 1 MPa. In ähnlicher Weise erfolgte mit dem belgischen RESEAL-Projekt auch der Eignungsnachweis einer Bentonitdichtung im Tongestein (van Geet et al. 2009).

In dem Untertagelabor Josef in Tschechien wurde im Rahmen des europäischen Verbundprojektes DOPAS ein großtechnischer in-situ Versuch mit der Bezeichnung EPSP zur Querschnittsabdichtung einer Strecke im Maßstab 1:1 gestartet (White et al. 2016a). Bei diesem Versuch wurde ein Dichtelement bestehend aus kleinen hoch kompaktierten Bentonit-Pellets errichtet, das beidseitig von einem Betonwiderlager eingespannt ist. Als Beton wird 'Niedrig-pH-Beton' verwendet. Ebenfalls im Rahmen des DOPAS Projektes erprobte die ANDRA die Errichtung eines Bentonit-Dichtelementes im Maßstab 1:1 in einem eigens dafür errichteten Versuchsstand (White et al. 2016b).

Thermische Parameter und Ausdehnungseffekte von Bentonit wurden u. a. in Yildizdag et al. (2008), Jobmann et al. (2013) und Jobmann et al. (2007) untersucht. Die Wärmeleitfähigkeit beispielsweise schwankt in Abhängigkeit von Sandanteil und Feuchtegehalt zwischen 0,8 und $1,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Abhängigkeiten der Permeabilität vom Quelldruck und damit indirekt vom Sättigungsgrad wurden u. a. von Jobmann (1998 und 2002) im Rahmen des Forschungsprojektes „Schachtverschluss Salzdetfurth“ untersucht. Aussagen zum anfänglichen Sättigungsgrad von Bentonit-Dichtelementen wurden von Engelhardt & Müller-Hoeppel (2011) im Rahmen der Entwicklung eines Schachtverschlusskonzeptes für die Schächte in Gorleben getroffen. Weitere Materialspezifikationen sind in Engelhardt et al. (2011) sowie in Sitz et al. (1997) nachzulesen. Aussagen zu mikrobiellen Aktivitäten bei Tongesteinen und Bentoniten können in Meleshyn (2011) nachgelesen werden.

2.3.2 Dichtelemente aus Asphalt und Bitumen

Asphalt/Bitumen als Abdichtmaterial wird seit längerer Zeit für den Einsatz in deutschen Endlagerprojekten diskutiert, vor allem in Verschlusskonzepten im Ton- und Salzgestein (Herold et al. 2020). Bei Bitumen handelt es sich um ein Gemisch aus verschiedensten Kohlenwasserstoffen. Eine grundsätzliche Unterscheidung der Kohlenwasserstoffe in hochmolekulare Asphaltene und niedermolekulare Maltene charakterisiert die kolloiddisperse Struktur des Materials. Daraus begründen sich die rheologischen Eigenschaften. Bei Zimmertemperatur ist Bitumen im Allgemeinen fest. Mit zunehmender Temperatur sinkt die Viskosität, und die Flüssigkeitseigenschaften des Materials treten in den Vordergrund. Bitumen kann bei kleinen Belastungsraten und großen Belastungsdauern als Flüssigkeit angesehen werden. Bitumen ist wasserunlöslich und gleichzeitig von Wasser undurchdringlich sowie gegen Salze, aggressive Wässer, Säuren und Laugen weitgehend beständig. Gelöst werden kann Bitumen nur von organischen Lösungsmitteln, wie Benzol oder Toluol. Reines Bitumen besitzt bei Zimmertemperatur eine niedrige Dichte von 1.000 bis $1.060 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (Burkhardt & Egloffstein 1995). Die Eigenschaften des Bitumens führen zu einer hohen Benetzungsfähigkeit und damit Haftfestigkeit an anderen Materialien, sofern die anderen Materialien trocken und staubfrei sind, und zu einer sehr guten Abdichtwirkung von Klüften und Rissen.

Durch die niedrige spezifische Wärmekapazität ($1,7\text{-}1,9 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ bei $0\text{-}200^\circ\text{C}$) und die sehr geringe Wärmeleitfähigkeit ($0,16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) besitzt Bitumen eine gute thermische Isolationswirkung (Benedix 2008). Durch die Beimengung von Gesteinskörnungen lässt sich die Dichte und Viskosität verändern, in der Regel erhöhen. Gemische aus Bitumen und Gesteinskörnungen werden als Asphalt bezeichnet. Die Auswahl geeigneter Bitumenarten und Gesteinskörnungen macht die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften sehr gut beeinflussbar.

Bei der Verwahrung konventioneller Bergwerksschächte fand in der Vergangenheit zumeist handelsüblicher Gussasphalt Verwendung. Handelsübliche Gussasphaltnachschubmischungen bestehen aus 35 bis 55 % Gesteinskörnungen, 20 bis 30 % Füller und ca. 7 bis 8 % Bitumen. Die

Gesteinskörnung bildet kein stützendes Korngerüst. Bei der Verwahrung konventioneller Bergbauschächte dient Gussasphalt als geringmächtige, sofortwirksame Dichtung und wird in Ergänzung zu Tondichtungen eingebaut. Der Einbau erfolgt heiß. Trotz des geringen Bitumenanteils dichtet Gussasphalt den Querschnitt ab. Entscheidend für eine dauerhafte Dichtwirkung ist dabei die Anbindung des Gussasphaltes an den Gebirgsstoß. Nur mit Hilfe eines qualitätsgesicherten Einbaus kann die gewünschte Abdichtwirkung am Dichtungsstandort erreicht werden.

Bitumen kann in Abhängigkeit der Herstellungsart, des Anwendungsgebietes oder der Eigenschaften in verschiedene Arten unterteilt werden. Nach den Herstellungsverfahren lassen sich Bitumen in Destillations-, Oxidations-, Hochvakuum- und Polymermodifizierte Bitumen unterscheiden. Für die Anwendung als Dichtelement sind vor allem Destillations- und Oxidationsbitumen interessant. Destillationsbitumen sind die nicht weiter behandelten Rückstände der Erdöldestillation. Durch eine zusätzliche Behandlung mit Luft (Oxidationsbitumen) können die Eigenschaften hin zu einer geringeren Temperaturempfindlichkeit und höheren Viskosität beeinflusst werden. Oxidationsbitumen sind im Allgemeinen härter als Destillationsbitumen (Burkhardt & Egloffstein 1995).

Chemische Wechselwirkungen zwischen Bitumen und den Abfällen können zu einer Alteration des Bitumens führen. Bitumen ist vergleichsweise langzeitbeständig gegen radioaktive Strahlung (Burkhardt & Egloffstein 1995) und kann auch als Matrix für schwach- und mittelaktive Abfälle genutzt werden (Eschrich 1980). Bitumen weist nur eine geringe mikrobiologische Zersetzung auf (Wolf 1989). Wechselwirkungen mit Gesteinen wurden von Radenberg (2014) insbesondere im Hinblick auf das Adhäsionsverhalten bei unterschiedlichen Korngrößen untersucht. Generelle Informationen über die Beziehung zwischen der chemischen Zusammensetzung und den physikalischen Eigenschaften kann Radenberg (2017) entnommen werden.

Welchen Einfluss die Alterungsprozesse auf die Funktionsfähigkeit und -dauer haben, ist noch nicht abschließend geklärt. Da Bitumen und Asphalt auch in der Natur vorkommen, finden sich neben natürlichen Analoga auch in der frühen Kulturgeschichte des Menschen verschiedene Anwendungsbeispiele von Bitumen und Asphalt als Dichtmaterial oder Kleber (Zirkler 2001). Im Rahmen einer Nutzung in Verschlusskonzepten für Endlager für hoch radioaktive Abfälle taucht die Frage der Langzeitbeständigkeit auf, da, je nach Einsatzzweck, bestimmte Funktionsdauern von Dichtelementen gefordert werden.

Das Vorhandensein natürlicher und technischer Analoga beweist die Langzeitbeständigkeit von Bitumen und Asphalt. So sind beispielsweise aus natürlichen Asphaltseen Nordamerikas vielfältige Fossilienfunde mit einem Alter von bis zu 40.000 Jahren bekannt (Selden & Nudds 2006). Demgegenüber steht, dass Bitumen wie jede andere organische Struktur altern. Mit der Alterung von Bitumen ist stets eine Eigenschaftsänderung verbunden. Gerade bei der Nutzung von eigens ausgewählten Bitumensorten unter der Ausnutzung bestimmter Eigenschaften mit exakt definierten Kennwerten, wie es bei der Anwendung im Schachtverschluss der Fall ist, sind Kenntnisse über das Langzeitverhalten und die damit verbundenen Eigenschaftsänderungen relevant. Die Langzeitstabilität des Bitumens beschränkt sich nicht nur auf das bloße Vorhandensein des organischen Stoffgemisches Bitumen, sondern muss über die Beständigkeit der geforderten Eigenschaften (z. B. Viskosität, Dichte) definiert werden.

Für die Langzeitbeständigkeit von Bitumen sind besonders chemische und physikalische Alterungsprozesse sowie der mikrobielle Abbau relevant. Die damit verbundenen Alterungsprozesse sind irreversibel, aber bisher nicht quantifizierbar. Die Alterung von Bitumen lässt sich

in eine Verdunstungsalterung, eine oxidative Alterung und eine Strukturalterung unterteilen (Neumann et al. 1992). Alle drei Prozesse treten stets gemeinsam auf. Eine strikte Trennung der drei Alterungsprozesse ist nur schwer möglich.

Die Verdunstungsalterung ist durch die Abgabe leichtsiedender Bestandteile aus dem Bitumen, besonders bei hohen Temperaturen unterhalb des Siedepunktes gekennzeichnet. Bei der oxidativen Alterung reagiert Bitumen mit dem Luftsauerstoff oder auch Ozon. Das Ausmaß der stattfindenden Oxidation ist stark von der Temperatur, der UV-Strahlung und der Sauerstoffzufuhr abhängig (Burkhardt & Egloffstein 1995). Beide Prozesse werden beispielsweise auch bei der Herstellung von Oxidationsbitumen genutzt. Oxidative und destillative Alterungsprozesse führen immer auch zu einer Strukturänderung. Die chemisch/physikalischen Prozesse verändern die Bestandteile des Bitumens und damit auch die Zusammensetzung. Destillative und oxidative Alterung sind in der Literatur hinreichend beschrieben. Zusätzlich wird in der Literatur auch eine Strukturalterung im Zusammenhang mit der Kolloid-dispersen Struktur und dem nichtvorhandenen thermodynamischen Gleichgewicht beschrieben. Diese Prozesse werden von oxidativen und destillativen Alterungsprozessen innerhalb konventioneller Anwendungen überlagert und finden daher keine Beachtung. Da unter den Bedingungen innerhalb von Strecken- oder Schachtverschlüssen keine dauerhaft hohen Temperaturen, kein Energieeintrag über UV-Strahlung und keine stetige Sauerstoffzufuhr vorhanden sind, treten die destillative und oxidative Alterung in den Hintergrund und brauchen hierbei nicht betrachtet zu werden. In Strecken- oder Schachtverschlüssen ist der Einfluss der Strukturalterung des Bitumens auf die Langzeitbeständigkeit zu bewerten. Dieser bisher wenig beachtete chemische Alterungsvorgang in Folge instabiler thermodynamischer Zustände des kolloid-dispersen Systems kann über die langen Betrachtungszeiträume zu einer Veränderung der physikalischen Eigenschaften führen.

Strukturalterung beschreibt die Veränderung der Kolloidstruktur. Die freie Energie des Kolloidsystems und das thermodynamische Ungleichgewicht nehmen durch eine Vergrößerung der dispergierten Asphaltene ab. Die Maltene verbinden sich zu größeren Kohlenwasserstoffen und auch die darin dispergierten Asphaltene gehen Verbindungen untereinander ein. Dieser Alterungsprozess eines Gel-Typs wird auch Synärese genannt. Durch die Vergrößerung der Partikel nehmen die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen zu. Das Material verliert während der Alterung seinen Flüssigkeitscharakter und versprödet zunehmend. Die innere Festigkeit steigt während Elastizität und Plastizität abnehmen. Im Zuge dieses Alterungsprozesses können die Eigenschaften des Bitumens den zuvor definierten Bereich ihrer Funktionsfähigkeit verlassen. So können sich beispielsweise die Hafteigenschaften negativ verändern. Eine Umwandlung des kolloid-dispersen Systems geht auch mit einem Volumenschwund einher. Das Ende des Alterungsprozesses ist durch das Verlassen des kolloid-dispersen Systems gekennzeichnet. Das Bitumen hat dann einen grob-dispersen Aufbau (Neumann et al. 1992, Neumann 1995).

Untersuchungen zum Alterungsverhalten von Bitumen wurden hauptsächlich für die Anwendung im Straßenbau und die Nutzung von recycelten Bitumen durchgeführt. Der zeitliche Verlauf der Alterung ist stark von der Ausgangsstruktur des Bitumens und den Randbedingungen abhängig. Neben den zitierten, qualitativen Aussagen zur Alterung sind keine konkreten Alterungsraten aus der Literatur bekannt.

Neben der chemischen Alterung führt auch die mikrobielle Zersetzung von Bitumen zu einer Alterung im Sinne sich ändernder Eigenschaften. Die Auswirkungen der mikrobiellen Zersetzung auf bitumenhaltige Dichtmaterialien in einem Endlager wurde unter Laborbedingungen

ausführlich untersucht (Wolf 1989). Demnach sind bitumenzersetzende Organismen (z. B.: Bakterien und Pilze) allgegenwärtig. Die Zersetzung kann sowohl unter aeroben als auch unter anaeroben Bedingungen ablaufen. Sauerstoff ist im Endlager nur begrenzt verfügbar. Neben der mikrobiellen Aktivität wirken auch andere Prozesse, wie die Metallkorrosion, als Sauerstoffverbraucher. Nach einer kurzen Phase aerober Bedingungen ist über weite Teile des Funktions- und Bewertungszeitraumes mit anaeroben Bedingungen im Endlager zu rechnen.

Versuchstechnisch wurde die Zersetzung des Bitumens in einem Bioreaktor unter optimalen Bedingungen angeregt. Bei den anaeroben Versuchen herrschten eine Temperatur von 35 °C, ein pH-Wert von 7,2 und eine konstante Rührdrehzahl von 160 U·min⁻¹. Die Gasphase bestand aus Helium. Nach Wolf (1989) führten diese Bedingungen zu Degradationsraten von 0,2 bis 0,6 g je m² Bitumenoberfläche. Die Degradationsraten im aeroben Milieu lagen etwa 100-mal höher bei 20 bis 50 g·m⁻². Während der Versuche im aeroben Milieu herrschten im Bioreaktor 30 °C bei einem pH-Wert von 7 und einer konstanten Luftzufuhr von 0,5 l·min⁻¹. Der Abbau ist auf den direkten Kontakt, also die Bitumenoberfläche beschränkt. Es ist nicht abschließend beantwortet, ob der Mikrobielle Abbau alle Bestandteile gleichmäßig erfasst oder etwa bestimmte Kohlenwasserstoffverbindungen von den Mikroben bevorzugt "gefressen" werden. Es wurden keine Aussagen zu den verbleibenden Stoffwechselprodukten gemacht.

Gegenwärtig ist nicht abschließend geklärt, wie die Erkenntnisse aus den Laborversuchen auf die tatsächlichen Bedingungen in Strecken und Schächten übertragen werden können. Die Projektion der Erkenntnisse auf reale Verschlussbauwerke würde eine Zersetzung von außen her, also von der Kontaktzone aus, in den Bitumenkörper bedeuten. Unter Berücksichtigung der gleichzeitig stattfindenden Strukturalterung des Bitumens wäre so besonders die Kontur der Bitumen/Asphaltdichtung von einer Eigenschaftsveränderung durch Alterung und Abbau bedroht. Gemäß dem beschriebenen Verschlusskonzept sollten die Bitumenschottersäulen die Zuflüsse zu den Bentonidichtungen solange Verzögern, bis diese vollständig gesättigt sind. Die Funktionsfähigkeit und damit auch die Nachweisführung wären auf diesen Zeitraum begrenzt.

2.3.3 Dichtelemente aus Beton

Dichtelemente aus Beton werden derzeit nur optional in deutschen Verschlusskonzepten vorgesehen. Unter dem Begriff Beton wird ein zementbasierter Beton mit mineralischen, (praktisch) nicht löslichen Gesteinskörnungen verstanden. Die wesentlichen Komponenten sind Zement, Gesteinskörnung, Zusatzstoffe und Wasser.

Als Dichtmaterial im Rahmen eines Verschlusskonzeptes für ein Endlager wurde diese Art von Beton in Deutschland bisher nicht berücksichtigt, da durch die Betonalteration nur ein begrenzter Funktionszeitraum zur Verfügung steht. International gibt es für Endlager im Tongestein und Kristallingestein verschiedene Untersuchungsprogramme und Anwendungsbeispiele zur Funktionsfähigkeit von zementbasierten Verschlusselementen. Beispielhaft dafür stehen das DOPAS-Vorhaben (Hansen 2016) mit den Experimenten DOMPLU und POPLU sowie die Experimente TSX (Guo et al. 2005) und ESP in Kanada (Martino et al. 2011).

Aus den Entwicklungen in der Baustoffindustrie und den Untersuchungen in verschiedenen internationalen Endlagerprojekten ist bekannt, dass auch der Baustoff Beton mit einer sehr geringen Durchlässigkeit hergestellt werden kann. Aus einer Vielzahl möglicher Zusätze soll an dieser Stelle nur die Zugabe von Silikastaub hervorgehoben werden. Dieser puzzolanische Zusatzstoff reagiert während der Hydratation und erhärtet ebenfalls. Durch die sehr geringe Korngröße (Füllerbereich) wirken sich die Stäube positiv auf die Kornzusammensetzung aus

und verringern die Porengröße und damit auch die Permeabilität. Mit der Nutzung der Sili-kastäube wird auch der pH-Wert reduziert. Aufgrund der Reduktion des pH-Wertes kann dieser Beton als "Niedrig-pH-Beton" bezeichnet werden.

Die Reduktion des pH-Wertes verringert den Austausch von OH- und Cl- Anionen während der Korrosion des Betons durch Porenwässer. Gleichzeitig wird der Kationenaustausch zwischen den Porenwässern und Bentonit reduziert. Damit kann einer möglichen Verringerung des Quellvermögens in Folge der chemischen Austauschprozesse entgegengewirkt werden. "Niedrig-pH-Beton" ist damit auch ein interessantes Material für den Einsatz als Widerlager, da es die Dichtwirkung des vom Widerlager eingespannten Materials unterstützt.

2.3.4 Dichtelemente aus Sorelbeton

Dichtelemente aus Sorelbeton finden derzeit ausschließlich in Verschlusskonzepten im Salzgestein Anwendung. Sorelbeton (Sorelzement) ist ein in den 50er und 60er Jahren des 19. Jahrhunderts vom Franzosen Stanislas Sorel entwickelter Säure-Base-Zement. Als Säure fungiert eine wässrige Magnesiumchlorid-Lösung, als Base kaustisch gebrannter Magnesit (Magnesiumoxid, MgO). Je nach Reaktivität des verwendeten Magnesiumoxids kommt es innerhalb von Minuten oder aber auch erst nach Stunden zu einem Erhärten des Gemisches. Die entstehende Verbindung ist ein Magnesiumoxychlorid.

Da Sorelbeton mit Magnesiumchlorid-Lösung als Anmischflüssigkeit hergestellt wird, ist dieser lösungsstabil gegenüber Steinsalz sowie den meisten Kalisalzen und wird daher im Kontakt mit Steinsalz und leichtlöslichen Kalisalzen eingesetzt. Als Beispiel sei hier die Konzeption des Schachtverschlusses im Steinsalz im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) genannt (Müller-Hoeppel et al. 2012).

2.3.5 Dichtelemente oder Widerlager aus Salzbeton

Bauelemente aus Salzbeton finden sowohl als Dichtelemente als auch als Widerlager In Verschlusskonzepten im Salzgestein Verwendung. In gesättigten Natriumchlorid-Lösungen ist Salzbeton langzeitstabil. In halbgesättigten Lösungen können sich die Salzanteile herauslösen, was zu einer Veränderung der Bauwerkseigenschaften führt. Muss davon ausgegangen werden, dass langfristig auch ungesättigte Natriumchlorid-Lösungen zu erwarten sind, können Elemente aus Salzbeton nur temporär für eine bestimmte Funktionsdauer konzeptionell eingesetzt werden.

2.3.6 Widerlager aus Beton

Dichtelemente aus quellfähigem Bentonit werden in bisher bekannten Verschlusskonzepten unabhängig vom Wirtsgestein durch Widerlager aus Beton in ihrer Position fixiert, so dass ein sich im Zuge der Aufsättigung des Bentonit einstellender Quelldruck einen Gebirgsverbund herstellt und nicht in eine Volumenausdehnung in den Hohlraum erfolgt. Informationen zur Dauerhaftigkeit von Beton und zum thermo-mechanischen Verhalten von Beton sind u. a. in Thienel (2011) und Huismann (2010) beschrieben. Hinweise zur Oberflächenrauigkeit sind in (Kadhim El-Tornachi 2003) nachzulesen.

Kohäsive Widerlager sind durch den Gebirgsverbund in der Lage, mechanische Belastungen aufzunehmen und Verformungen begrenzen. Besonders die Dichtelemente aus Bentonit dürfen nur geringe Lageverschiebungen bzw. Volumenvergrößerungen erfahren (Wagner 2005). Nur so kann sichergestellt werden, dass sich der Quelldruck und die Permeabilität innerhalb der Bentonidichtungen wie vorgesehen entwickeln.

Betonwiderlager werden entsprechend dem Stand der Technik unbewehrt ausgeführt. Mit dem Verzicht auf eine Stahlarmierung entsteht auch kein Gas durch Metallkorrosion und die chemische Betonkorrosion wird verlangsamt. Alternative Armierungen wie Polymere oder Geotextilien werden nicht berücksichtigt. Der Einsatz von Glasfaserarmierungen bietet ein gewisses Optimierungspotenzial, erfordert gegenwärtig aber auch zusätzlichen Forschungsbedarf. Unbewehrte Betonwiderlager können in verschiedenen Geometrien errichtet werden. Dies ist bereits aus dem Verschluss konventioneller Schächte und Streckenverschlüsse bekannt und mit hinreichenden Ausführungsbeispielen belegt (z. B. Thyssen Schachtbau 2015, Aland et al. 1999). Die Art und Ausführung richtet sich nach den jeweiligen Anforderungen. Die Widerlagergeometrie soll möglichst einfach gehalten werden. Das Auftreten von Zugspannungen im Betonkörper kann mit der Auswahl einer geeigneten Widerlagergeometrie vermieden werden.

Eine Beschränkung von Schwund- und Hydratationsrissen im unbewehrten Betonkörper kann über eine entsprechende Materialauswahl oder zusätzliche Maßnahmen während der Errichtung (z. B.: Isolierung) gewährleistet werden. Die Auswahl des Zementes sowie der Gesteinskörnungen richtet sich nach der geforderten Festigkeit und sonstigen (z. B. chemischen) Anforderungen und Randbedingungen. Da Widerlager sowohl zur Stabilisierung der Bentonitelemente als auch des quellfähigen Versatzes vorgesehen sind, liegen diese auch direkt nebeneinander. Wechselwirkungen zwischen Zementstein und Tonmineralen sind in erster Linie im Beisein von Wasser durch pH-Werte > 11 zu erwarten. Eine Voraussetzung für die Bildung derartiger Wässer ist der Zutritt von Porenwässern und die einsetzende Zementkorrosion im vorliegenden geochemischen Milieu. Eine technische Möglichkeit, diese Wechselwirkungen zu minimieren, ist der Einsatz von rissarmen Betonen auf der Basis von Zementphasen, die alkalifrei sind und kein Portlandit enthalten ("Niedrig-pH-Beton").

"Niedrig-pH-Beton" hat eine höhere Dichte und aufgrund puzzolanischer Zusätze eine geringere Permeabilität als konventioneller Beton, die mit einer geringeren Rissanfälligkeit im Betonkörper einhergeht. Dies führt zur Reduzierung der Menge des durchströmenden Fluides und der Korrosion im Beton. Die technische Machbarkeit und die Funktionalität von Betonwiderlagern wurden durch Großversuche im Zuge des europäischen ESDRED-Projektes erprobt und nachgewiesen (ANDRA 2005, Alonso et al. 2008). In anderen internationalen Endlagerprojekten sind pH-Wert-reduzierte Betone als Baustoff für Widerlager vorgesehen. Die zu erwartenden Wechselwirkungen zwischen zementhaltigen Baustoffen, Dichtelementen aus Bentonit, Gebirge und Versatz sind noch nicht abschließend quantitativ geklärt.

2.3.7 Aufsättigungselemente

Aufsättigungselemente stellen Komponenten eines Verschlussbauwerkes dar, die in der Lage sind, größere Mengen an Flüssigkeiten aufzunehmen und großflächig an benachbarte Elemente eines Verschlussbauwerkes weiterzugeben. Diese Aufsättigungselemente bestehen aus aufbereitetem Haufwerksmaterial (ähnlich wie Schotter) und haben eine große Porosität und keinerlei kapillare Saugkraft. Der Einsatz langzeitstabiler und hochfester Hartgesteinsschotter erlaubt die Errichtung setzungsarmer Elemente, die sowohl lateral einer quellenden Bentonidichtung als auch radial der Gebirgskonvergenz standhalten müssen. Anwendung finden solche Elemente derzeit nur in Verschlusskonzepten im Kristallingestein.

2.3.8 Pufferschichten (Bischofit)

Dichtelemente, die innerhalb von Steinsalzformationen eingesetzt werden sollen, müssen gegenüber anstehenden Salzlösungen ausreichend widerstandsfähig sein, d. h., Umlösepro-

zesse und damit Korrosionsprozesse im Innern der Dichtelemente müssen weitestgehend vermieden werden. Grundsätzlich sind zwei Lösungsarten zu unterscheiden: Natriumchlorid (NaCl) oder Magnesiumchlorid (MgCl_2) dominierte Lösungen. Ist zu erwarten, dass beide Lösungsarten in einem Abdichtbauwerk zu berücksichtigen sind, so kann der Einbau von Pufferschichten hilfreich sein. Bei einer Durchörterung von Salzformationen muss damit gerechnet werden, dass salinare Wässer aus der Umgebung der Salzformation an den Dichtelementen in den Durchörterungen anstehen werden. Diese Wässer sind in der Regel NaCl dominiert. Innerhalb von Salzformationen, z. B. im Bereich von Anhydrit-Lagen oder Carnallitit ist mit dem Anstehen von MgCl_2 reichen Lösungen zu rechnen. Gebirgsbereiche mit einem Zulauf von MgCl_2 reichen Lösungen können sehr gut mit Sorelbeton abgedichtet werden. Dieser sollte aber vor eindringenden NaCl -Wässer geschützt werden. Um dies zu erreichen, bietet sich der Einbau von Pufferschichten, beispielsweise aus Bischofit, an. Bischofit ist ein Mineral aus der Mineralklasse der „Halogenide“. Es kristallisiert im monoklinen Kristallsystem mit der Zusammensetzung $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, ist also chemisch gesehen ein wasserhaltiges Magnesiumchlorid (Anthony et al. 1997). Es ist ein weiches hygroskopisches Mineral. NaCl reiche Lösungen werden beim Durchgang durch Bischofit durch Umlöseprozesse mit MgCl_2 angereichert und damit kompatibel zu Sorelbeton gemacht womit Korrosionsprozesse innerhalb des Sorelbeton minimiert werden. Im Zuge der Barrierenauslegung ist eine ausreichende Mächtigkeit der Pufferschicht anhand einer Einwirkungsanalyse festzulegen.

2.3.9 Streckenversatz

Zum Verfüllen der Zugangsstrecken im Kristallingestein ist vorgesehen, eine Mischung aus arteigenem/autochthonem aufbereitetem Ausbruchmaterial und Bentonit zu verwenden. Durch die Quellfähigkeit des Bentonits kann dieses Materialgemisch eine Dichtwirkung entwickeln. Das Ausbruchsmaterial steht in ausreichender Menge zur Verfügung und bedarf lediglich einer Aufbereitung durch einen Brecher, um eine geeignete Korngrößenverteilung zu erreichen. Der Bentonit hat neben seiner Quelldruckentwicklung und damit Abdichteigenschaften auch noch Rückhalteigenschaften gegenüber vielen Radionukliden. Versuche mit entsprechenden Gemischen aus aufbereitetem Ausbruchmaterial und Bentonit wurden in der Vergangenheit bereits in verschiedenen Laboren durchgeführt um hydraulische Durchlässigkeiten, Quelldrücke, Gaseindringdrücke und Zwei-Phasen-Fluss Parameter für Gas und Wasser zu bestimmen (Engelhardt 2003, Engelhardt et al. 2003, Johannesson et al. 1999, Johannesson & Nilson 2006, Johannesson 2008, Mata & Ledesma 2003, Mingarro et al. 1991).

Für das Konzept des überlagernden ewG käme im Falle einer Salzformation aufbereiteter Salzgrusversatz zum Einsatz. Im Falle einer Überlagerung durch Tongesteine würde auch hier eine Mischung aus arteigenem/autochthonem aufbereitetem Ausbruchmaterial und Bentonit zum Einsatz kommen.

2.3.10 Filter- bzw. Übergangsschichten

Filterschichten zwischen den einzelnen Verschlusselementen dienen dem Erosions- und Sulfationsschutz sowie der Vergleichmäßigung des hydraulischen Druckaufbaus, speziell im Bereich von lokalen Fluidzutritten. Sie bestehen aus entsprechend abgestuften mineralischen Gemischen. Mächtigkeit und Abstufung der Filterschichten richten sich nach den Korngrößenverteilungen der beiden umliegenden Verschlusselemente.

3 Einlagerungs- und Verschlusskonzept für die Option multipler ewG

Bei der Option des „multiplen ewG“ wird nicht nur, wie in allen bisherigen Endlagerkonzepten üblich, das Endlager in verschiedene Einlagerungsfelder unterteilt, sondern jedes dieser Einlagerungsbereiche bekommt auch im Rahmen des Sicherheitsnachweises seinen eigenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) zugewiesen. Das bedeutet, dass der Sicherheitsnachweis nicht mehr für das Endlager als Ganzes geführt werden muss, sondern dass er entweder für jeden einzelnen ewG gesondert geführt werden muss, oder, falls abdeckende Annahmen für alle ewG getroffen werden können, für einen „repräsentativen“ ewG. Letzteres bedeutet, dass der erbrachte Nachweis für diesen repräsentativen ewG auch für alle anderen ewG als geführt angenommen werden kann. Im Rahmen des Projektes wurden seitens der BGR für die Einlagerungsoption „multipler ewG“ beispielhaft 24 einzelne ewG ausgewiesen (Abb. 3.1). Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Aufteilung rein generisch zu Illustrationszwecken erfolgte. Eine Aufteilung in eine andere Anzahl von ewG ist, je nach geologischer Situation, zu erarbeiten (vgl. Abb. 3.6). Das großräumige Modell wurde mittels statistischer Kluftgenerierung erzeugt (Mrugalla et al. 2021).

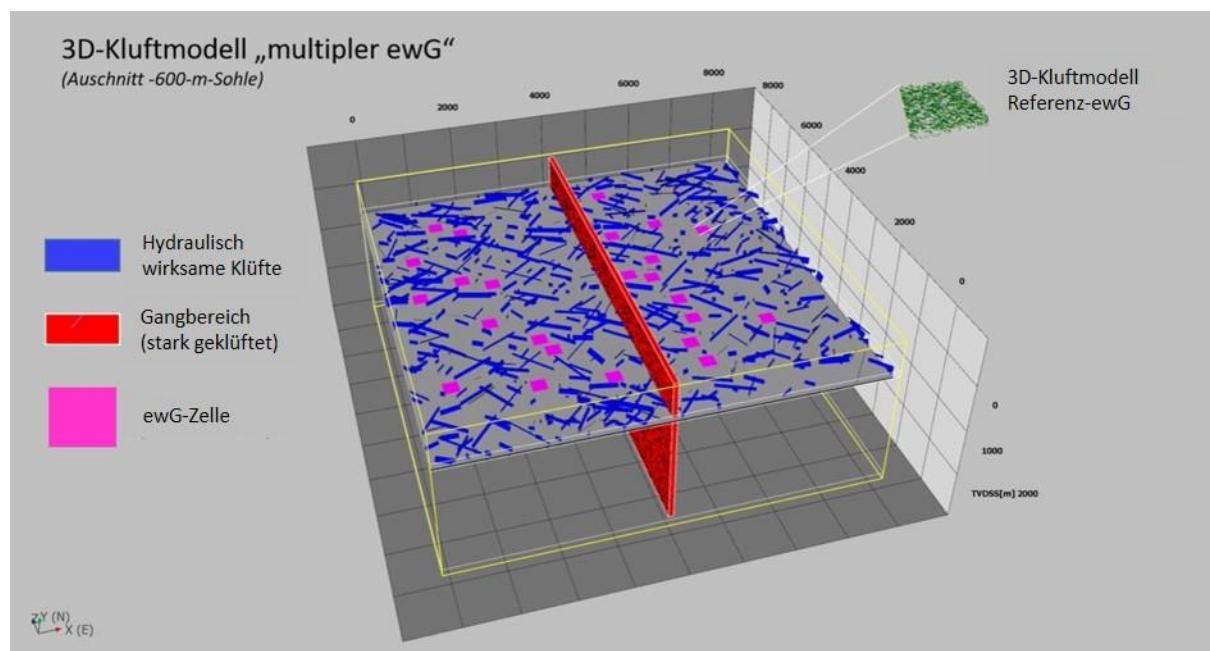


Abb. 3.1: Beispielhafte Aufteilung des Endlagers in 24 ewG-Zellen (Mrugalla et al. 2021)

Bei der Option des „multiplen ewG“ besteht für die Entwicklung des Verfüll- und Verschlusskonzeptes die Herausforderung darin, jeden einzelnen ewG so zu verschließen, dass sowohl die Integritätskriterien für die geotechnischen Barrierenkomponenten erfüllt werden können, als auch die Einhaltung der Geringfügigkeitsgrenze für die radiologische Freisetzung am Rand jedes einzelnen ewG. Im Rahmen bisheriger Sicherheitsnachweise konnte beispielsweise der Versatz im kompletten Streckensystem und im Infrastrukturbereich für den Nachweis herangezogen werden. Ebenso konnten Komponenten des Schachtverschlusses mit in den Nachweis einbezogen werden, sofern diese noch innerhalb der Grenzen des ewG angeordnet wurden. Insbesondere die letztere Möglichkeit entfällt in diesem Fall, da angenommen werden muss, dass Schächte nicht direkt in einzelne ewG geteuft, sondern immer außerhalb liegen werden. Die räumliche Möglichkeit zur Anordnung von Abdichtbauwerken innerhalb eines ewG ist dadurch deutlich limitiert.

Im Rahmen dieses Konzeptes erfolgt die Einlagerung der Behälter in vertikalen Bohrlöchern mit einer Tiefe von etwa 24 m. In jedes dieser Einlagerungsbohrlöcher werden drei Behälter eingelagert. In Abb. 3.2 ist die Einlagerungskonfiguration in Seiten- und Frontansicht dargestellt.

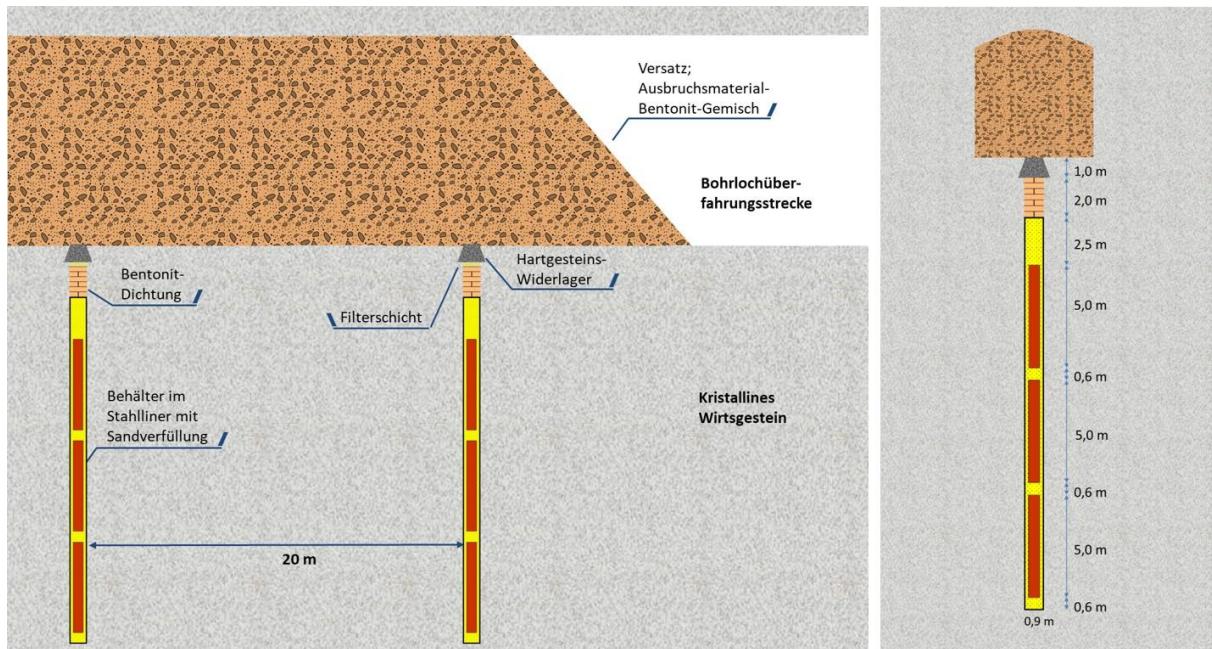


Abb. 3.2: Einlagerungsbohrloch, Bohrlochverschluss und Versatz innerhalb der Bohrlochüberfahrungsstrecken in Seitenansicht (links) und Frontansicht (rechts).

Aus Gründen der gemäß den Sicherheitsanforderungen geforderten Rückhol- und Bergbarkeit werden die Behälter nicht direkt in das Bohrloch eingebracht sondern innerhalb eines Stahlliners. Der verbleibende Hohlraum innerhalb des Liners wird mit rieselfähigem Quarzsand ausgefüllt. Die oberen zwei Meter des Liners oberhalb der Behälter werden komplett mit Quarzsand befüllt. Dies reduziert zusätzlich zur Abschirmplatte im Behälterkopf die Strahlenexposition am Bohrlochmund. Nach Verschluss des Liners wird das Einlagerungsbohrloch mit einem Bentonit-Dichtelement versiegelt, das mit einem Widerlager in seiner Position gehalten wird. In dieser Konfiguration ist es vergleichsweise einfach die Behälter wieder aus dem Liner und damit dem Bohrloch zurückzuholen.

Wie in Kapitel 2.2 bereits erläutert, sollte das Barrierensystem als Ganzes soweit wie möglich diversitär redundant aufgebaut werden. Prinzipiell besteht ein solches Verschlusssystem aus mehreren Komponenten (i) dem Behälter, (ii) dem ewG und (iii) dem geotechnischen Barrierensystem. Abb. 3.3 gibt einen schematisierten Überblick über das Verschlussskonzept im Rahmen der Option des „multiplen ewG“ mit Kennzeichnung der Bauwerke, die innerhalb einer ewG-Zelle liegen. Neben den Verschlussbauwerken innerhalb einer ewG-Zelle sind in Abb. 3.3 auch außerhalb liegende Bauwerke eingezeichnet, beispielhaft auch ein Schachtverschluss. Gemäß der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung ist das Barrierensystem zu unterteilen in „wesentliche“ und „weitere“ Barrieren (vgl. Kap. 2.2.2). Abb. 3.4 zeigt ein Schaubild, in dem für das Konzept des multiplen ewG eine entsprechende Einteilung vorgenommen wurde. Dabei werden alle Barrieren innerhalb einer ewG-Zelle als wesentliche Barrieren (rot beschriftet) und alle Barrieren außerhalb einer ewG-Zelle als weitere Barrieren (blau beschriftet) definiert.

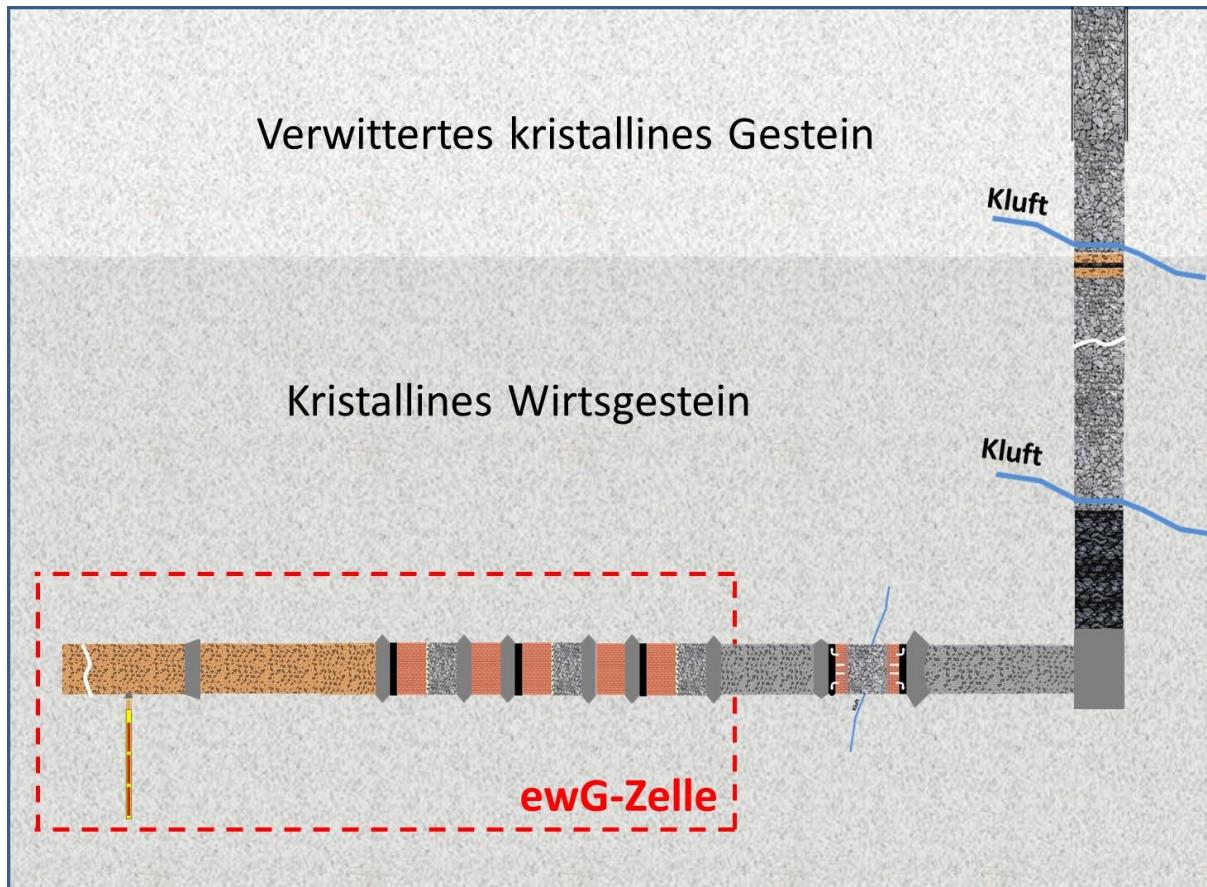


Abb. 3.3: Schematisierter Überblick über das Gesamtverschlusskonzept.

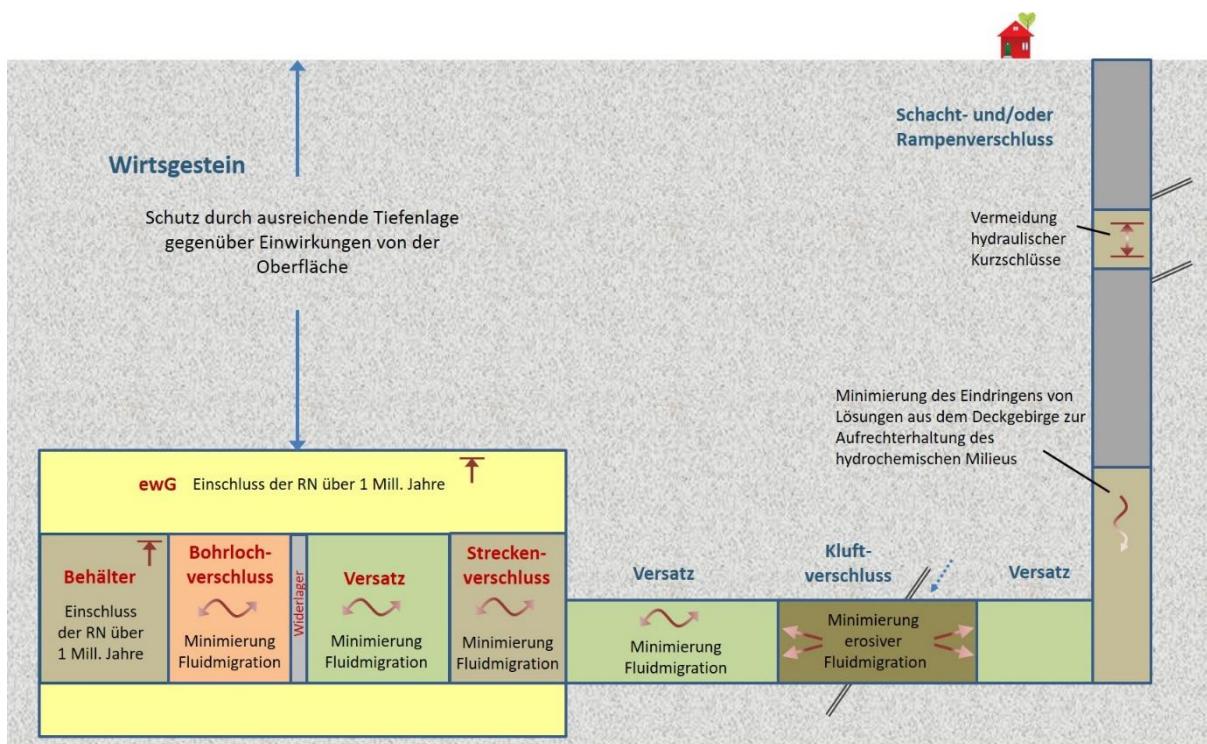


Abb. 3.4: Schematische Einteilung des Barrierensystems in wesentliche (rot) und weitere (blau) Barrieren für das Konzept des multiplen ewG

Im Folgenden wird der Aufbau der einzelnen Barrieren näher erläutert inklusive der jeweiligen Sicherheits- bzw. Schutzfunktion.

3.1 Behälter

Das erste Element dieses diversitär redundanten Barrierensystems stellt der Behälter dar. Bei dem Konzept "multipler ewG" ist vorgesehen, die ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren und die radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in rückholbaren Kokillen in vertikale Bohrlöcher einzulagern. Für dieses Konzept soll eine rückholbare Kokille (BSK-RCu) verwendet werden, die mit einer Kupferschicht von 5 mm ummantelt wird (Abb. 3.5). In der BSK-RCu kann ein Abfallgebindevolumen von ca. 1 m³ untergebracht werden. Die Ummantelung ergibt eine Masse von 400 kg an Kupfer pro Behälter (Bertrams et al. 2017).

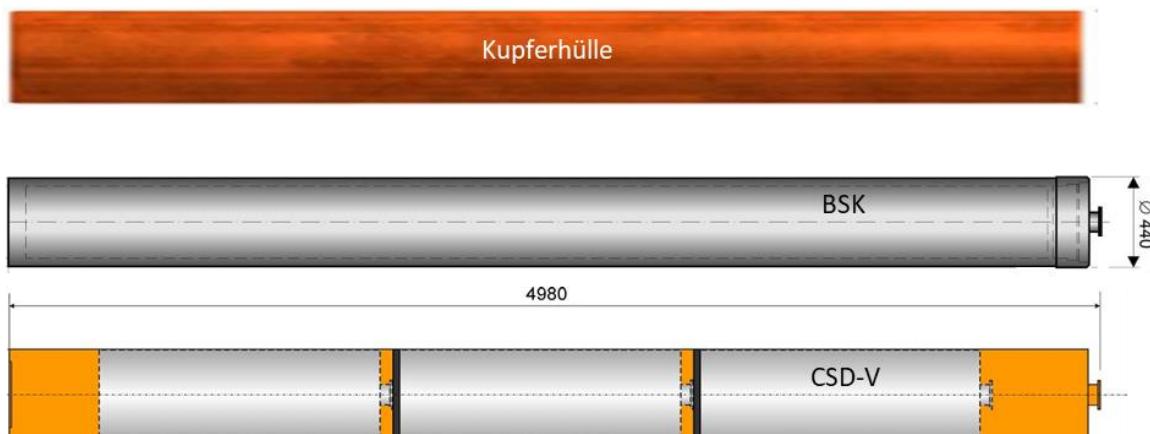


Abb. 3.5: Brennstabkokille für die Einlagerung im Rahmen der Option "multipler ewG"

Gemäß dem Sicherheitskonzept ist dem Behälter eine Sicherheitsfunktion zuzuordnen (vgl. Kapitel 2.2.2). Diese lautet:

Sicherheitsfunktion: *Der Behälter soll den Einschluss der Radionuklide im gesamten Bewertungszeitraum gewährleisten.*

Mit Blick auf die Nachweisführung wird der Behälter in zwei Funktionselemente unterteilt, den inneren Stahlbehälter und die äußere Kupferhülle. Beiden Funktionselementen werden „spezifische Funktionen“ zugeordnet, die sie im Zuge der Nachweisführung erfüllen müssen. Der Stahlbehälter übernimmt die Tragfunktion und den mechanischen Schutz des Inventars. Der äußeren Kupferhülle wird die eigentliche Einschlussfunktion zugeordnet, da Kupfer eine sehr hohe Korrosionsresistenz hat. Im Hinblick auf diese Sicherheitsfunktion des Behälters werden für die Funktionselemente des Behälters folgende Leistungsziele festgelegt, die notwendig sind, um die Sicherheitsfunktion zu erfüllen.

Leistungsziel 1: *Der Stahlbehälter muss so ausgelegt sein, dass er der zu erwartenden mechanischen Beanspruchung während des Bewertungszeitraumes standhalten kann und die Kriterien zur Tragfähigkeit und Verformungsbeständigkeit erfüllt.*
(Bem.: Dieses Leistungsziel deckt auch den Fall ab, dass der Behälter für den Bergungszeitraum von 500 Jahren handhabbar sein muss).

Leistungsziel 2: *Die Kupferhülle muss eine Korrosionsresistenz aufweisen, die gewährleistet, dass keine Freisetzung von Radionukliden im Bewertungszeitraum von 1 Million Jahre auftritt.*
(Bem.: Dieses Leistungsziel deckt auch den Fall ab, dass der Behälter für den Bergungszeitraum von 500 Jahren den Einschluss radioaktiver Aerosole gewährleisten muss).

Designanforderungen:

Damit die aufgeführten Leistungsziele für die einzelnen Funktionselemente erreicht werden können, werden für diese Elemente Designanforderungen erstellt. Für den Stahlbehälter und Liner gilt, dass Stahlsorte und Wandstärken in einer Weise gewählt bzw. bemessen werden, dass er den zu erwartenden mechanischen Belastungen im Bewertungszeitraum ausreichend Widerstand entgegenzusetzen hat.

Für die Kupferhülle erscheint die Verwendung von geschmiedetem Kupfer erfolgsversprechend zu sein. Eine Dicke des Kupfermantels von 5 mm erscheint ausreichend, um eine Korrosionsresistenz für den gesamten Bewertungszeitraum zu gewährleisten. Bezuglich der Abschätzung der Korrosionsrate kann auf schwedische und kanadische Literatur neueren Datums zurückgegriffen werden. Für die dortigen Verhältnisse werden z. B. Korrosionsraten von maximal 5 mm innerhalb von 10^6 Jahren als konservativ eingeschätzt (Kremer 2017, SKB 2010c). Es wäre grundsätzlich auch möglich, Kupferschichten mittels des Coating Verfahrens direkt auf den Stahlinnenbehälter aufzutragen, anstatt einen geschmiedeten Kupferbehälter zu verwenden. Bei diesem Verfahren wird Kupfer mittels Galvanisierung oder Kältespray-Verfahren direkt auf die Oberfläche des Behälters aufgebracht. Nach jetziger Kenntnis wurden dabei Schichtdicken von 3 mm erreicht. Diese Schichtdicke wird in Kanada als ausreichend abgeschätzt, um die Korrosion der Behälter unter den dort vorherrschenden Bedingungen und dem dort vorliegenden hydrochemischen Milieu im Endlager soweit zu behindern, dass die Einschlusswirksamkeit für 10^6 Jahre nachweisbar ist (Keech 2014). Bei der vorgesehenen Kupferdicke (5 mm) kann das Coating Verfahren ebenfalls als vielversprechend gelten. Das Coating Verfahren ist allerdings eine noch sehr junge Technologie und kann zur jetzigen Zeit nicht abschließend bewertet werden.

3.2 Der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG)

Das zweite Element (neben dem Behälter) des diversitär redundanten Barrierensystems stellen die ewG-Zellen dar. Abb. 3.6 zeigt eine Draufsicht auf zwei beispielhafte generische ewG-Zellen mit sehr unterschiedlicher Größe inklusive der Lage der Verschlussbauwerke. Die tatsächliche Größe bzw. Ausdehnung der einzelnen ewG kann nicht im Vorfeld definiert werden. Die Ausdehnung und Form richtet sich nach der vorgefundenen Geologie bzw. den vorgefundenen hydraulisch wirksamen Klüften.

Die Wahl von Lage und Größe der einzelnen ewG-Zellen (grüner Bereich in Abb. 3.6) geschieht dergestalt, dass Gesteinsbereiche ausgewählt werden, die nicht mit hydraulisch wirksamen Klüften durchzogen sind (Mrugalla et al. 2021). Solche hydraulisch wirksamen Klüfte definieren die Ränder einzelner ewG-Zellen.

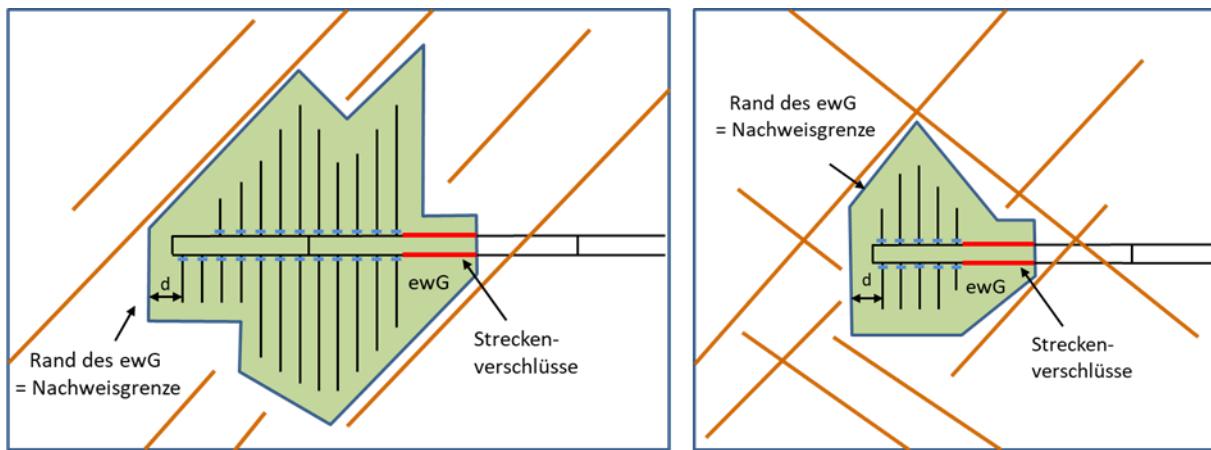


Abb. 3.6: Draufsicht auf einzelne ewG-Zellen unterschiedlicher Größe mit Verschlussbauwerken; blau: Abschlusswiderlager, rot: Streckenverschlüsse

Um die Vorgehensweise bei der Nachweisführung zu beschreiben, wurde daher zunächst ein „Referenz-ewG“ mit einer bestimmten Größe definiert. Abb. 3.7 zeigt diesen Referenz-ewG zusammen mit seinen Größenangaben. Um die gesamten Abfälle nach gegenwärtigem Mengengerüst einzulagern, wären insgesamt 24 derartiger ewG notwendig. Für das Konzept des multiplen ewG wurde ein großräumiges Kluftmodell entwickelt (Abb. 3.1) (Mrugalla et al. 2021). Dort sind die einzelnen ewG-Zellen in Bereichen vorgesehen, die nicht von hydraulisch signifikant wirksamen Klüften durchzogen sind. Unabhängig von der großräumigen Kluftsituation wird davon ausgegangen, dass die ewG-Zellen nicht frei von Klüften sind. Es wird angenommen, dass kleinere, zumeist mineralisierte und damit weitestgehend geschlossene Klüfte in jedem Fall vorhanden sind. Um diese Kluftsituation abzubilden, wurde ebenfalls unter Verwendung einer statistischen Kluftgenerierung, ein Kluftmodell für den Referenz-ewG erstellt. Dieses Kluftmodell ist in Abb. 3.7 (links) dargestellt (vgl. auch Abb. 3.1).

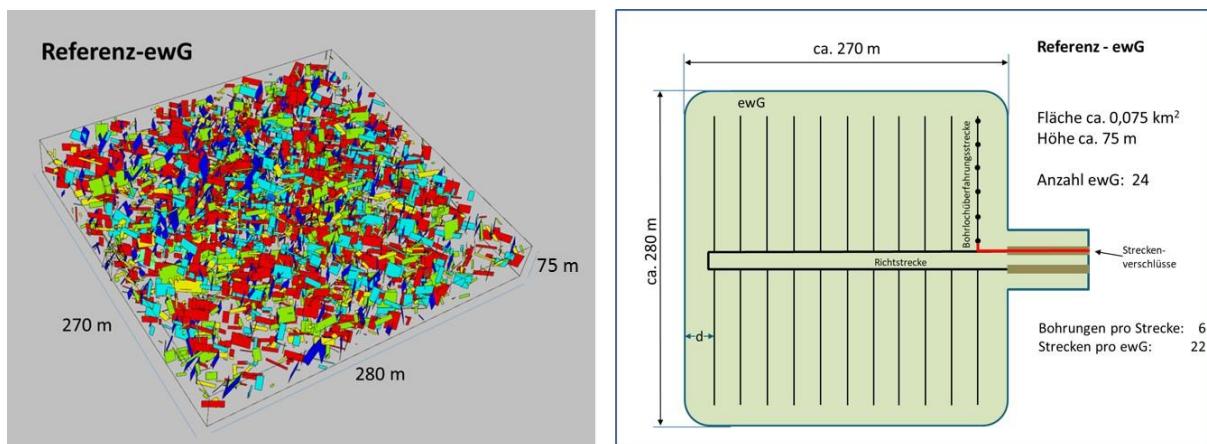


Abb. 3.7: Kluftmodell (links) für einen Referenz-ewG (rechts)

Unabhängig von ihrer hydraulischen Wirksamkeit stellen Klüfte immer auch eine mechanische Schwächezone dar. Der Integritätsnachweis für einen ewG muss genau dies berücksichtigen. Die einem ewG zugeordnete Sicherheitsfunktion lautet wie folgt.

Sicherheitsfunktion: *Jeder einzelne ewG soll den Einschluss der Radionuklide im gesamten Bewertungszeitraum gewährleisten.*

3.3 Geotechnische Verschlussbauwerke innerhalb eines ewG

Das dritte Element dieses diversitär redundanten Barrierensystems stellt das Verschlussystem innerhalb der ewG dar. Dieses Verschlussystem wiederum kann aufgrund der räumlichen Beschränktheit nur aus drei wesentlichen Elementen bestehen,

- dem Verschluss der einzelnen Einlagerungsbohrlöcher,
- dem Versatz in den Einlagerungs- und Zugangsstrecken und
- einem Streckenverschluss am Rand des jeweiligen ewG.

Jede einzelne Bohrlochüberfahrungsstrecke wird nach Beladung der Einlagerungsbohrlöcher und Versatz der Überfahrungsstrecke an der Einmündung in die Zugangsstrecken mit einem Abschlusswiderlager (blau in Abb. 3.6) verschlossen. Die Doppelstrecken als Zugang zum ewG bleiben während der gesamten Betriebsphase uneingeschränkt befahrbar.

Ist die Entscheidung gefallen, das Einlagerungsfeld bzw. die ewG-Zellen zu verschließen, werden die Zugangsstrecken versetzt und am Rand des ewG mit Streckenverschlüssen versiegelt (rot in Abb. 3.6). Um dem Anspruch nach Redundanz zu genügen, muss sowohl der Behälter allein als auch das Verschlussystem in der Lage sein, den sicheren Einschluss der Radionuklide für den gesamten Bewertungszeitraum innerhalb eines ewG zu gewährleisten. Für den Behälter wird dies, wie oben beschrieben, durch eine 5 mm dicke Kupferschicht erreicht. Bei dem Verschlussystem soll dies durch eine Anordnung von Verschlusselementen erreicht werden, die im Hinblick auf eine diversitäre Redundanz optimiert sind (vgl. Kapitel 2.2). Eine vollständige Redundanz kann nicht realisiert werden, da eine unabhängige Funktionsübernahme jedes einzelnen Verschlusselementes für sich allein für den gesamten Bewertungszeitraum kaum möglich ist. Durch Mehrfachanordnung gleicher Abdichtmodule wird aber zumindest dem Gedanken der homogenen Redundanz und durch Verwendung unterschiedlicher Dichtmaterialien und deren Kombination der diversitären Redundanz Rechnung getragen.

Im Folgenden werden zunächst die Verschlusselemente mit ihren Sicherheitsfunktionen erläutert. Im Anschluss werden dann die zugehörigen Leistungsziele und Designanforderungen abgeleitet.

3.3.1 Bohrlochverschluss

Das Bentonit-Funktionselement soll eine geringe Permeabilität gegenüber Lösungen, gleichzeitig aber eine ausreichende Permeabilität gegenüber Gas haben, um eine Rissbildung aufgrund von hohem Gasdruck, der wiederum durch thermische Expansion und Metallkorrosion erzeugt werden könnte, zu verhindern. Der Bohrlochverschluss (vgl. Abb. 3.2) besteht aus zwei Funktionselementen. Jedes Bohrloch wird durch ein etwa 2 m langes Bentonit-Dichtelement versiegelt. Jedes Bentonit-Dichtelement wird von einem darüber liegenden Widerlager an seinem Platz gehalten, insbesondere wenn ein Quellprozess und damit eine Volumenausdehnung des Bentonits einsetzt. Gemäß Kapitel 2.2.2 werden dem Bohrlochverschluss Sicherheitsfunktionen und seinen Funktionselementen „spezifische Funktionen“ zugeordnet.

Sicherheitsfunktion: *Der Bohrlochverschluss soll den druckgetriebenen Flüssigkeitsstrom in das Bohrloch hinein und aus ihm hinaus im Bewertungszeitraum minimieren.*

Im Hinblick auf diese Sicherheitsfunktion des Bohrlochverschlusses werden für die Funktionselemente des Bauwerkes jeweils spezifische Funktionen definiert. Dem Bentonit-Dichtelement wird die eigentliche Minimierung der Lösungsmigration zugeordnet, während das darüber liegende Widerlager die Aufgabe hat, das Dichtelement am Platz zu halten und eine Volumenausdehnung durch Quellung zu verhindern, damit die Dichtwirkung erreicht wird.

3.3.2 Versatz in der Bohrlochüberfahrungsstrecke

Das zweite Element des Verschlussystems stellt der Versatz in den Bohrlochüberfahrungsstrecken und in den Zugangsstrecken dar (vgl. Abb. 3.2). Diesem Versatz wird folgende Sicherheitsfunktion zugeordnet:

Sicherheitsfunktion: *Der Versatz in der Bohrlochüberfahrungsstrecke soll gewährleisten, dass eine Migration von Lösungen innerhalb dieser Strecken der einzelnen ewG inklusive der Auflockerungszone möglichst gering ist.*

Die damit verbundenen „spezifischen Funktionen“ des Versatzes sind zum einen, den Hohlräum in der Strecke kraftschlüssig zum Gebirge auszufüllen, so dass weitere Rissbildungen im Gebirge durch Konvergenz und Abschalungen minimiert werden und sich die Auflockerungszone nicht vergrößert. Zum anderen soll der Versatz die Migration von Lösungen durch das Grubengebäude minimieren. Das wird durch den Bentonitanteil erreicht, der beim Kontakt mit wässrigen Lösungen quillt und die Resthohlräume verschließt.

3.3.3 Streckenverschluss

In Abb. 3.8 ist beispielhaft ein Konzept für einen Streckenverschluss am Ausgang eines ewG dargestellt. Mit Blick auf die Richtung des Baufortschritts beginnt der Streckenverschluss mit einem Doppelwiderlager. Dieses Widerlager soll einerseits die Lagestabilität des Versatzes in der Zugangsstrecke gewährleisten und andererseits die Lagestabilität der ersten Dichtelement-Kombination im Streckenverschluss. An dieses Widerlager schließen sich ein Dichtelement aus Asphalt/Bitumen, ein Dichtelement aus Bentonit, eine Filterschicht und eine Aufsättigungskammer bestehend aus Schotter an, bevor ein weiteres Doppelwiderlager deren Lagestabilität garantiert. Der Grund für diese Anordnung ist folgender: In dem Moment, wenn das Bentonitelement beginnt Flüssigkeit aufzunehmen, setzt der Quellprozess ein. Durch die beiderseitige Einspannung wird dadurch ein Quelldruck erzeugt, der zum einen die Kontaktzone zum Gebirge durch Volumenausdehnung und Anpressdruck abdichtet und zum anderen aber auch einen Druck auf das Asphalt/Bitumen-Dichtelement ausübt. Durch diesen Druck wird das vergleichsweise weiche Asphaltmaterial nicht nur gegen das Widerlager gepresst, sondern auch in radialer Richtung gegen die Streckenkontur. Dieser Prozess ist in Abb. 3.8 durch weiße Pfeile verdeutlicht. Dadurch wird analog zum Bentonitelement ebenfalls die Kontaktzone zur Streckenkontur an dieser Stelle abgedichtet. Die Idee zu einer solchen Kombination wurde erstmals in einem Bericht der TU Bergakademie Freiberg dokumentiert (Kudla et al. 2009). Je nach Bitumen-Anteil in dem Asphaltelement bzw. dem daraus resultierenden Härtegrad besteht auch die Möglichkeit, dass Bitumen teilweise in den Bereich der Auflockerungszone eindringt und damit ihre Durchlässigkeit reduziert. Das ein derartiger Prozess stattfinden kann, wurde im Rahmen von in-situ Versuchen innerhalb des Projektes ELSA-II gezeigt (Jobmann 2018). Dem Asphalt/Bentonit-Kombinationsmodul schließt sich ein reines Bentonitmodul an.

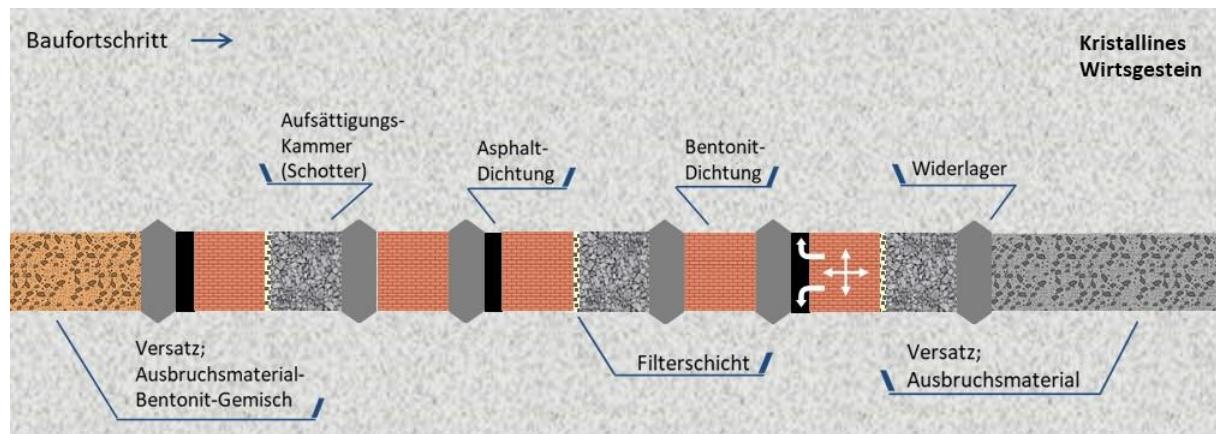


Abb. 3.8: Beispielkonzept für einen Streckenverschluss am Ausgang eines ewG

Das sich anschließende alleinige Bentonit-Dichtelement nimmt Flüssigkeit nur in radialer Richtung aus dem Gebirge auf. Aufgrund des geringen Flüssigkeitsangebotes und der geringen Permeabilität des Kristalliningesteins kann dieser Prozess unter Umständen einige Jahrhunderte oder länger dauern. Die konkrete Dimensionierung der einzelnen Elemente ist eine Sache der Auslegung bzw. der Integritätsanalyse der gesamten Barriere und erfolgt im Anschluss an diese. Die beiden Module, ein reines Bentonitelement und ein kombiniertes Asphalt-Bentonit-Element werden mehrfach, je nach verfügbarem Platz, hintereinander angeordnet. Durch diese Anordnung wird einer diversitär redundanten Bauweise Vorschub geleistet. Das Ende des Streckenverschlusses bildet ein Abschlusswiderlager, das gleichzeitig auch die Grenze des ewG bildet und damit einen Bewertungspunkt. Die Sicherheitsfunktion des Streckenverschlusses lautet:

Sicherheitsfunktion: *Der Streckenverschluss soll im Zusammenspiel mit dem Bohrlochverschluss und dem Versatz den sicheren Einschluss der Radionuklide innerhalb der einzelnen ewG im Bewertungszeitraum gewährleisten.*

Die spezifische Funktion der Bentonit-Dichtelemente ist die Minimierung druckgetriebener Fluidbewegung innerhalb der Zugangsstrecken. Die spezifische Funktion der Asphalt-Dichtelemente ist analog, nur mit dem Unterschied, dass ihre Funktionsdauer deutlich geringer ist. Sie sollen druckgetriebene Fluidbewegung innerhalb der Zugangsstrecke solange minimieren, bis die angeschlossenen Bentonit-Dichtelemente ihre volle Dichtwirkung erreicht haben. Asphalt hat gegenüber Bentonit den Vorteil, dass nach dem Einbau eine schnelle Abdichtwirkung erreicht wird, während Bentonitelemente eine lange Zeit benötigen, um ihre volle Dichtwirkung zu entfalten. Mit der begrenzten Funktionsdauer der Asphaltelemente wird der Tatsache Rechnung getragen, dass aufgrund von Degradationseffekten, vornehmlich durch mikrobielle Aktivitäten, die Funktionsdauer von 1 Million Jahre schwer nachweisbar ist. Die spezifische Funktion der Aufsättigungskammern liegt darin, ausreichend Flüssigkeit für die Aufsättigung der über Filterschichten angeschlossenen Bentonitelemente bereitzustellen. Die Filterschichten dienen der Minimierung von Erosionserscheinungen an den Bentonitelementen, speziell zur Vermeidung der Ausbildung lokaler Fließkanäle (Pipes). Die Funktion der Widerlager besteht darin, die Lagestabilität sowohl der Dichtelemente als auch des Versatzes zu gewährleisten, so dass sich der jeweils gewünschte Quelldruck einstellen kann.

3.3.4 Spezifikation der Dichtheitsanforderungen und Leistungsziele

3.3.4.1 Grundlagen

Im vorigen Kapitel wurde der Aufbau des geotechnischen Barrierensystems erläutert und die Konzeption und Funktionen der einzelnen Verschlussbauwerke beschrieben. Jetzt muss noch ermittelt bzw. definiert werden, welche hydraulischen Widerstände die einzelnen Barrieren und letztendlich das gesamte Barrierensystem haben müssen, damit eine Migration von Radionukliden durch die untertägigen Grubenräume aus dem ewG heraus nicht in einer unzulässigen Größenordnung auftreten kann. Diese Forderung ist in jedem Fall dann erfüllt, wenn das geotechnische Barrierensystem so dicht ist, dass über den Bewertungszeitraum die Radionuklide den Rand des ewG nicht erreichen. Das heißt, dass das gesamte geotechnische Barrierensystem im Zusammenspiel einen hydraulischen Widerstand besitzen muss, der es den Radionukliden, selbst auf dem kürzesten Weg, nicht möglich macht, den Rand des ewG im Bewertungszeitraum zu überschreiten.

Abb. 3.9 zeigt das Schema zur vereinfachten Berechnung des hydraulischen Widerstandes des geotechnischen Barrierensystems. In Analogie zur Berechnung elektrischer Widerstände kann der hydraulische Widerstand des geotechnischen Barrierensystems in Form einer Reihenschaltung ermittelt werden. Jedes Verschlussbauwerk bzw. jedes Dichtelement hat einen Strömungswiderstand, der die Migration von Lösungen innerhalb des Streckensystems behindert. Sämtliche hydraulischen Widerstände der Bauwerke addieren sich längs des Weges, den die Radionuklide, getragen von der Migration der Lösung, bis zum Rand des ewG zurücklegen müssen. Der Gesamtwiderstand entspricht also der Summe der Einzelwiderstände. Gemäß Abb. 3.9 setzt sich das in diesem Projekt konzipierte Barrierensystem aus 10 Einzelwiderständen zusammen, dessen Gesamtwiderstand sich gemäß Gleichung (3.1) **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** berechnen lässt.

$$R = \sum_{i=1}^{10} R_i \quad (3.1)$$

Jeder einzelne dieser Widerstände (R_1 bis R_{10}) setzt sich aus drei Einzelwiderständen zusammen, dem Widerstand des Dichtmaterials selbst, dem Widerstand der Kontaktzone zwischen Dichtmaterial und Gebirge und dem Widerstand der Auflockerungszone im umgebenden Gebirgsbereich. Der Gesamtwiderstand aus diesen drei Einzelwiderständen lässt sich, erneut analog elektrischer Widerstände, anhand einer Parallelschaltung gemäß Gleichung (3.2) bestimmen (vgl. Abb. 3.9 rechts).

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{ia}} + \frac{1}{R_{ib}} + \frac{1}{R_{ic}} \quad (3.2)$$

Für eine Bewertung ist der ungünstigste Fall zu betrachten, d.h. die kürzeste Verbindung von einem Einlagerungsbohrloch zum Rand einer ewG-Zelle anzusetzen. Je kürzer die Weglänge S , desto eher wird der Rand des ewG erreicht. Ebenfalls aus Gründen der Konservativität ist eine eventuell vorhandene natürliche Lösungsmigration im Wirtsgestein dergestalt zu berücksichtigen, dass der Nachweis entlang des Weges in Strömungsrichtung und nicht entgegen gesetzt erfolgt.

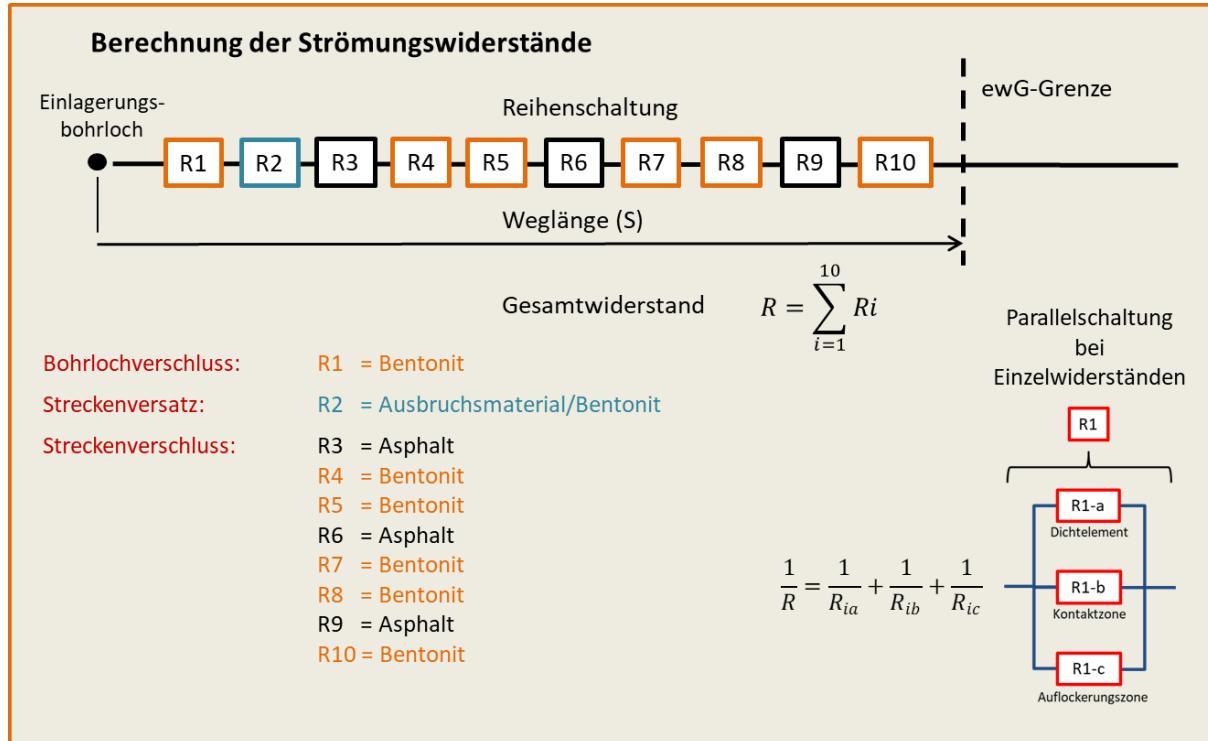


Abb. 3.9: Schema zur Berechnung des hydraulischen Widerstandes des kompletten geotechnischen Barrierensystems

Die durchschnittliche Mindestfließgeschwindigkeit, v_{Grenz} , die ein potenzielles Radionuklid erreichen muss, um aus dem Einlagerungsbereich durch die geotechnischen Barrieren zum Rand des ewG zu gelangen, kann wie folgt berechnet werden (Maßmann & Zieflle 2016):

$$v_{Grenz} = \frac{s}{t} \cdot n_{eff} \quad (3.3)$$

wobei v_{Grenz} die Filtergeschwindigkeit (Darcy-Geschwindigkeit), s die Weglänge durch das gesamte Verschlusssystem, t den Bewertungszeitraum und n_{eff} die fließwirksame effektive Porosität darstellen. In den Berechnungen zur Bewertung der ausreichenden Dichtheit wird im Hinblick auf den hydraulischen Gesamtwiderstand das Verhältnis der durchschnittlichen Filtergeschwindigkeit v zur Grenzgeschwindigkeit ausgewertet. Ist dieser Quotient kleiner 1, ist der hydraulische Widerstand ausreichend groß.

$$\frac{v}{v_{Grenz}} < 1 \quad (3.4)$$

Zur Berechnung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit v durch das geotechnische Barrierensystem werden zunächst die hydraulische Widerstände (vgl. Abb. 3.9) der einzelnen Barrierenmodule inklusive des Dichtmaterials selbst, der Kontakt- und Auflockerungszone bestimmt. Die hydraulischen Widerstände lassen sich gemäß folgender Gleichung bestimmen (geändert nach Hirsekorn et al. 1999):

$$R_i^{a,b,c} = \frac{\mu \cdot L_i^{a,b,c}}{F_i^{a,b,c} \cdot k_i^{a,b,c}} \quad (3.5)$$

mit

μ	=	dynamische Viskosität der Lösung [Pa·s]
L_i	=	Länge des Moduls [m]
F_i	=	Querschnittsfläche des Moduls [m^2]
k_i	=	Permeabilität des Moduls [m^2]
Indizes:		
i	=	Nummer des Dichtmoduls
a, b, c	=	a: Dichtmaterial, b: Kontaktzone, c: Auflockerungszone

Für die Strömung wässriger Lösungen wird das Darcy-Gesetz verwendet, wonach sich der Volumenstrom Q in Abhängigkeit von anstehenden Druckunterschied Δp wie folgt berechnen lässt:

$$Q = \frac{1}{R} \cdot \Delta p \quad (3.6)$$

Die notwendigen Druckgradienten lassen sich dem großräumigen 3D-Modell entnehmen, mit dessen Hilfe das Strömungssystem der geologischen Barriere simuliert wird (Thiedau et al. 2021). Nach gegenwärtigem Stand wird für den fließwirksamen hydraulischen Druckgradienten ein Wert von $100 \text{ Pa}\cdot\text{m}^{-1}$ angenommen. Dieser Wert wird für kristallines Grundgebirge als hoch und damit konservativ angesehen. Nach Abschluss der großräumigen Simulationen ist dieser Wert zu prüfen. Die benötigte mittlere Geschwindigkeit v ergibt sich damit zu

$$v = \frac{Q}{A} \quad (3.7)$$

wobei A den mittleren Strömungsquerschnitt an der zurückzulegenden Strecke s darstellt (vgl. Abb. 3.9). Der mittlere Strömungsquerschnitt A wird als gewichtetes Mittel berechnet, wobei die Wichtung über die Längen L der einzelnen hydraulischen Widerstände erfolgt.

$$A = \sum_i \frac{(L_i \cdot A_i)}{\sum_i L_i} \quad (3.8)$$

Die Basis zur Berechnung der einzelnen Strömungswiderstände sind die Permeabilitäten der einzelnen Barrierenmodule.

3.3.4.2 Systemanalyse

Bevor Dichtheitsanforderungen bzw. Leistungsziele an die einzelnen Verschluszbauwerke definiert werden, soll zunächst im Rahmen einer Sensitivitätsstudie untersucht werden, welchen Einfluss die einzelnen Bestandteile des Barrierensystems auf das Verhalten des Gesamtsystems haben. Daran kann erkannt werden, welche Barriere die Hauptlast bei dem sicheren Einschluss trägt. Zu diesem Zweck wurden zum einen der hydraulische Widerstand gemäß Gleichung ((3.1)) und das Geschwindigkeitsverhältnis gemäß Gleichung (3.4) als Funktion der integralen Permeabilität ausgewertet. Als Ausgangspunkt wurde für jede einzelne der in Abb. 3.9 angegebenen Barrierenkomponente eine integrale Permeabilität von $5,5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ gewählt, da bei diesem Wert das Geschwindigkeitsverhältnis nahe 1,0 ist. Davon ausgehend wurde dann die integrale Permeabilität jeder einzelnen Barriere im Bereich von $1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ bis $1 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ variiert. Diese Werte entsprechen der erwarteten Bandbreite für die in Frage kommenden Komponenten.

Die Ergebnisse sind in Abb. 3.10 dargestellt. Betrachtet man den hydraulischen Widerstand (linkes Diagramm) so fällt zunächst auf, dass bei einer Variation der integralen Permeabilität

oberhalb von 10^{-17} m^2 mit Ausnahme des Bohrlochverschlusses kaum Veränderungen des Gesamtwiderstandes, egal welche Barrierekomponente variiert wurde, feststellbar sind. Erst unterhalb von 10^{-17} m^2 ist ein Anstieg des Gesamtwiderstandes zu beobachten. Besonders deutlich steigt der Gesamtwiderstand an, wenn sich die integrale Permeabilität des Bohrlochverschlusses erhöht. Die geringste Erhöhung ergibt sich bei einer Verbesserung der Permeabilität der Elemente der Streckenverschlüsse (5 Bentonitelemente und 3 Asphaltelemente).

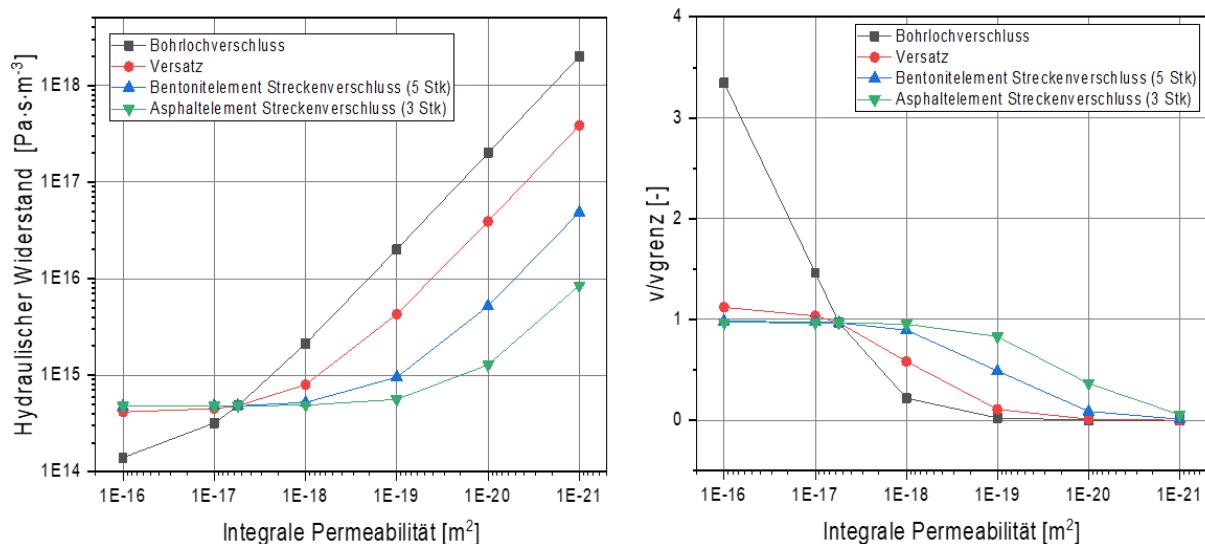


Abb. 3.10: Hydraulischer Widerstand und Geschwindigkeitsverhältnis als Funktion der integralen Permeabilität von Barrierekomponenten

Ein ähnliches Bild zeigt sich, wenn man sich das Geschwindigkeitsverhältnis (rechtes Diagramm) ansieht. Betrachtet man den Bohrlochverschluss, so wird ersichtlich, dass bereits bei einer Permeabilität von 10^{-18} m^2 das Verhältnis mit etwa 0,25 signifikant unter den Wert 1 sinkt. Im verringerten Ausmaß gilt das auch für den Streckenversatz (ca. 0,5). Mit den Elementen der Streckenverschlüsse hingegen werden diese Werte erst bei Permeabilitäten im Bereich von $10^{-20} - 10^{-21} \text{ m}^2$ erreicht. Die Bedeutung des Streckenversatzes liegt in seiner Länge, die ja als multiplikativer Faktor direkt in die Berechnung des hydraulischen Widerstandes (Gleichung (3.5) eingeht. Bei dem Bohrlochverschluss spielt zum einen die kleine Querschnittsfläche eine große Rolle, die umgekehrt proportional in die Berechnung des Widerstandes eingeht und zum anderen die deutlich kleinere Mächtigkeit der Auflockerungszone.

Als Fazit kann festgehalten werden, dass die Effektivität des Einschlusses durch das geotechnische Barrierensystem in erster Linie von der Güte der Bohrlochverschlüsse, in zweiter Linie vom Streckenversatz und in dritter Linie von den Elementen der Streckenverschlüsse. Letztere haben ihre wesentliche Bedeutung darin, den Lösungszufluss schachtseitig, speziell durch die schnell abdichtenden Asphaltelemente, zu minimieren, so dass das hydrochemische Gleichgewicht im Einlagerungsbereich möglichst wenig durch Lösungen anderer chemischer Zusammensetzung gestört wird. Bezuglich des hydraulischen Widerstandes gilt, dass dieser einen Wert von $10^{-15} \text{ Pa}\cdot\text{s} \text{ m}^{-3}$ haben sollte, damit das Geschwindigkeitsverhältnis 1 ist.

Um eine Einschätzung zur Robustheit des geotechnischen Barrierensystems machen zu können, wurde untersucht, inwieweit der Ausfall einzelner Barrieren durch andere Barrieren aufgefangen werden kann. Beispielhaft wurde der Ausfall des Bohrlochverschlusses, des Streckenversatzes und jeweils ein Streckenverschlusselement aus Bentonit und Asphalt simuliert.

In Abb. 3.11 ist dargestellt, um wieviel besser die jeweils anderen Dichtelemente sein müssen, damit der Ausfall eines der Elemente kompensiert werden kann.

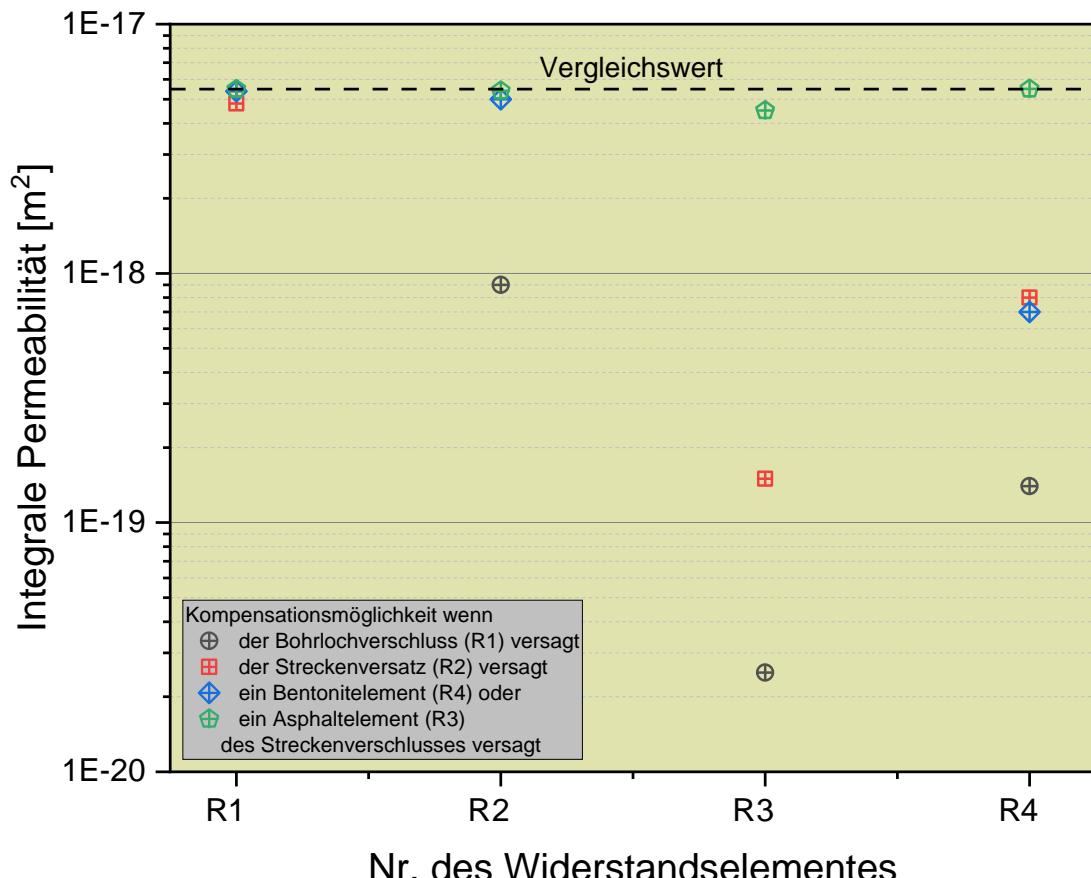


Abb. 3.11: Notwendige Reduzierung der integralen Permeabilität einzelner Barriere-Komponenten und damit Kompensation des Ausfalls einer der Komponenten (R1=Bohrlochverschluss, R2=Streckenversatz, R3+R4=Asphalt- und Bentonitelemente der Streckenverschlüsse)

Fällt beispielsweise der Bohrlochverschluss (R1) aus, so müsste entweder der Streckenversatz (R2) um etwa eine Größenordnung in der integralen Permeabilität reduziert sein, oder die Elemente des Streckenverschlusses (R3, R4) müssten um etwa 2 bis 3 Größenordnungen dichter sein. Diese Werte sind jeweils durch die schwarzen Punkte in Abb. 3.11 dargestellt. Die beste Möglichkeit zur Kompensation bietet demnach der Versatz (R2). Fällt der Versatz (R2) aus, so wäre eine Kompensation (rote Punkte) durch eine nur geringe Verbesserung des Bohrlochverschlusses möglich. Der Ausfall eines der Elemente des Streckenverschlusses (R3 oder R4) kann durch nur unwesentliche Verbesserungen des Bohrlochverschlusses (R1) oder des Streckenversatzes (R2) leicht kompensiert werden. Als Fazit bleibt festzustellen, dass im Wesentlichen die Güte des Bohrlochverschlusses die Einschlussfähigkeit bestimmt. Würde es gelingen, für alle Bohrlochverschlüsse eine integrale Permeabilität von jeweils 10^{-19} m² zu erreichen, würden die Bohrlochverschlüsse zusammen mit dem ewG ausreichen, den Einschluss zu gewährleisten.

Basierend auf diesen Untersuchungen werden im Folgenden die Dichtheitsanforderungen an die einzelnen Barrieren und damit ihre Leistungsziele in einer Form definiert, die auch den Ausfall einzelner Elemente verkraften kann.

3.3.4.3 Leistungsziele und Designanforderungen

Um die in Kapitel 3.2.1 definierten Sicherheitsfunktionen zu erfüllen, werden den Funktions-elementen der einzelnen Barrieren verschiedene Leistungsziele zugeordnet, an die wiederum spezifische Designanforderungen gekoppelt sind.

3.3.4.3.1 Bohrlochverschluss

Der Bohrlochverschluss besteht aus Dichtelement, Widerlager und Filterschicht.

Bentonit-Dichtelement

Mit Blick auf die Sicherheitsfunktion und unter Berücksichtigung der Systemanalysen gemäß Kapitel 3.3.4.2, ergibt sich für den Bohrlochverschluss ein Wert für den hydraulischen Widerstand von $4 \cdot 10^{14} \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$. Dies entspricht einer integralen Permeabilität von $5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$. Da die Analysen ohne Wechselwirkung mit dem Gebirge durchgeführt wurden, die Ergebnisse also unabhängig von der Art des Gebirges sind, wird als Arbeitshypothese das Leistungsziel für das Bentonit-Dichtelement wie folgt definiert:

Leistungsziel: *Das Bentonit-Element soll nach erfolgter Aufsättigung mit Lösung eine integrale Permeabilität erreichen, die folgende Ungleichung erfüllt:
 $k \leq 5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$*

Nach Fertigstellung des vollständigen Verschlusssystems ist diese Arbeitshypothese durch Prozessanalysen zu verifizieren und das Leistungsziel ggf. anzupassen. Damit das Leistungsziel erreicht werden kann, müssen entsprechende Design-Anforderungen bzw. Design-Spezifikationen erfüllt werden.

Designanforderung und Designspezifizierung

Aus Untersuchungen an dem als Referenzmaterial angesehenen Ca-Bentonit ist bekannt, dass die Permeabilität eines Dichtelementes abhängig ist von der Größe des erreichten Quelldruckes (Sitz et al. 1997, Jobmann 2002). Um eine Permeabilität für das Dichtelement in Höhe von $5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ zu erreichen, wäre demnach ein Quelldruck von etwa 1,1 MPa notwendig. Als Designanforderung wird definiert, dass das Bentonit-Element nach erfolgter Aufsättigung mit Lösung einen Quelldruck von $p_q \geq 1,1 \text{ MPa}$ erreichen soll.

Für das Bentonit-Element werden hoch kompaktierte zylinderförmige Blöcke mit dem Durchmesser der Einlagerungsbohrung ($d = 90 \text{ cm}$) abzüglich einer zur Einbringung notwendigen Toleranz hergestellt. Die zylinderförmigen Blöcke haben eine Höhe von 50 cm. Nach Einbringung eines jeden zylindrischen Blockes wird eine dünne Schicht Bentonitmehl eingebracht, das dazu dient, die radialen Toleranzen, zumindest an den Schnittstellen der zylindrischen Blöcke, zu überbrücken, um einen Kontakt mit dem Gebirge herzustellen und damit eine kapillare Wasseraufnahme aus dem umgebenden Gestein zu initiieren. Basierend auf Untersuchungen der Bergakademie Freiberg (Sitz et al. 1997) sollte die integrale Einbautrockendichte, also kompaktierte Blöcke und Bentonitmehl zusammen betrachtet, bei etwa $\rho \geq 1.650 \text{ kg m}^{-3}$ liegen. Bei dieser Trockendichte ist infolge einer Aufsättigung davon auszugehen, dass ein Quelldruck von $p_q \geq 1,1 \text{ MPa}$ erreicht wird. Auch dieser Wert ist als Arbeitshypothese zu verstehen und entsprechend zu verifizieren.

Widerlager

Würde es zu einer signifikanten Verschiebung des Widerlagers durch die Quelldruckentwicklung des Bentonit-Dichtelementes kommen, würde dies zu einer Auflockerung des Bentonit-Elements führen und seine Eigenschaften verändern. Wenn die Auflockerung des Bentonit-

Elements weniger als 3 % seiner Länge beträgt, verändern sich die Dichte und damit der erreichbare Quelldruck und die damit verbundene Permeabilität nicht wesentlich (Wagner 2005). Werden die 3 % überschritten, ist mit einer signifikanten Verringerung des Quelldrucks und einer damit verbundenen Erhöhung der Permeabilität zu rechnen. Als Leistungsziel für das Widerlager wird daher definiert:

Leistungsziel: *Das Widerlager soll auch bei erfolgter Quelldruckentwicklung des Bentonit-Elementes seine Position derart wahren, dass folgende Ungleichung für das Bentonit-Element erfüllt ist: $\Delta L/L \leq 3\%$*

Designanforderung und Designspezifizierung

Das Widerlager besteht aus Festgesteinssblöcken und sollte kegelförmig konzipiert und eingesetzt werden (Abb. 3.12, Herold 2019). Das Widerlager besteht aus einzelnen Platten, wobei die mittleren Steine kegelförmig präpariert werden, um bei Druckbelastung von unten die gewünschte Gewölbewirkung zu erzielen. Abb. 3.12 zeigt das Widerlager in seinen einzelnen Teilen. Der mittlere kegelförmige Stein, der als Letztes eingesetzt wird, muss zunächst tiefer gesetzt werden. Dazu ist eine Aussparung innerhalb der darunterliegenden Filterschicht vorzusehen. Durch den dadurch vorhandenen Hohlraum im Bereich des mittleren Steins, wird künstlich Lösung der Filterschicht zugeführt. Die Filterschicht sorgt dafür, dass die Lösung sich gleichmäßig auf der Bentonitoberfläche verteilt. Das Bentonit nimmt die Lösung auf und beginnt zu quellen.

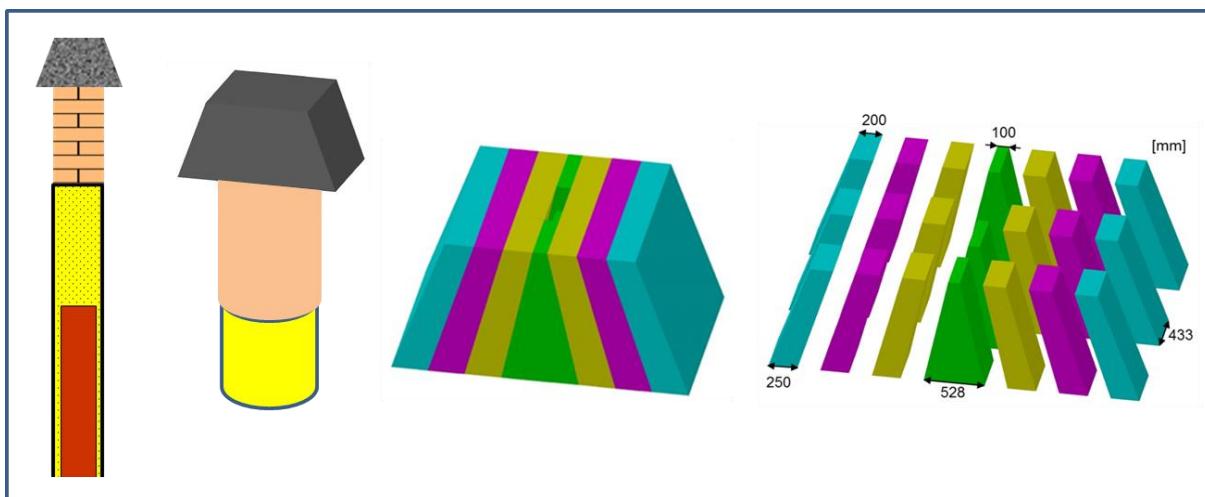


Abb. 3.12: Konzeption eines Widerlagers aus Festgesteinssblöcken zur Gewährleistung der Lagestabilität des darunterliegenden Dichtelementes (Herold 2019)

Der mittlere Stein wird hochgedrückt. Der entstehende Hohlraum wird durch das Quellen des Bentonit zugeschoben und das Widerlager kann seine Funktion aufnehmen. Die geringfügige Volumenausdehnung des Buffers an seiner Oberseite ist für die Quelldruckentwicklung ohne Bedeutung. Der große Vorteil dieser Option besteht darin, dass kein Material mit Zementphasen verwendet wird, so dass eine Langzeitstabilität vorausgesetzt werden kann. Damit kann die Funktionsdauer des Widerlagers auf den gesamten Bewertungszeitraum ausgedehnt und von der Entwicklung des überliegenden Versatzes entkoppelt werden.

Filterschicht

Zwischen dem Bentonitdichtelement und dem Widerlager wird eine Filterschicht eingefügt. Mit dieser Filterschicht soll eine Vergleichmäßigung eines Lösungszutritts auf die Bentonitoberfläche gewährleistet werden. Dadurch wird eine Erosion des Bentonit verhindert und es kann auch von einem gleichmäßigen Quellprozess des Bentonit ausgegangen werden. Als Leistungsziel für die Filterschicht wird daher definiert:

Leistungsziel: *Die Filterschicht soll ein Körnungsband und eine Mächtigkeit aufweisen, das nach bestehenden Regeln einen Erosionsschutz für das angrenzende Material bietet.*

Mit diesem Leistungsziel sind folgende Designanforderungen verbunden.

Designanforderung und Designspezifizierung

Die Filterschicht soll eine Mächtigkeit von $M \geq 50$ cm besitzen und eine Korngrößenverteilung, die bezüglich der Korngröße etwa dem 10-fachen des Körnungsbandes des Bentonits entspricht.

3.3.4.3.2 Streckenversatz

Mit Blick auf die oben durchgeführte System- bzw. Dichtheitsanalyse werden die Leistungsziele für den Streckenversatz wie folgt festgelegt.

Leistungsziel 1: *Der Versatz soll nach Abschluss der Aufsättigung mit Lösung also nach erfolgter Quellentwicklung eine Permeabilität von $k \leq 5 \cdot 10^{-16} m^2$ besitzen.*

Leistungsziel 2: *Der Versatz soll den Hohlraum in der Strecke kraftschlüssig zum Gebirge auszufüllen, so dass weitere Rissbildungen im Gebirge durch Konvergenz und Abschalungen minimiert werden und sich die Auflöckerungszone nicht vergrößert.*

Bei dem genannten Permeabilitätswert handelt es sich um eine Arbeitshypothese basierend auf Erfahrungswerten. Nach Fertigstellung des vollständigen Verschlussystems ist diese Arbeitshypothese durch Prozessanalysen zu verifizieren und ggf. anzupassen.

Designanforderung:

Derzeit wird für das Versatzmaterial als Arbeitshypothese ein Mischungsverhältnis von 70/30 (aufbereitetes Ausbruchsmaterial / Bentonit) angenommen. Bei diesem Mischungsverhältnis wurden Permeabilitäten von 10^{-17} bis $10^{-18} m^2$ gemessen (Pusch1998). Der Versatz soll nach Abschluss der Aufsättigung mit Lösung einen Quelldruck von $p_q > 0,1$ MPa entwickeln. Dieser Wert entstammt Untersuchungsergebnissen von Posiva und SKB, die besagen, dass oberhalb eines Quelldruckes von 0,1 MPa auch eventuell vorhandene Kanalbildungen (Piping), die sich während der Aufsättigung gebildet haben könnten, wieder versiegelt werden (Posiva & SKB 2017). Das genaue Verhältnis muss im Zuge der Auslegungsplanung festgelegt werden. Eine optimale Korngrößenverteilung ist durch entsprechende Untersuchungen zu bestimmen. Wichtig ist in dem Zusammenhang, dass der Bentonitanteil nicht aus dem Korngerüst ausgespült wird.

Die Bildung eines tragfähigen Gerüstes kann durch Verwendung eines grobkörnigen setzungsarmen Gesteinsgerüstes innerhalb der Versatzmischung erreicht werden. Das zur Verwendung vorgesehene Ausbruchsmaterial sollte dementsprechend grobkörnig aufbereitet werden, wobei ein Kornband mit wenig Feinanteil anzustreben ist, da hierdurch eine Setzungsarmut erreicht werden kann. Durch den Kraftschluss mit dem Gebirge werden sowohl die Widerlager der Einlagerungsbohrlöcher in ihrer Funktion unterstützt, als auch die Ausweitung der Auflockerungszonen minimiert. Durch Ausfüllen des Porenraums dieses grobkörnigen Gerüstes mit Bentonit wird nach dessen Quellung eine geringe Permeabilität in der Strecke erreicht, die eine nur langsame Migration von Fluiden zulässt. Ein optimales Kornband bzw. ein optimales Gemisch aus grobkörnigem Material und quellfähigem Bentonitgranulat wäre durch Versuche, speziell auch zur Optimierung der Filterstabilität zu bestimmen.

Jede Einlagerungsstrecke wird an der Einmündung in die Zugangsstrecken mit einem Abschlusswiderlager verschlossen (Abb. 3.13), das aus geringpermeablem Beton besteht.

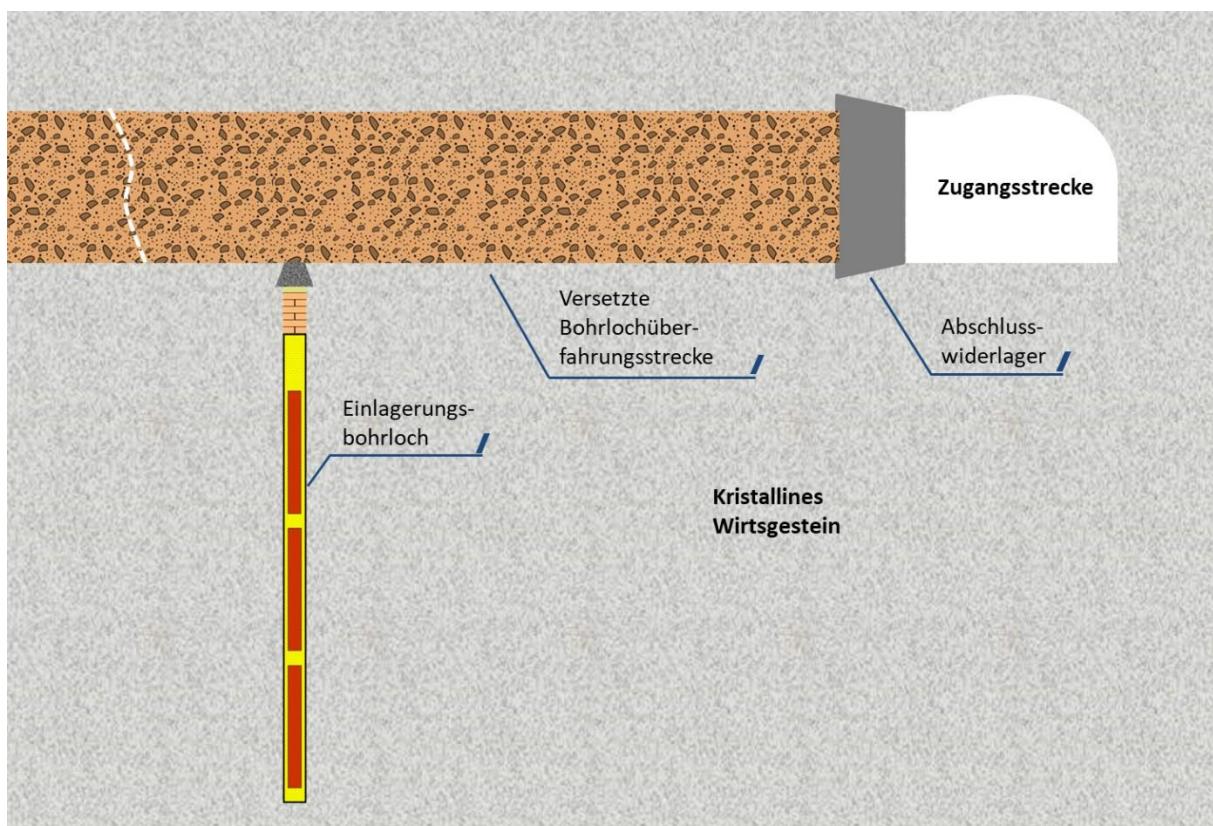


Abb. 3.13: Verfüllte Bohrlochüberfahrungsstrecke mit Abschlusswiderlager

Das Abschlusswiderlager soll zum einen die Lagestabilität des Versatzes in den Überfahrungsstrecken gewährleisten und zum anderen den uneingeschränkten Betrieb der Zugangsstrecken während der gesamten Betriebsphase gewährleisten. Die Abschlusswiderlager werden zudem aus gering permeablem Beton hergestellt, um einen ggf. kapillar getriebenen Wasserdruck aus den Überfahrungsstrecken zu minimieren. Der Funktionszeitraum dieser Widerlager ist begrenzt bis zu dem Zeitpunkt, an dem die angrenzende Zugangsstrecke mit Versatz verfüllt ist, der dann die Stützfunktion übernimmt. Soll im Zuge der Verschlussmaßnahmen ein Einlagerungsfeld bzw. eine ewG-Zelle verschlossen werden, werden die zugehörigen Zu-

gangsstrecken mit dem gleichen Material versetzt, mit dem auch die Bohrlochüberfahrungsstrecken versetzt wurden. Der Ausgang aus einer ewG-Zelle wird schließlich mit Streckenverschlüssen versiegelt.

3.3.4.3.3 Streckenverschluss

Die Leistungsziele für die Verschlusselemente werden wie folgt festgelegt:

Bentonit-Dichthelemente

Leistungsziel: *Das Bentonit-Element soll nach erfolgter Aufsättigung mit Lösung eine integrale Permeabilität erreichen, die folgende Ungleichung erfüllt:
 $k \leq 1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$*

Asphalt-Dichthelemente

Leistungsziel: *Die Asphalt-Elemente sollen eine integrale Permeabilität erreichen, die folgende Ungleichung erfüllt: $k \leq 1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$*

Aufsättigungskammern

Leistungsziel: *Die Aufsättigungskammer soll einen geeigneten Porenraum besitzen, um ausreichend Lösung aufnehmen und zur Aufsättigung der Bentonit-Elemente bereitstellen zu können: Porosität > 25 %.*

Filterschichten

Leistungsziel: *Die Filterschichten sollen einen geeigneten Porositätsgradienten zwischen dem Material in der Aufsättigungskammer und dem Bentonitmaterial besitzen.*

Widerlager

Leistungsziel: *Das Widerlager soll auch bei erfolgter Quelldruckentwicklung des Bentonit-Elementes seine Position derart wahren, dass folgende Ungleichung für das Bentonit-Element erfüllt ist: $\Delta L/L \leq 3\%$*

Nach Fertigstellung des vollständigen Verschlussystems ist diese Arbeitshypothese durch Prozessanalysen zu verifizieren und das Leistungsziel ggf. anzupassen.

Designanforderungen:

Bezüglich der Konstruktion der Bentonit-Dichthelemente wird präferiert, sie ähnlich dem Konzept der SKB auszuführen (SKB 2010b, Kap. 2.3). Der Streckenquerschnitt wird von gestapelten quaderförmigen vorkompaktierten Bentonitblöcken ausgefüllt. Die Blöcke können unterschiedliche Größe haben, um den Hohlräum bestmöglich auszufüllen (Abb. 3.14). Nach Einbringung einer jeden Lage der quaderförmigen Blöcke wird eine dünne Schicht feines Bentonitgranulat eingebracht, das dazu dient, die verbleibenden Resthohlräume zu verschließen. Durch den Kontakt mit dem Gebirge wird eine kapillare Wasseraufnahme aus dem umgebenden Gestein initiiert (vgl. Abb. 3.14). Für das Referenzmaterial (Ca-Bentonit vgl. Kap. 2.3.1) wird als Arbeitshypothese davon ausgegangen, dass die mittlere Trockendichte der Kombination aus kompaktierten Blöcke und feinem Bentonitgranulat bei $\rho \geq 1.500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

liegen sollte, um nach erfolgter Aufsättigung mit Lösung einen Quelldruck von $p_q \geq 0,3 \text{ MPa}$ zu erreichen, der für das Permeabilitäts-Leistungsziel benötigt wird. Je nach verwendeter Bentonitsorte ist dieser Wert zu prüfen und ggf. anzupassen. Inwieweit ein Nachschnitt der Kontur erforderlich ist, muss vor Ort anhand des Zustandes der Auflockerungszone (ALZ) geprüft und entschieden werden.

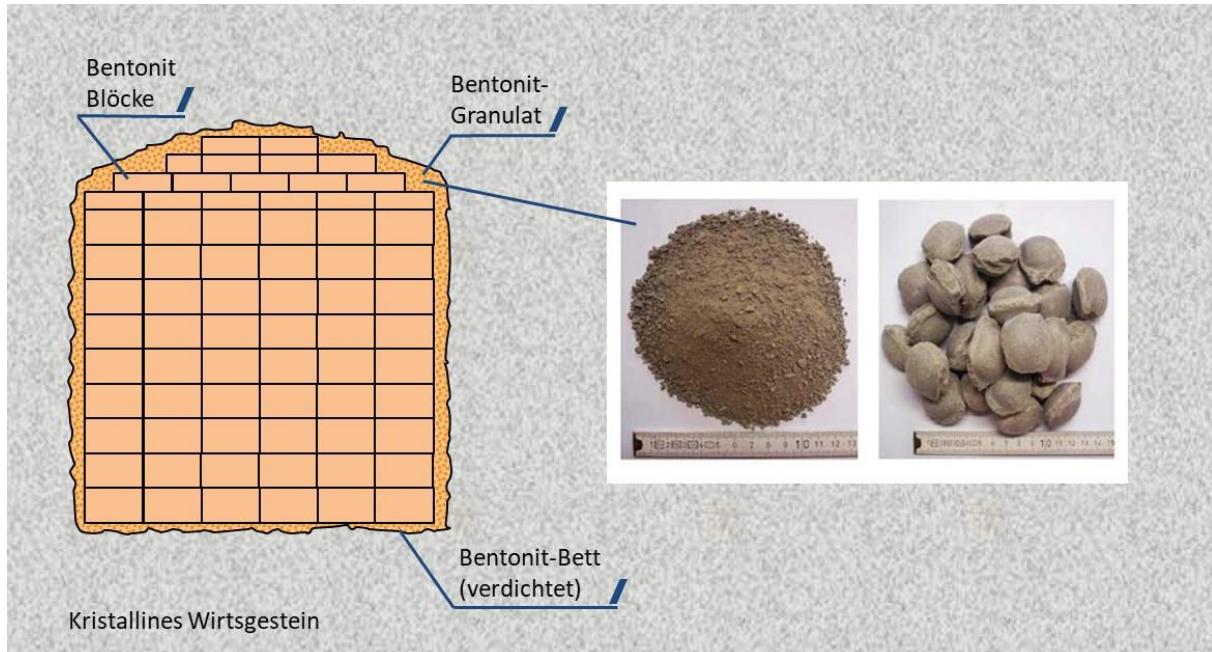


Abb. 3.14: Querschnitt einer Strecke mit Bentonit-Dichtelement (geändert nach SKB 2010b; Fotos aus Wilsnack et al. 2008)

Wie oben bereits erwähnt, geht das Konzept des „multiplen ewG“ davon aus, dass es mehr oder weniger ausgedehnte Bereiche innerhalb des kristallinen Wirtsgesteins gibt, die nur geringfügig bis gar nicht durch hydraulisch wirksame Klüfte beeinflusst werden. Deshalb wird die Grenze des jeweiligen ewG auch nicht über hydraulisch wirksame Störungszonen ausgedehnt, sondern vorher gezogen (vgl. Abb. 3.6). Da das Bentonit-Dichtelement aber Flüssigkeit benötigt, um sich aufzusättigen und einen Quelldruck zu erzeugen, wird für das Kombinationsmodul aus Bentonit und Asphalt eine Aufsättigungskammer im Anschluss an das Bentonitelement errichtet. Bei diesen Kombinationsmodulen ist die Länge des Bentonit-Dichtelementes genauso groß wie die des Aufsättigungselementes. Der Hintergrund ist der, dass bei diesem Längenverhältnis das kombinierte Bentonit-Dichtelement in der Lage ist, die im Aufsättigungselement bereitgestellte Flüssigkeitsmenge vollständig aufzunehmen und damit eine annähernde Vollsättigung erreichbar ist. Die diesbezüglichen Längen wurden durch Prozessanalysen ermittelt (Burlaka & Hassanzadegan 2021).

Die Aufsättigungskammer besteht aus Schotter (Ausbruchsmaterial) mit einer hohen Porosität und damit Speicherfähigkeit für Flüssigkeit. Diese kann durch Schlauchöffnungen im Firstbereich des angrenzenden Widerlagers nach dessen Errichtung mit Flüssigkeit gefüllt werden. Durch diesen direkten Kontakt mit einer hinreichenden Menge an Flüssigkeit beginnt die kapillar-getriebene Aufsättigung des Bentonits unmittelbar und auch gleichmäßig über die gesamte Querschnittsfläche. Dadurch entsteht eine sich langsam ausdehnende gesättigte Zone im Bentonit, die sich durch den Quellprozess an die Streckenkontur presst und gleichzeitig einen Druck in Richtung Asphaltelement aufbaut. Da der Quellprozess auch

gleichzeitig die Permeabilität signifikant reduziert, entfaltet diese Zone auch unmittelbar nach Einbau und Flüssigkeitszufuhr eine Dichtwirkung. Da dem Asphalt ebenfalls eine unmittelbare Dichtwirkung zugeordnet werden kann, entspricht dies im Prinzip einer diversitären Redundanz zwischen Asphaltelement und dem Bentonitelement, zumindest für die Funktionsdauer des Asphalt-Dichtelementes.

Für die Filterschichten ist ein lagenweiser Einbau von granularem Material mit unterschiedlichen Korngrößen vorzusehen.

Für die Widerlager soll als Material ein Niedrig-pH-Beton verwendet werden. Die Errichtung sollte unter keilförmiger Verankerung im Gebirge erfolgen. Die notwendige mechanische Lastaufnahme ist durch Auslegung gegen den zu erwartenden hydromechanischen Druck aus der jeweiligen Strecke bzw. den anliegenden Dichtelementen zu ermitteln und die Widerlagerkapazität entsprechend zu bemessen. Eine Designanforderung ergibt sich aus dem Kriterium, dass die quellbedingte Verformung des anliegenden Bentonit-Dichtelementes möglichst nicht größer als 3 % seiner Länge sein sollte, um das geforderte Leistungsziel hinsichtlich der Permeabilität zu erreichen (Wagner 2005). Dies muss bei der Bemessung der Abdichtmodule (z. B. ausreichende Länge) und ihrer Positionierung berücksichtigt werden. An dieser Stelle sei angemerkt, dass der Grenzwert für einen Ca-Bentonit ermittelt wurde. Da Ca-Bentonit als Referenzmaterial gewählt wurde, kann dieser Wert für das Verschlusskonzept angesetzt werden. Bei Verwendung anderer Bentonite sollte dieser Grenzwert überprüft werden.

3.4 Geotechnische Verschlussbauwerke außerhalb der ewG

Bei den in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Verschlüssen handelt es sich um solche, die innerhalb einer einzelnen ewG-Zelle angeordnet sind. Darüber hinaus sind Verschlussbauwerke geplant, die Bereiche des Grubengebäudes betreffen, in denen hydraulisch wirksame Klüfte angetroffen wurden. Komplettiert wird das Verschlusskonzept durch Abdichtbauwerke innerhalb der Tageszugänge.

Mit Blick auf den Sicherheitsnachweis wird zwischen „Sicherheitsfunktionen“ und „Schutzfunktionen“ unterschieden. Den Verschlussbauwerken, die innerhalb einer ewG-Zelle angeordnet sind, werden Sicherheitsfunktionen bzw. spezifische Sicherheitsfunktionen zugewiesen. Diese Verschlussbauwerke sind relevant für den Integritätsnachweis und für die radiologische Langzeitaussage im Zuge des Sicherheitsnachweises für die ewG. Bauwerken, die außerhalb einer ewG-Zelle liegen, werden Schutzfunktionen zugewiesen. Ihre Aufgabe besteht in erster Linie darin, die Lastentwicklung auf das untertägige Barrierensystem, vor allem bei Streckenverschlüssen in den ewG, kontrolliert ablaufen zu lassen.

3.4.1 Verschlüsse im Bereich von hydraulisch wirksamen Klüften

Die Verfüllung des sich an die ewG abdichtenden Streckenverschlüsse anschließenden Streckensystems inklusive eines Infrastrukturbereiches erfolgt unter Verwendung von aufbereitem Ausbruchsmaterial. Eine Zugabe von Bentonit ist in diesen Bereichen nicht notwendig. Eine Ausnahme bilden durchhörterte Klüfte mit signifikanter hydraulischer Wirksamkeit. Diese werden mit speziellen Verschlussmodulen versehen. Ein Beispiel für einen solchen Verschluss ist in Abb. 3.15 gezeigt.

Das Prinzip gleicht dem der kombinierten Asphalt-Bentonit-Module in dem Konzept des Streckenverschlusses (innerhalb eines ewG), nur, dass in diesem Fall die Wasserzufuhr zu dem

Schotterelement aus der Kluft erfolgt und nicht künstlich gewährleistet werden muss. Der Vorteil dieser Art der Abdichtung liegt darin, dass das Strömungs- und Druckniveau innerhalb der Kluftzone nicht durch direkte Abdichtungen gestört wird und es zu keinen induzierten Druckumlagerungen in der Umgebung kommt. Die Dichtelemente zu beiden Seiten verhindern erosive Prozesse im Versatzmaterial. Die angegebene Dimensionierung ist zunächst als Arbeitshypothese zu verstehen. Eine Konkretisierung erfolgt im Zuge der Auslegung.

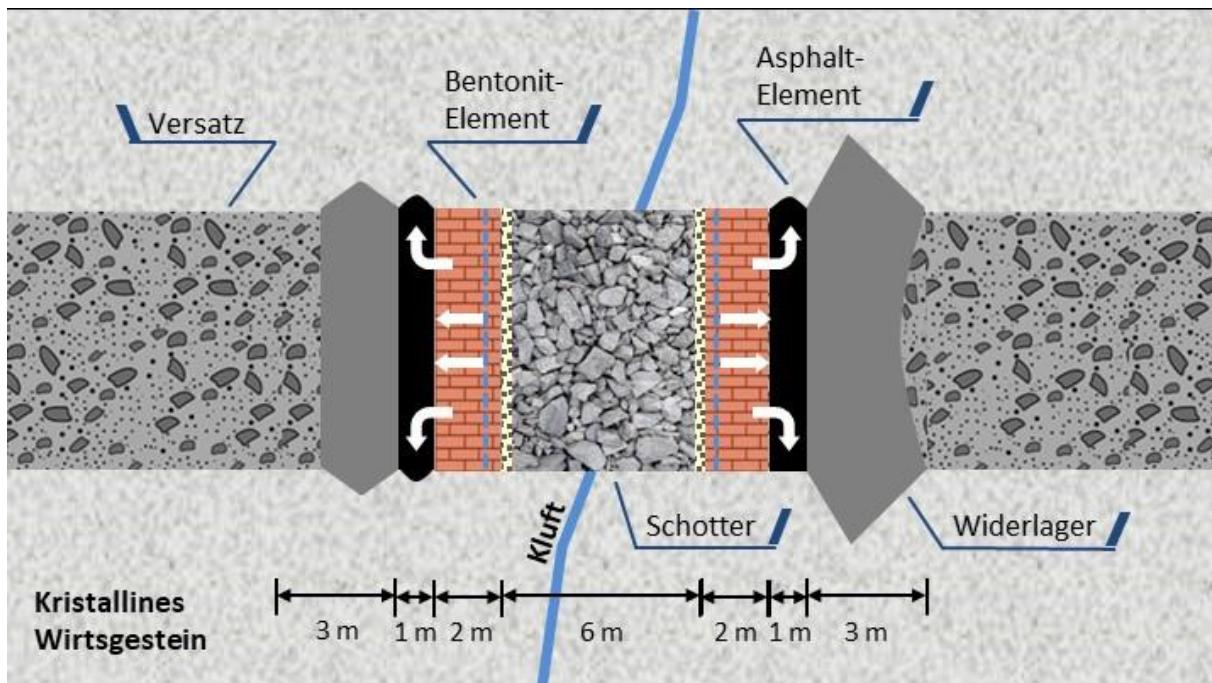


Abb. 3.15: Beispielkonzept für einen Verschluss im Bereich von hydraulisch wirksamen Störungen

Die Schutzfunktion für Kluftverschlüsse wird definiert als:

Schutzfunktion: *Der Kluftverschluss soll erosive Fluidbewegungen in den versetzten Strecken minimieren.*

Die spezifische Funktion der Bentonit-Dichtelemente ist die Minimierung druckgetriebener Fluidbewegung innerhalb der Zugangsstrecken. Die spezifische Funktion der Asphalt-Dichtelemente ist analog, nur mit dem Unterschied, dass ihre Funktionsdauer deutlich geringer ist. Sie sollen druckgetriebene Fluidbewegung innerhalb der jeweiligen Zugangsstrecke solange minimieren, bis die angeschlossenen Bentonitdichtungen ihre volle Dichtwirkung erreicht haben. Asphalt hat gegenüber Bentonit den Vorteil, dass nach dem Einbau eine sofortige Abdichtwirkung erreicht wird, während Bentonitelemente eine lange Zeit benötigen, um ihre volle Dichtwirkung zu entfalten. Mit der begrenzten Funktionsdauer der Asphaltelemente wird der Tatsache Rechnung getragen, dass aufgrund von Degradationseffekten, vornehmlich durch mikrobielle Aktivitäten, die Funktionsdauer von 1 Million Jahre schwer nachweisbar ist.

Die spezifische Funktion der Aufsättigungskammern liegt darin, dass aus der Kluft einströmende Fluid aufzunehmen und für die Aufsättigung der über Filterschichten angeschlossenen Bentonitelemente bereitzustellen. Die Filterschichten dienen der Minimierung von Erosionsscheinungen an den Bentonitelementen, speziell zur Vermeidung der Ausbildung lokaler Fließ-

kanäle (Pipes). Die Funktion der Widerlager besteht darin, die Lagestabilität sowohl der Dichtelemente als auch des Versatzes zu gewährleisten, so dass sich der jeweils gewünschte Quelldruck einstellen kann. Die damit verbundenen Leistungsziele werden wie folgt festgelegt:

Bentonit-Dichtelemente

Leistungsziel: *Die Bentonit-Elemente sollen nach erfolgter Aufsättigung mit Lösung eine integrale Permeabilität erreichen, die folgende Ungleichung erfüllt: $k \leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$.*

Asphalt-Dichtelement

Leistungsziel: *Das Asphalt-Element soll eine integrale Permeabilität erreichen, die folgende Ungleichung erfüllt: $k \leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$*

Aufsättigungskammern

Leistungsziel: *Die Aufsättigungskammer soll einen geeigneten Porenraum besitzen, um ausreichend Lösung aufnehmen und zur Aufsättigung der Bentonit-Elemente bereitstellen zu können. Porosität >25 %.*

Filterschichten

Leistungsziel: *Die Filterschichten sollen einen geeigneten Porositätsgradienten zwischen dem Material in der Aufsättigungskammer und dem Bentonitmaterial besitzen.*

Widerlager

Leistungsziel: *Das Widerlager soll auch bei erfolgter Quelldruckentwicklung des Bentonit-Elementes seine Position derart wahren, dass folgende Ungleichung für das Bentonit-Element erfüllt ist: $\Delta L/L \leq 3\%$*

Nach Fertigstellung des vollständigen Verschlusssystems sind diese Arbeitshypothesen durch Prozessanalysen zu verifizieren und die Leistungsziele ggf. anzupassen.

Designanforderungen:

Damit die eben aufgeführten Leistungsziele für die einzelnen Funktionselemente erreicht werden können, werden für diese Elemente Designanforderungen erstellt. Für die Bentonit-Elemente werden hochkompaktierte quaderförmige Blöcke hergestellt (vgl. Abb. 3.14). Nach Einbringung einer jeden Lage der quaderförmigen Blöcke wird eine dünne Schicht aus feinem Bentonitgranulat eingebracht, das dazu dient, die verbleibenden Resthohlräume zu verschließen. Durch den Kontakt mit dem Gebirge wird eine kapillare Wasseraufnahme aus dem umgebenden Gestein initiiert. Die integrale Einbautrockendichte, also kompaktierte Blöcke und Bentonitgranulat zusammen betrachtet, sollte bei $\rho \geq 1.500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ liegen. Nach erfolgter Aufsättigung mit Lösung kann damit ein Quelldruck von etwa $p_q = 0,3 \text{ MPa}$ erreicht werden. Auch diese Werte sind als Arbeitshypothese zu verstehen und entsprechend zu verifizieren. Inwieweit ein Nachschnitt der Kontur erforderlich ist, muss vor Ort anhand des Zustandes der ALZ geprüft und entschieden werden.

Für die Asphalt-Elemente sollte ein Kalteinbau in Blockform vorgesehen werden. Eine Monolithisierung erfolgt zum einen durch den Druck der Blöcke selbst, also das Eigengewicht, und zum anderen durch den Druckaufbau während des Quellprozesses im Bentonit-Element. Inwieweit ein Nachschnitt der Kontur erforderlich ist, muss vor Ort anhand des Zustandes der ALZ geprüft und entschieden werden.

Für die Filterschichten ist ein lagenweiser Einbau von granularem Material mit unterschiedlichen Korngrößen vorzusehen.

Für die Widerlager soll als Material ein Niedrig-pH-Beton verwendet werden. Die Errichtung sollte unter keilförmiger Verankerung im Gebirge erfolgen. Die notwendige mechanische Lastaufnahme ist durch Auslegung gegen den zu erwartenden hydromechanischen Druck aus der jeweiligen Strecke bzw. den anliegenden Dichtelementen zu ermitteln und die Widerlagerkapazität entsprechend zu bemessen.

3.4.2 Schachtverschluss

Eine Option für Tageszugänge stellen Schächte dar. Diese sind nach Verschluss des untertägigen Grubengebäudes bis zur Tagesoberfläche zu verfüllen. Bei der Endlageroption vom Typ „multipler ewG“ befinden sich die Tageszugänge und damit auch eventuelle Schächte nicht innerhalb einzelner ewG.

Tagesschächte sind nach Abschluss ihrer Verwendung vollständig zu verfüllen. Dies ist eine Forderung des Bundesberggesetzes (BBergG 2021). Der Schachtverschluss dient unter anderem dazu, eventuell vorhandene Grundwasserstockwerke voneinander zu trennen, die ansonsten über den Schacht miteinander kurzgeschlossen wären. Dies ist eine bergrechtliche Auflage (OCZ 1996), die aber in erster Linie auf Aquifere innerhalb sedimentärer Formationen ausgerichtet ist. Sinngemäß wird diese Auflage hier auch auf Kluftzonen im kristallinen Gebirge angewendet, die in unterschiedlichen Teufenlagen angefahren wurden.

Die wesentliche Aufgabe eines Schachtverschlusses besteht darin, Störungen des hydrochemischen Milieus im Einlagerungshorizont zu vermeiden. Das heißt, der Verschluss soll gewährleisten, dass kein Zustrom von meteorischen Wässern bzw. Wässern mit abweichender Lösungszusammensetzung aus höheren Grundwasserstockwerken in den Einlagerungshorizont erfolgt. Die Schutzfunktion für den Schachtverschluss lautet demnach:

Schutzfunktion: *Der Schachtverschluss soll sowohl das Eindringen von Lösungen aus dem Deckgebirge als auch das Ausströmen aus dem Wirtsgestein in das Deckgebirge minimieren. Daneben soll er hydraulische Kurzschlüsse zwischen ggf. angeschlossenen Kluftaquiferen in unterschiedlichen Tiefen minimieren.*

Entsprechend sind verschiedenen Dichtelementen bzw. Dichtelementkombinationen mit entsprechenden spezifischen Funktionen im Konzept enthalten. Im Bereich hydraulisch aktiver Kluftzonen ist eine Dichtelementkombination aus Bentonit, Asphalt und nochmals Bentonit vorgesehen (Abb. 3.16). Das untere Bentonitelement ruht auf einer Schottersäule, die als granulares Material eingebracht und lagenweise verdichtet wird. Die Schottersäule wird sich im Laufe der Zeit mit Wasser füllen und den Bentonit erreichen, so dass dieser nicht nur über die seitliche Kontur, sondern auch über die untere Stirnseite mit dem Quellprozess beginnt. Das obere Bentonitelement ist unterhalb der hydraulisch wirksamen Kluft angeordnet und wird so, über eine Filterschicht, von dem Kluftwasser angeströmt und beginnt mit dem Quellprozess.

Zwischen beiden Bentonitelementen liegt eine dünne Asphaltsschicht. Diese wird durch den Quellprozess des Bentonits zusammengedrückt und wirkt so als Quetschdichtung gegenüber der Schachtkontur. Diese Dichtelementkombination minimiert zum einen das Einströmen von Wasser aus höheren Grundwasserbereichen und zum anderen wird dadurch eine Trennung von wasserführenden Bereichen hergestellt, die ggf. ein unterschiedliches hydrochemisches Milieu aufweisen. Zwischen welchen wasserführenden Klüften ein solches "Trennmodul" sinnvoll einzusetzen ist, wird die Standorterkundung zeigen.

Unterhalb des letzten (untersten) Bereiches mit signifikanter Lösungszufuhr aus dem Gebirge wird eine Bitumen-verfüllte Schottersäule implementiert. Ihre Aufgabe ist es, vor allem in der frühen Nachverschlussphase, wenn die Ton-basierten Dichtelemente noch nicht vollständig wassergesättigt sind, ein Eindringen von Wässern mit unterschiedlicher Lösungszusammensetzung in das Streckensystem zu minimieren. Sollten allerdings entsprechende Lösungen bereits an anderen Stellen, z. B. durch Anfahrung von Klüften (vgl. Kluftverschlüsse) innerhalb des Versatzes migrieren, so kann auf dieses Dichtelement ggf. verzichtet werden.

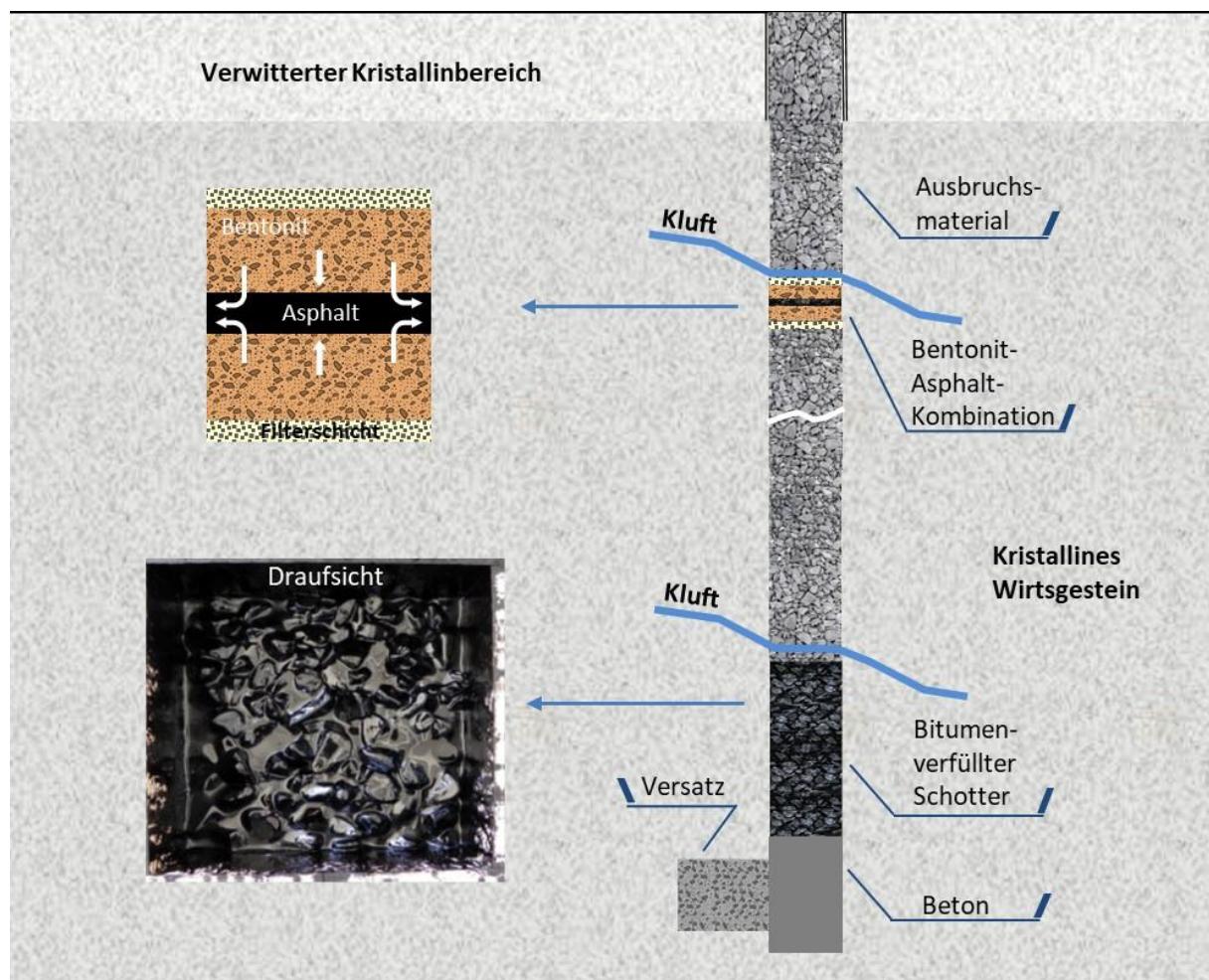


Abb. 3.16: Prinzipielles Verschlusskonzept für einen Schacht (Foto aus Glaubach et al. 2016)

Der übrige Teil des Schachtes wird mit schotterförmig aufbereitetem Ausbruchsmaterial verfüllt. Der untere Teil des Schachtes wird mit einem Betonsockel versehen, der als Auflager für die darüber angeordnete Bitumen-verfüllte Schottersäule dient. Da aus langzeitlicher Sicht da-

mit gerechnet werden muss, dass die Zementphasen des Betons korrodieren, wird es anschließend, bis zu einem gewissen Grad, zu einer Kompaktion des Betonsockels kommen. Aus diesem Grund wird der Betonsockel auch ein Stück weit über das Füllort hinaus in den Schacht eingebracht. Dadurch wird gewährleistet, dass es auch nach Kompaktion nicht zu einem Eindringen des darüber gelagerten Bitumens in den Versatz innerhalb des Füllortes kommt. Das Bitumen ist gefüllert, d. h., es wird ein Zuschlagstoff in einer Korngröße verwendet, der ein Eindringen in gering poröse Medien verhindert. Eine entsprechende Dimensionierung ist im Zuge der Auslegung des Schachtverschlusses zu erarbeiten.

Wird, wie oben angedeutet, optional auf eine Bitumen-verfüllte Schottersäule verzichtet, so kann stattdessen die Dichtheit des Betonsockels erhöht werden (vgl. Kapitel 2.3.3). Dieser wirkt somit als Strömungswiderstand und verhindert einerseits eine Erosion des Versatzes und verschafft andererseits den Abdichtbauwerken im Streckensystem und vor allem in den ewG ausreichend Zeit, um ihre volle Dichtwirkung zu erreichen. Haben diese Abdichtbauwerke ihre volle Dichtwirkung erreicht, endet die Funktionsdauer des Betonsockels.

Da für den Betonsockel der Einsatz von Zement als Bindemittel anzunehmen ist, muss davon ausgegangen werden, dass es für lange Zeiträume durch den Kontakt mit der Gebirgslösung zu einer Korrosion der Zementphase kommt. Durch die Korrosion verringert sich zwar die Festigkeit des Betons, es ist aber nicht zwingend mit einer signifikanten Volumenabnahme des Betonkörpers zu rechnen. Die entstehenden Korrosionsprodukte haben oft sogar ein größeres Volumen, so dass auch eine Volumenzunahme nicht ausgeschlossen ist. Allerdings wird unter der kompaktierenden Auflast der darüber liegenden Elemente der Betonkörper komprimiert und seine Porosität verringert. In diesem Zusammenhang wäre der Einsatz von Schotterbeton zu favorisieren, da das Schottergerüst eine Setzungsarmut impliziert, die nur eine geringfügige Kompaktion zulässt. Alternativ zu dem Betonsockel kann auch die setzungsarme Bitumen-verfüllte Schottersäule bis zu Schachtboden verlängert werden. Allerdings muss dann gewährleistet werden, dass ein Auslaufen des Bitumens in das Füllort vermieden wird. Der Einsatz eines Betonsockels wird an dieser Stelle favorisiert.

Die spezifische Funktion von Bentonit-Asphalt-Dichtelementkombinationen, die unterhalb hydraulisch wirksamer Kluftzonen implementiert werden, ist zu verhindern, dass es zu hydraulischen Kurzschrüssen zwischen in unterschiedlichen Tiefen angefahrenen Kluftaquiferen kommt. Das Asphalt-Element übernimmt dabei die sofortige Dichtwirkung, während die Bentonit-Elemente, die erst nach Aufsättigung ihre volle Dichtwirkung erreichen, die Langzeitabdichtung übernehmen. Die bitumenverfüllte Schottersäule soll das Eindringen von Lösungen aus hydraulisch wirksamen Klüften bzw. aus dem Deckgebirge in das Grubengebäude minimieren, damit dort das hydrochemische Milieu möglichst wenig gestört wird. Die damit verbundenen Leistungsziele werden für die einzelnen Komponenten wie folgt definiert:

Bentonit-Dichtelemente

Leistungsziel: *Die Bentonit-Elemente sollen nach erfolgter Aufsättigung mit Lösung eine integrale Permeabilität erreichen, die folgende Ungleichung erfüllt: $k \leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$*

Asphalt-Dichtelement

Leistungsziel: *Das Asphalt-Element soll eine integrale Permeabilität erreichen, die folgende Ungleichung erfüllt: $k \leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$*

Filterschichten

Leistungsziel: *Die Filterschichten sollen einen geeigneten Porositätsgradienten zwischen dem Versatzmaterial und dem Bentonitmaterial besitzen.*

Schottersäule aus aufbereitetem Ausbruchsmaterial

Leistungsziel: *Die Schottersäule soll auch bei erfolgter Quelldruckentwicklung der Bentonit-Elemente setzungsarm sein, so dass folgende Ungleichung für das Bentonit-Element erfüllt ist: $\Delta L/L \leq 3\%$*

Bitumen-verfüllte Schottersäule

Leistungsziel: *Die Bitumen-verfüllte Schottersäule soll eine Permeabilität erreichen, die folgende Ungleichung erfüllt: $k \leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$*

Betonsockel

Leistungsziel: *Der Betonsockel soll im Bewertungszeitraum setzungsarm sein.*

Nach Fertigstellung des vollständigen Verschlusssystems sind diese Arbeitshypothesen durch Prozessanalysen zu verifizieren und die Leistungsziele ggf. anzupassen.

Designanforderungen:

Damit die eben aufgeführten Leistungsziele für die einzelnen Funktionselemente erreicht werden können, werden für diese Elemente Designanforderungen erstellt. Für die Implementierung der Bentonit-Element wird ein binäres Gemisch vorgeschlagen, dass in-situ während des Einbaus verdichtet wird. Material und Verfahren wurden bereits in früheren in-situ Versuchen erfolgreich getestet (Breidung 2002). Für das Referenzmaterial Ca-Bentonit (vgl. Kap. 2.3.1) wird als Arbeitshypothese davon ausgegangen, dass die Einbautrockendichte bei $\rho \geq 1.500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ liegen sollte, um nach Aufsättigung mit wässriger Lösung einen Quelldruck von 0,3 MPa zu erreichen. Je nach verwendeter Bentonitsorte ist dieser Wert zu prüfen und ggf. anzupassen. Inwieweit ein Nachschnitt der Kontur erforderlich ist, muss vor Ort anhand des Zustandes der ALZ geprüft und entschieden werden.

Für Asphalt-Elemente wird ein Kalteinbau in Blockform vorgeschlagen. Die Monolithisierung erfolgt zum einen durch den Druck der Blöcke selbst, also ihr Eigengewicht, und zum anderen durch den Druckaufbau während des Quellprozesses im Bentonit-Element. Inwieweit ein Nachschnitt der Kontur erforderlich ist, muss vor Ort anhand des Zustandes der ALZ geprüft und entschieden werden.

Für die Filterschichten ist ein lagenweiser Einbau von granularem Material mit unterschiedlichen Korngrößen vorzusehen.

Die Errichtung der Bitumen-verfüllten Schottersäule sollte in Lagen von etwa 50 cm erfolgen, um sicherzustellen, dass alle Hohlräume innerhalb des Schotters von dem heißen Bitumen erreicht und ausgefüllt werden, bevor dieses zu kalt und damit zu zähflüssig/viskos wird. Ggf. sollte eine Mischung aus Schotter und Bitumen hergestellt und gemeinsam verschüttet werden.

Für den Betonsockel soll als Material ein Niedrig-pH-Beton verwendet werden.

3.4.3 Rampenverschluss

Als Alternative zu Schächten kommen Rampen als Tageszugänge in Betracht (Abb. 3.17 links). Da es sich bei einer Rampe prinzipiell um eine geneigte Strecke handelt, wird diese analog zu den Strecken außerhalb der ewG mit aufbereitetem Ausbruchsmaterial verfüllt. An den Stellen der Rampe, an denen signifikant hydraulisch wirksam Klüfte durchfahren wurden, werden, analog zu den Schachtverschlüssen, sogenannte „Trennmodule“ implementiert. Diese bestehen aus einer Kombination von Asphalt und Ausbruchsmaterial-Bentonit-Gemisch in Verbindung mit Filterschichten. Das Ausbruchsmaterial-Bentonit-Gemisch entspricht dem Versatz in den Strecken innerhalb der ewG.

Das untere Bentonit-Versatzgemisch eines solchen Trennmoduls ruht auf dem einfachen Streckenversatz. Letzterer wird sich im Laufe der Zeit mit Wasser füllen und das Bentonit-Versatzgemisch erreichen, so dass dieses nicht nur über die seitliche Kontur, sondern auch über die untere Stirnseite mit dem Quellprozess beginnt. Der einfache, mit Wasser gefüllte, Versatz dient dabei auch als Widerlager, so dass eine quellbedingte Ausdehnung des Bentonit-Versatzgemisches weitestgehend unterbunden wird. Die am Übergang vorgesehenen Filterschichten verhindern eine Erosion des Bentonit-Versatzgemisches. Das obere Bentonit-Versatzgemisch eines Trennmoduls ist unterhalb einer angenommenen hydraulisch wirksamen Kluft angeordnet und wird so, ebenfalls über Filterschichten, von dem Kluftwasser angeströmt was den Quellprozess auslöst. Auch hier haben die Filterschichten die Funktion, eine Erosion des Bentonit-Versatzgemisches zu verhindern.

Zwischen beiden Bentonit-Versatzgemischen liegt eine geringmächtige Asphaltsschicht. Diese wird durch den Quellprozess des Bentonit zusammengedrückt und wirkt so als Quetschdichtung gegenüber der Schachtkontur (Abb. 3.17 rechts). Als Funktionszeitraum für diese Asphaltidichtung wird der Zeitraum angesetzt, den das Bentonit-Versatzgemisch benötigt, um nach vollständiger Aufsättigung den gewünschten Quelldruck und letztlich seine vollständige Abdichtwirkung zu entfalten.

Die wesentliche Aufgabe dieser Dichtelement-Kombination ist es, das Einströmen von Wässern aus höheren Grundwasserstockwerken in Richtung der einzelnen ewG und damit der Einlagerungsbereiche zu minimieren. Dadurch wird gewährleistet, dass das hydrochemische Milieu in den ewG, speziell im Bereich der Verschlussbauwerke der ewG, nur geringen Schwankungen unterliegt. Hydrochemische Korrosionseffekte an den Barrieren werden somit minimiert. Zum anderen wird durch die Dichtelementkombination eine Trennung von wasserführenden Stockwerken bzw. Kluft-Clustern hergestellt, die ggf. auch ein unterschiedliches hydrochemisches Milieu aufweisen. Zwischen welchen wasserführenden Kluftbereichen ein solches Trennmodul sinnvoll einzusetzen ist, wird die Standorterkundung zeigen. Im oberen Bereich der Rampe, der innerhalb des verwitterten Kristallingesteins liegt, wird auf eine Aufbereitung des Versatzes bzw. eine bestimmte Korngrößenverteilung verzichtet. Die Leistungsziele für die einzelnen Komponenten werden wie folgt festgelegt:

Bentonit-Versatz-Dichtelemente

Leistungsziel: *Die Bentonit-Versatz-Dichtelemente sollen nach erfolgter Aufsättigung mit Lösung eine integrale Permeabilität erreichen, die folgende Ungleichung erfüllt: $k \leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$*

Asphalt-Dichtelement

Leistungsziel: Das Asphalt-Dichtelement soll eine integrale Permeabilität erreichen, die folgende Ungleichung erfüllt: $k \leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$

Filterschichten

Leistungsziel: Die Filterschichten sollen einen geeigneten Porositätsgradienten zwischen dem Versatzmaterial und dem Bentonit-Versatz-Gemisch besitzen.

Versatz aus aufbereitetem Ausbruchsmaterial

Leistungsziel: Der schotterförmig aufbereitete Versatz soll auch bei erfolgter Quelldruckentwicklung der Bentonit-Dichtelemente eine geringe Setzungsneigung bzw. eine so geringe Kompaktion besitzen, so dass folgende Ungleichung für das Bentonit-Versatz-Element erfüllt ist: $\Delta L/L \leq 3\%$

Nach Fertigstellung des vollständigen Verschlussystems sind diese Arbeitshypothesen durch Prozessanalysen zu verifizieren und die Leistungsziele ggf. anzupassen.

Designanforderungen:

Damit die eben aufgeführten Leistungsziele für die einzelnen Funktionselemente erreicht werden können, werden für diese Elemente Designanforderungen erstellt. Für die Implementierung der Bentonit-Versatz-Elemente wird ein Mischungsverhältnis von 70/30 aufbereitetes Ausbruchsmaterial/Bentonit vorgeschlagen, wobei in-situ während des Einbaus, sofern möglich, noch eine Verdichtung erfolgen soll. Bei diesem Mischungsverhältnis wurden Permeabilitäten von 10^{-17} bis 10^{-18} m^2 gemessen (Pusch1998). Das genaue Verhältnis muss im Zuge der Auslegungsplanung festgelegt werden. Die Bildung eines tragfähigen Gemisches kann durch Verwendung eines setzungsarmen Schottergerüstes innerhalb der Versatzmischung erreicht werden, wofür das Ausbruchsmaterial entsprechend aufbereitet werden muss.

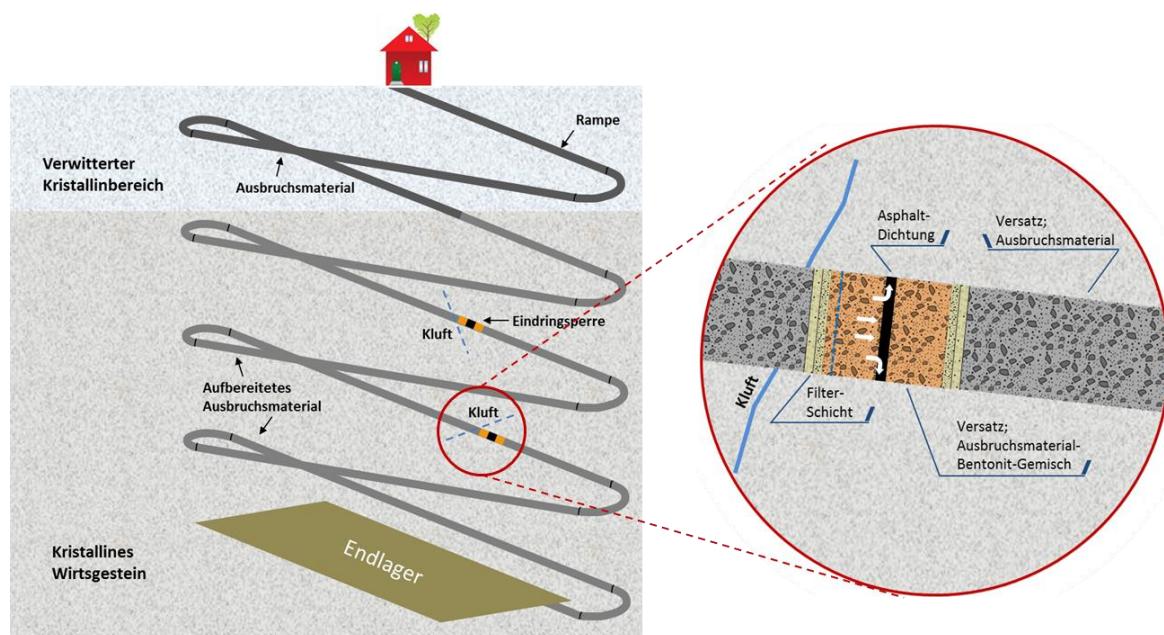


Abb. 3.17: Prinzipielles Verschlusskonzept für eine Rampe

Für das Versatzmaterial wird als Arbeitshypothese ein Mischungsverhältnis von 70/30 (aufbereitetes Ausbruchsmaterial / Bentonit) angenommen. Bei diesem Mischungsverhältnis wurden für den Bentonit vom Typ MX-80 Permeabilitäten von 10^{-17} bis 10^{-18} m² gemessen (Pusch1998). Welche Permeabilitäten mit einem Ca-Bentonit erreicht werden können, verbleibt noch zu prüfen. Der Versatz soll nach Abschluss der Aufsättigung mit Lösung einen Quelldruck von $p_q > 0,1$ MPa entwickeln. Dieser Wert entstammt Untersuchungsergebnissen von Posiva und SKB, die besagen, dass oberhalb eines Quelldruckes von 0,1 MPa auch eventuell vorhandene Kanalbildungen (Piping), die sich während der Aufsättigung gebildet haben könnten, wieder versiegelt werden (Posiva & SKB 2017). Das genaue Verhältnis muss im Zuge der Auslegungsplanung festgelegt werden. Eine optimale Korngrößenverteilung ist durch entsprechende Untersuchungen zu bestimmen. Wichtig ist in dem Zusammenhang, dass der Bentonitanteil nicht aus dem Korngerüst ausgespült wird. Die Bildung eines tragfähigen Gerüstes kann durch Verwendung eines setzungssarmen Schottergerüstes innerhalb der Versatzmischung erreicht werden. Das Ausbruchsmaterial sollte dementsprechend schotterförmig aufbereitet werden.

Für Asphalt-Elemente wird ein Kalteinbau in Blockform vorgesehen. Die Monolithisierung erfolgt zum einen durch den Druck der Blöcke selbst, also ihr Eigengewicht, und zum anderen durch den Druckaufbau während des Quellprozesses im Bentonit-Element. Inwieweit ein Nachschnitt der Kontur erforderlich ist, muss vor Ort anhand des Zustandes der ALZ geprüft und entschieden werden.

Für die Filterschichten ist ein lagenweiser Einbau von granularem Material mit unterschiedlichen Korngrößen vorgesehen.

3.5 Tabellarischer Überblick

In der nachfolgenden Tab. 3.1 sowie der Tab. 3.2 wird ein Überblick gegeben über die einzelnen Komponenten des Verschlussystems und die ihnen jeweils zugeordneten Sicherheits- bzw. Schutzfunktionen. Damit diese Sicherheits- und Schutzfunktionen von den einzelnen Komponenten auch übernommen werden können, müssen jeder Komponente bestimmte Leistungsziele zugeordnet werden. Diese sind in Form von Parametern in der Grafik und der Tabelle mit aufgeführt.

Die für die einzelnen Parameter angegebenen Zahlenwerte sind als Arbeitshypothesen zu verstehen, die im Zuge der Integritätsanalysen zu konkretisieren sind. Diese Leistungsziele wiederum können nur erreicht werden, wenn an die Konstruktion der jeweiligen Komponenten spezifische Anforderungen formuliert werden, die unter Einhaltung einer Qualitätssicherung im Zuge der Konstruktion umgesetzt werden. Diese Designanforderungen sind ebenfalls in Tab. 3.2 angegeben.

Tab. 3.1: Überblick über die Elemente des Verschlusskonzeptes sowie deren Sicherheits- und Schutzfunktionen und die zugehörigen Leistungsziele (DE=Dichtelement, WL=Widerlager, SF=Sicherheitsfunktion)

Komponente diversitär redundant	Wesentliche Barrieren						Weitere Barrieren			
	ewG-Zelle	Innerhalb des ewG			Außerhalb des ewG					
		Behälter	Bohrloch-verschluss	Versatz	Strecken-verschluss	Wirts-gestein	Versatz	Kluft-verschluss	Schacht-/Rampen-verschluss	
<i>Sicherheitsfunktion oder Schutzfunktion</i>	Einschluss der Radionuklide	Einschluss der Radionuklide im Bewertungszeitraum	Minimierung von Fluidbewegung in Einlagerungsbohrlöchern	Minimierung von Fluidbewegung in Strecken	Minimierung von Fluidbewegung in Strecken	Erschwerung für menschliches Eindringen	ALZ-Stabilisierung;	Minimierung erosiver Fluidbewegung in den Strecken	Minimierung des Eindringens von Lösungen aus dem Deckgebirge; Vermeidung von Aquifer-Kurzschläüssen	
Funktionselement	Wirts-gestein	Kupfer-hülle	Stahl-behälter	DE / WL		DE / WL				
<i>Spezifische Funktion</i>	Einschluss der Radionuklide	Einschluss der Radionuklide	Trag-funktion; Mechanischer Schutz	Minimierung von Fluidbewegung / Gewähr-leistung der Lagesetabilität	Unterstützung der Widerlager in den Einlagerungsbohrlöchern	Minimierung von Fluidbewegung / Gewähr-leistung der Lagesetabilität	Gewähr-leistung stabiles Grubengebäude	Kraft-schluss zum Gebirge		
<i>Leistungsziele</i>	Keine Integritäts-verletzung	Korrosions-resistenz (1 Mill. a) Mechanisch handhabbar bis 500 Jahre	Permeabilität $\leq 5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ / Volumenaus-dehnung $\leq 3\%$ der Länge der Bentonit-dichtung	Permeabilität $\leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ Kraftschluss zum Gebirge	Permeabilität $\leq 1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ / Volumenaus-dehnung $\leq 3\%$ der Länge der Bentonitdichtung			Permeabilität $\leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	Gering permeabel Lagesstabil unter den regionalen hydraulischen Lasten	
<p style="text-align: right;"><i>Bei den Zahlenwerten handelt es sich um Arbeitshypothesen, die durch Analysen zu verifizieren sind</i></p>										

Tab. 3.2: Überblick über Sicherheitsfunktionen, Schutzfunktionen und Leistungsziele der Verschlusskomponenten innerhalb (rot) und außerhalb (blau) eines ewG.

Komponente	Sicherheitsfunktion	Leistungsziele	Designanforderung
Behälter	<i>Einschluss der Radionuklide im gesamten Bewertungszeitraum von 1 Million Jahre</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziele	Designanforderung
Stahlbehälter	Tragfunktion. Schutz des Abfallinventars gegenüber mechanischen Lasten (Umgebungsdruck ggf. asymmetrisch, Scherbeanspruchung). Gewährleistung der Unterkritikalität (innere Struktur des Behälters).	Hohe mechanische Festigkeit. Geringes Deformationsvermögen. Geringe korrosive Gasbildungsrate. Mechanisch handhabbar über den Bergungszeitraum von 500 Jahren.	Stahlsorte und Wandstärken sind gegen die zu erwartenden mechanischen Lasten im Bewertungszeitraum auszulegen.
Kupferhülle	Einschluss der Radionuklide im gesamten Bewertungszeitraum von 1 Million Jahre. (impliziert die Sicherheitsanforderung: Einschluss radioaktiver Aerosole über den Bergungszeitraum v. 500 Jahren).	Hinreichende Korrosionsbeständigkeit für 1 Million Jahre unter den lokalen hydrochemischen und mikrobiellen Verhältnissen.	Verwendung von geschmiedetem Kupfer. Qualitätsgesichertes Schweißen der Nähte für den Deckel. Ausreichende Dicke des Kupfermantels zur Korrosionsresistenz im Bewertungszeitraum (Dicke = 5 mm).

ewG	<i>Einschluss der Radionuklide im gesamten Bewertungszeitraum von 1 Million Jahre</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziele	Designanforderung
Wirtsgestein	Einschluss der Radionuklide im Bewertungszeitraum.	Keine Verletzung der Integrität im Bewertungszeitraum.	Festlegung der ewG-Grenzen so, dass keine hydraulisch sign. wirksamen Klüfte innerhalb des ewG sind.
Bohrlochverschluss	<i>Minimierung druckgetriebener Fluidbewegung innerhalb des Bohrloches</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziele	Designanforderung
Bentonit-Dichtelement	Minimierung druckgetriebener Fluidbewegung innerhalb des Bohrloches.	Permeabilität $\leq 5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$	Mittlere Einbautrockendichte des Bentonit-Elementes $\geq 1.650 \text{ kg m}^{-3}$. Quelldruck $\geq 1,1 \text{ MPa}$. Vorkompaktierte zylindrische Blöcke mit Bentonitgranulat als Füllmaterial für technisch bedingte Resthohlräume.
Widerlager	Gewährleistung der Lagestabilität des Bentonit-Elementes. Gewährleistung, dass bei der gewünschten Quellentwicklung des Dichtelementes dieses sich nicht auflockert, sondern dass sein Volumen weitestgehend konstant bleibt.	Maximale Hebung des Widerlagers $\leq 3\%$ der Länge des Bentonit-Dichtelementes.	Verwendung von arteigenem /autochthonem Material. Hohes Eigengewicht des Materials. Gebirgsverbundene Errichtung unter Ausnutzung des Gewölbeeffektes.
Filterschicht	Verteilung von Widerlager-seitig eindringender Lösung auf der gesamten Oberfläche des Dichtelementes.	Homogenisierung der vertikalen Quelldruckentwicklung des Dichtelementes.	Lagenweiser Einbau von Schichten aus granularem Material mit unterschiedlichen Korngrößen.
Versatz	<i>Minimierung druckgetriebener Fluidbewegung innerhalb der Strecken im ewG</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziele	Designanforderung
Versatz in der Bohrlochüberfahrungsstrecke	Minimierung druckgetriebener Fluidbewegung innerhalb der Bohrlochüberfahrungsstrecke. Funktionelle Unterstützung der Widerlager in den Einlagerungsbohrlöchern.	Permeabilität $\leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	Versatz als Gemisch von aufbereitetem Ausbruchsmaterial und Bentonit im Verhältnis von 70/30. Mittlere Trockendichte des granularen Bentonitanteils $\geq 1.500 \text{ kg m}^{-3}$. Quelldruck des Tonanteils $\geq 0,3 \text{ MPa}$.
Abschlusswiderlager vor der Einmündung in die Zugangsstrecken	Gewährleistung der Lagestabilität des Versatzes in der Bohrlochüberfahrungsstrecke.	Hohe Festigkeit. Geringe Permeabilität. Ausreichende Widerstandskraft gegenüber einseitigem Druck aus der Bohrlochüberfahrungsstrecke (Quelldruck + hydraulischer Druck)	Gebirgsverbundene Ausführung. Verwendung von Beton für massive Bauteile. Verwendung von Niedrig-pH-Beton. Mindestfestigkeitsklasse C35/45. Beton mit hohem chemischen Widerstand und hoher Sulfat-Angriffsresistenz. (z. B.: Expositionsklasse XA3). (w/z-Wert $\leq 0,5$; geringe Porosität)
Versatz in der Zugangsstrecke	Minimierung druckgetriebener Fluidbewegung innerhalb der Zugangsstrecken.	Permeabilität $\leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	Versatz als Gemisch von aufbereitetem Ausbruchsmaterial und Bentonit mit einem prozentualen Verhältnis von 70/30. Mittlere Trockendichte des granularen Bentonitanteils $\geq 1.500 \text{ kg m}^{-3}$. Quelldruck des Tonanteils $\geq 0,3 \text{ MPa}$.
Doppelwiderlager am Beginn des Streckenver schlusses	Gewährleistung der Lagestabilität des Versatzes in der Zugangsstrecke. Gewährleistung der Lagestabilität der ersten Dichtelement-Kombination im Streckenverschluss.	Maximale Verschiebung des Widerlagers $\leq 3\%$ der Länge der anliegenden Bentonitdichtungen.	Gebirgsverbundene Errichtung.

Streckenverschluss	<i>Gewährleistung des sicheren Einschluss der Radionuklide innerhalb der einzelnen ewG im Bewertungszeitraum im Zusammenspiel mit den anderen geotechnischen Barrieren</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziele	Designanforderung
Bentonit-Dichtelemente	Minimierung druckgetriebener Fluidbewegung innerhalb der Zugangsstrecken.	Permeabilität $\leq 10^{-16} \text{ m}^2$	Mittlere Einbautrockendichte $\geq 1.500 \text{ kg m}^{-3}$. Quelldruck $\geq 0,3 \text{ MPa}$ Vorkompaktierte Blöcke mit Bentonitgranulat als Füllmaterial für technisch bedingte Resthohlräume.
Asphalt-Dichtelemente	Minimierung druckgetriebener Fluidbewegung innerhalb der Zugangsstrecke bis die angeschlossene Bentonitdichtung ihre volle Wirkung erreicht hat.	Permeabilität $\leq 10^{-16} \text{ m}^2$	Kalteinbau in Blockform. Monolithisierung durch (Eigenge wicht) oder Temperaturerhöhung. Ggf. Nachschnitt der Kontur erforderlich.
Aufsättigungskammern	Hohe Aufnahmefähigkeit für Flüssigkeit zur großflächigen Weitergabe an die angeschlossene Bentonitdichtung.	Porosität $\geq 25\%$	Aufbereitetes Ausbruchsmaterial (schotterförmig).
Widerlager	Gewährleistung der Lagestabilität der Dichtelement-Kombinationen zu beiden Seiten innerhalb des Streckenverschlusses.	Maximale Verschiebung des Widerlagers $\leq 3\%$ der Länge der anliegenden Bentonitdichtungen.	Gebirgsverbundene Errichtung.
Komponente	Schutzfunktion	Leistungsziel	Designanforderung
Kluftzonenverschluss	<i>Minimierung erosiver Fluidbewegung in Strecken</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziel	Designanforderung
Widerlager	Gewährleistung der Lagestabilität der Dichtelement-Kombinationen im Kluftverschluss.	Maximale Verschiebung des Widerlagers $\leq 3\%$ der Länge der anliegenden Bentonitdichtungen.	Material: Niedrig-pH-Beton. Mechanische Verankerung im Gebirge. Auslegung gegen den zu erwartenden hydro-mechanischen Druck der Dichtelement-Kombinationen.
Asphalt-Dichtelemente	Minimierung druckgetriebener Fluidbewegung aus der Kluft in den Streckenversatz bis die angeschlossene Bentonitdichtung ihre volle Dichtwirkung erreicht hat.	Permeabilität $\leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	Kalteinbau in Blockform. Monolithisierung durch Druck (Eigenge wicht) oder Temperaturerhöhung. Ggf. Nachschnitt der Kontur erforderlich.
Bentonit-Dichtelemente	Minimierung druckgetriebener Fluidbewegung aus der Kluft in den Streckenversatz	Permeabilität $\leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	Mittlere Einbautrockendichte $\geq 1.500 \text{ kg m}^{-3}$. Quelldruck $\geq 0,3 \text{ MPa}$ Vorkompaktierte Blöcke mit Bentonitgranulat als Füllmaterial für technisch bedingte Resthohlräume.
Aufsättigungskammer	Gleichmäßig verteilte flächige Weitergabe der aus der Kluft einströmenden Lösung an die beiden angeschlossenen Bentonitdichtungen.	Hohe Aufnahmefähigkeit für Flüssigkeit. Porosität $\geq 35\%$	Aufbereitetes Ausbruchsmaterial (schotterförmig).
Schachtverschluss	<i>Minimierung des Eindringens von Lösungen aus dem Deckgebirge zur Aufrechterhaltung des hydrochemischen Milieus; Vermeidung von hydraulischen Kurzschläßen</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziel	Designanforderung
Sockelwiderlager	Gewährleistung der Lagestabilität der darüber liegenden Verschlusselemente.	Geringe Komprimierbarkeit. Auslaufsicherheit im Füllortbereich.	Einbauhöhe bis über die Oberkante des Füllortes.

Bitumenverfüllte Schottersäule	Minimierung druckgetriebener Fluidbewegung innerhalb des Schachtes, insbesondere des Eindringens von Lösungen aus darüber liegenden Kluftclustern.	Permeabilität $\leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	Schotter: Einbringtechnologie über Fördergefäß mit Bodenentleerung bei festgeschriebener Fallhöhe. Bitumen: Heißeinbau des Bitumens durch lagenweises Einbringen in den Schotter mit festgeschriebenen Lagenhöhen.
Schottersäule	Gewährleistung der Lagestabilität der darüber liegenden Verschlusselemente.	Maximale Setzung $\leq 3\%$ der Länge der darüber liegenden Bentonitdichtung.	Einbringtechnologie über Fördergefäß mit Bodenentleerung bei festgeschriebener Fallhöhe.
Bentonitdichtungen	Minimierung druckgetriebener Fluidbewegung innerhalb des Schachtes, insbesondere des Eindringens von Wässern aus höher liegenden Kluftclustern.	Permeabilität $\leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	Verwendung eines binären Bentonit-gemisches analog zum Schachtverschluss Salzdetfurth unter Anwendung einer in-situ Verdichtung.
Asphaltdichtung	Minimierung druckgetriebener Fluidbewegung innerhalb des Schachtes, insbesondere des Eindringens von Wässern aus überlagernden Gebirgsbereichen, bis zu dem Zeitpunkt an dem die Bentonitdichtung ihre volle Dichtwirkung erreicht hat.	Permeabilität $\leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	Kalteinbau in Blockform. Monolithisierung durch Druck (Eigen gewicht) oder Temperaturerhöhung. Ggf. Nachschnitt der Kontur erforderlich.
Filterschichten	Minimierung von Erosionerscheinungen, speziell die Ausbildung lokaler Fließkanäle (Pipes) an den Bentonitdichtungen.	Homogenisierung bzw. flächenhafte Verteilung des hydraulischen Druckaufbaus an den Stirnseiten der Bentonitdichtungen.	Lagenweiser Einbau von Schichten aus granularem Material mit unterschiedlichen Korngrößen.
Schottersäule	Keine	Keine	Einbringtechnologie über Fördergefäß mit Bodenentleerung bei festgeschriebener Fallhöhe.
Versatz bis GOK	Keine	Keine	Keine
Rampenverschluss	<i>Minimierung des Eindringens von Lösungen aus dem Deckgebirge zur Aufrechterhaltung des hydrochemischen Milieus; Vermeidung von Aquifer-Kurzschüssen</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziel	Designanforderung
Versatz	Stützung des Gebirges zur Vermeidung weiteren Rissbildungen im Gebirge durch Konvergenz und Abschalungen	Herstellung eines Kraftschlusses zum Gebirge; Hohe Druckfestigkeit	Aufbereitung des Ausbruchsmaterials zu einem setzungsarmen Schotter
Bentonit-Versatz-Gemisch	Minimierung druckgetriebener Fluidbewegung innerhalb der Rampe, insbesondere des Eindringens von Lösungen aus höher liegenden hydraulisch wirksamen Kluftzonen.	Permeabilität $\leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	Aufbereitung des Ausbruchsmaterials zu einem setzungsarmen Schotter; Wahl eines geeigneten Mischungsverhältnisses aus Ausbruchsmaterial und granularem Bentonit (kleine Pellets). Als Arbeitshypothese wird ein Verhältnis von 70/30 angenommen. Einbau z. B. mit Verdichterplatten Einbaudichte $\geq 1.500 \text{ kg m}^{-3}$.
Asphalt-Dichtelement	Minimierung druckgetriebener Fluidbewegung innerhalb der Rampe bis die angeschlossenen Bentonit-Versatz-Gemische ihre volle Dichtwirkung erreicht haben.	Permeabilität $\leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	Kalteinbau in Blockform. Monolithisierung durch Druck (Eigen gewicht) oder Temperaturerhöhung. Ggf. Nachschnitt der Kontur erforderlich.
Filterschichten	Minimierung von Erosionerscheinungen, speziell der Ausbildung lokaler Fließkanäle (Pipes) an den Bentonit-Versatz-Gemischen.	Homogenisierung bzw. flächenhafte Verteilung des hydraulischen Druckaufbaus an den Stirnflächen der Bentonit-Versatz-Gemische.	Lagenweiser Einbau von granularem Material mit unterschiedlichen Korngrößen.

4 Einlagerungs- und Verschlusskonzept für die Option überlagernder ewG

Im Rahmen des Konzeptes des „überlagernden ewG“ wird die Einlagerungsoption „Streckenlagerung“ angenommen. Das Grubengebäude wird mit einem definierten Sicherheitsabstand (Arbeitshypothese mindestens 50 m) unterhalb der Barriereformation errichtet. Als Barriereförderung wurde eine überlagernde Salzformation angenommen (Weitkamp et al. 2021). Abb. 4.1 zeigt einen Entwurf für das Grubengebäude, wie es im Rahmen des Forschungsprojektes RESUS (Becker et al. 2020b) als Grundlage verwendet wurde.

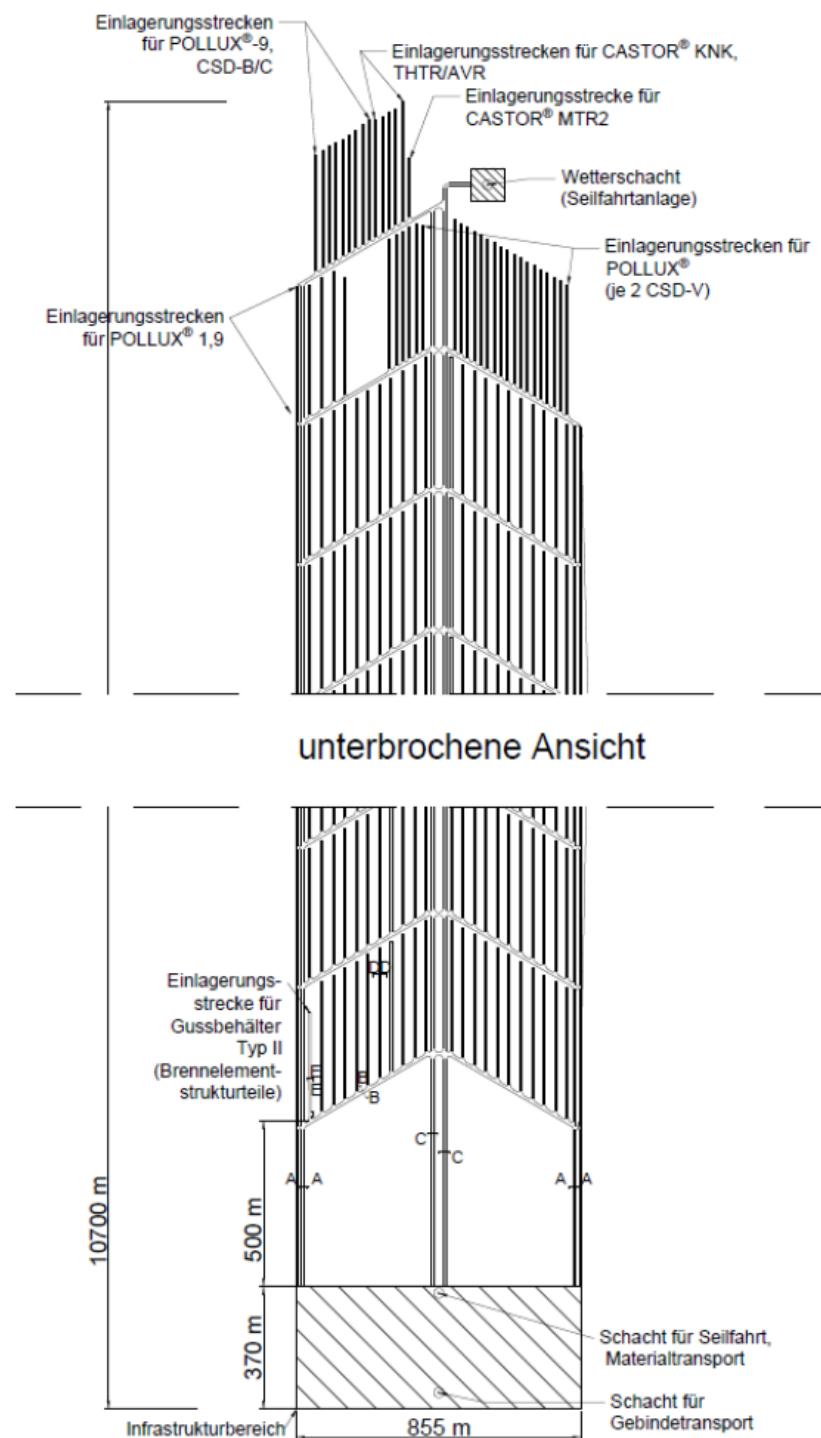


Abb. 4.1: Entwurf zur Konfiguration eines Grubengebäudes für die Einlagerung im Kristallin im Rahmen des Konzeptes des überlagernden ewG (Becker et al. 2020b).

Sowohl für das Grubengebäude selbst, als auch insbesondere die den ewG durchhörternden Tageszugänge in Form von Schächten und/oder Rampen gilt es, ein geeignetes Verfüll- und Verschlusskonzept zu erstellen. Gemäß der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV 2020) ist das Barrierensystem zu unterteilen in „wesentliche“ und „weitere“ Barrieren (vgl. Kap. 2.2.2). Abb. 4.2 zeigt ein Schaubild, in dem für das Konzept des überlagernden ewG eine entsprechende Einteilung vorgenommen wurde. Analog zur Option des multiplen ewG wurden, neben dem Behälter, auch hier die Barrieren, die sich innerhalb des ewG befinden als wesentliche Barrieren definiert.

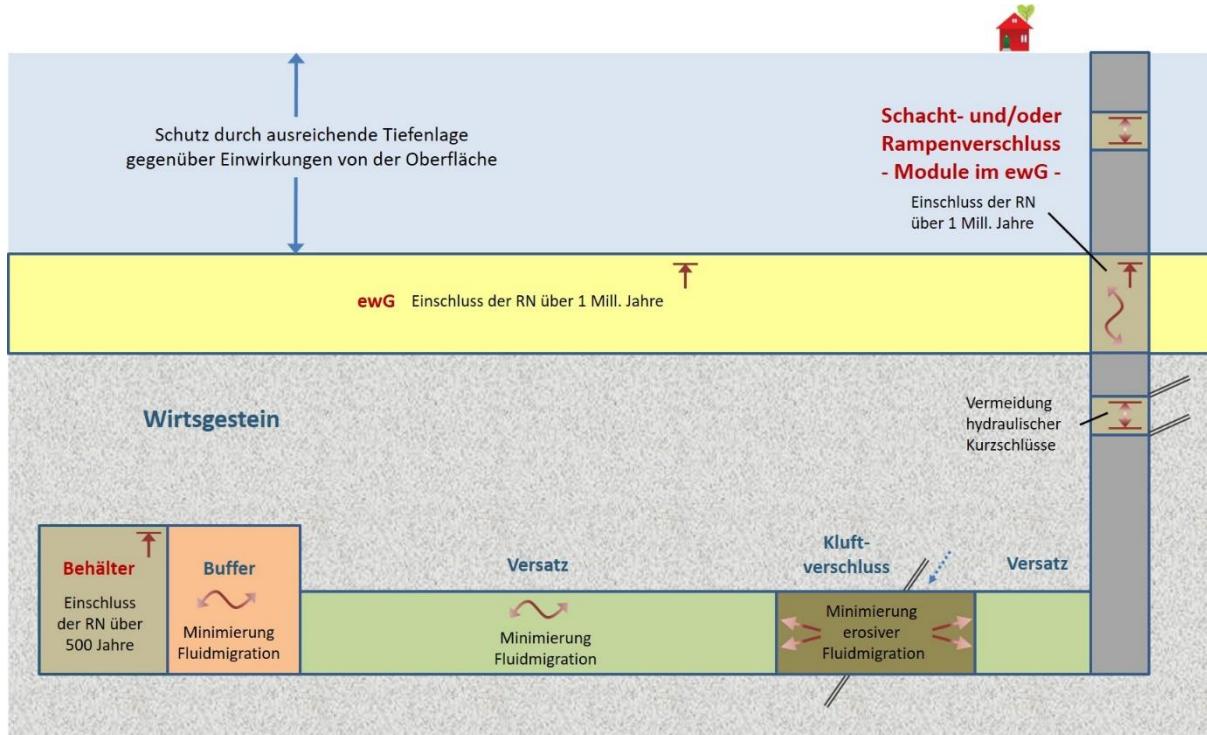


Abb. 4.2: Schematisierte Einteilung des Barrierensystems in wesentliche (rot) und weitere (blau) Barrieren für das Konzept des überlagernden ewG

Im Folgenden wird der Aufbau der einzelnen Barrieren näher erläutert inklusive der jeweiligen Sicherheits- bzw. Schutzfunktion.

4.1 Behälter

Analog zum Konzept des „multiplen ewG“ ist auch hier das erste Element eines diversitär redundanten Barrierensystems der Behälter (Bertrams et al. 2017). Bei dem Konzept „überlagernder ewG“ ist es vorgesehen, die ausgedienten Brennelemente (BE) aus den Leistungsreaktoren und die radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in Pollux®-Behältern einzulagern.

Für die Streckenlagerung im Steinsalz wurde ein Behälter vom Typ POLLUX®-10 ausgelegt (Abb. 4.3). Dieser Behälter ist für eine Auslegungstemperatur von 200 °C vorgesehen. Die Auslegungstemperatur im kristallinen Wirtsgestein wird für dieses Einlagerungskonzept nur mit 100 °C angenommen. Aus diesem Grund kann der POLLUX®-10 Behälter nicht für die Einlagerung der ausgedienten Brennelemente berücksichtigt werden. Für Tongestein mit einer Auslegungstemperatur von 100 °C wurde in der Vergangenheit zunächst ein Behälter vom Typ POLLUX®-3 betrachtet (Pöhler 2010). Eine Neudimensionierung unter Anpassung an geänderte Zwischenlagerzeiten ist in Bertrams et al. (2017 und 2021) beschrieben.

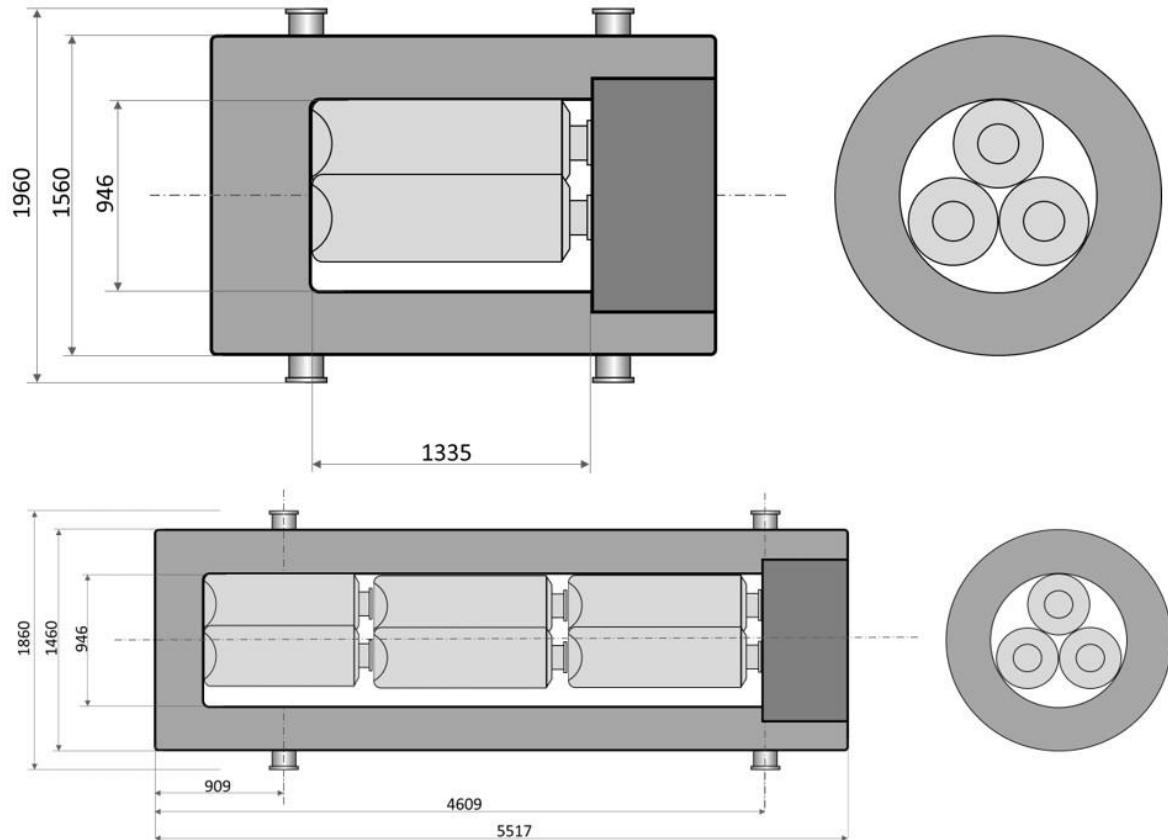


Abb. 4.3: Skizzen eines POLLUX®-3 Behälters mit CSD-V (oben) und eines POLLUX®-9 Behälters mit CSD-B oder CSD-C (unten); Skizzen aus Bertrams et al. (2021)

Der POLLUX®-3 Behälter besteht aus einem Innen- und einem Außenbehälter. Der Innenbehälter hat eine Wandstärke von 160 mm und wird durch einen geschraubten Primärdeckel und einen geschweißten Sekundärdeckel dicht verschlossen. Innenbehälter, Primär- und Sekundärdeckel bestehen aus Feinkornbaustahl (15MnNi6.3). Der äußere Abschirmbehälter hat eine Wandstärke von ca. 270 mm und wird mit einem verschraubten Außendeckel verschlossen. Dieser Abschirmbehälter hat keine Dichtfunktion zu übernehmen und besteht wie der Außendeckel aus Sphäroguss (GGG40, Werkstoff EN-GJS-400-15U (0.7040)). Im Mantel sind in radial verteilten Bohrungen Stäbe aus Polyethylen zur Neutronenmoderation eingesetzt.

Der POLLUX®-3 Behälter soll in zwei Varianten genutzt werden, die entweder die Brennstäbe von 3 Brennelementen oder 3 CSD-V-Kokillen enthalten (Pöhler 2010). Der Innenraum des POLLUX®-3 ist als erste Variante in 5 Kammern unterteilt, in die je eine Brennstabbüchse mit den gezogenen Brennstäben der Brennelemente eingesetzt wird. Der POLLUX®-3 kann die Brennstäbe von bis zu 3 DWR-BE (entsprechend 9 SWR-BE oder 7,5 WWER-BE) aufnehmen. Der Außendurchmesser des Behälters wurde mit 1.200 mm und die Länge mit 5.460 mm angenommen. Seine Masse beträgt etwa 38 Mg (Pöhler 2010).

Der POLLUX®-3-CSD-V als zweite Variante unterscheidet sich durch einen etwas größeren Durchmesser (1300 mm) und 3 Tragkörbe für die Aufnahme von Kokillen (CSD-V) im Innenraum. Die als Primärbehälter für die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung verwendeten CSD-Kokillen haben eine Länge von 1338 mm, einen Durchmesser von 430 mm, eine Wandstärke von 5 mm und werden aus dem Edelstahl Z 15 CN 24.13 (= Werkstoff 1.4833) gefertigt.

Für die Endlagerung von schwach wärmeentwickelnden, schwach- und mittelradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung (CSD-C, CSD-B) wurde auf das entsprechende Behälterkonzept (POLLUX®-9) für Steinsalz zurückgegriffen (Mönig et al. 2011). Der POLLUX®-9 Behälter hat eine Länge von 5.517 mm, einen Durchmesser von 1.560 mm, ein Abfallgebindevolumen von 10,55 m³ und eine max. Abfallgebindemasse von 65 Mg. Er besteht aus einem Innen- und einem Außenbehälter. Der Innenbehälter ist, wie der Primär- und Sekundärdeckel, aus Feinkornbaustahl (Werkstoff Stahl 15MnNi6.3 (1.6210)) gefertigt und hat eine Wandstärke von 160 mm. Er wird durch einen geschraubten Primärdeckel und einen geschweißten Sekundärdeckel dicht verschlossen. Der Innenraum ist in Tragkörbe unterteilt, die in drei Ebenen jeweils drei CSD-C oder CSD-B Kokillen übereinander aufnehmen. Der Außenbehälter ist aus Sphäroguss (Werkstoff EN-GJS-400-15U (0.7040)) hergestellt und hat eine Wandstärke von ca. 270 mm. Da er keine Dichtfunktion zu übernehmen hat, wird er mit einem verschraubten Deckel verschlossen. Im Mantel sind in radial verteilten Bohrungen Stäbe aus Polyethylen (Hostalen oder Lupolen) zur Verringerung der Neutronendosisleistung eingesetzt. Zur Handhabung sind am Behälterkörper oben und unten Tragzapfen aus Edelstahl (1.4313) X5CrNi13.4 angebracht.

Für den Behälter wird folgende Sicherheitsfunktion definiert.

Sicherheitsfunktion: *Der Behälter soll den Einschluss der Radionuklide in dem Bergungszeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers gewährleisten.*

Dazu sei angemerkt, dass das für die Behälterauslegung bedeutet, dass der Behälter für einen Zeitraum von 500 Jahren + Dauer der Betriebsphase ausgelegt werden muss. Um diese Sicherheitsfunktion zu erfüllen, werden folgende Leistungsziele festgelegt.

Leistungsziel 1: *Der Stahlbehälter muss so ausgelegt sein, dass er der zu erwartenden mechanischen Beanspruchung während des Bergungszeitraumes standhalten kann und die Kriterien zur Tragfähigkeit und Verformungsbeständigkeit erfüllt.*

Leistungsziel 2: *Der Behälter muss für den Bergungszeitraum von 500 Jahre mechanisch handhabbar sein.*

Leistungsziel 3: *Der Behälter muss den Einschluss radioaktiver Aerosole für den Bergungszeitraum von 500 Jahren gewährleisten.*

Designanforderungen:

Damit die aufgeführten Leistungsziele erreicht werden können, wird für den Stahlbehälter gefordert, dass Stahlsorte und Wandstärken in einer Weise gewählt bzw. bemessen werden, dass er den zu erwartenden mechanischen Belastungen im Bergungszeitraum ausreichend Widerstand entgegenzusetzen hat.

4.2 Geotechnische Verfüll- und Verschlusselemente

Das zweite Element dieses diversitär redundanten Barrierensystems stellt das Verschlusssystem innerhalb des Grubengebäudes und des ewG dar. Dieses Verschlusssystem besteht zum einen aus den Schacht- und Rampenverschlüssen innerhalb des überlagernden ewG und zum anderen aus der Verfüllung der Einlagerungsstrecken und sämtlicher Zugangsstrecken.

4.2.1 Buffer und Versatz

Jede einzelne Einlagerungsstrecke wird parallel zur Beladung sukzessiv mit Bentonitgranulat als Buffer versetzt. Parallel zur Beladung bedeutet, dass nach Ablage eines Behälters auf ein hochkompaktiertes Bentonitauflager der verbleibende Freiraum zwischen Behälter und Streckenkontur mit Bentonitgranulat versetzt wird. In einem großmaßstäblichen Versuch in Mont Terri in der Schweiz hat die Nagra die Durchführung dieser Art des Versatzes erfolgreich erprobt. Abb. 4.4 zeigt den Prototyp einer entsprechenden Versatzmaschine, von der Nagra als „Backfilling Machine“ (BFM) bezeichnet. Wesentliches Element dieser Maschine sind die fünf in Röhren geführten Förderwalzen zum Einbringen des granularen Bentonitmaterials, die für eine gleichmäßige Befüllung des Hohraumes um die Behälter sorgen.



Abb. 4.4: Prototyp einer Maschine zum Versetzen des verbleibenden Hohlraums zwischen einem in einer Strecke abgelegten Behälter und der Streckenkontur; oben: Längsprofil, links: Frontansicht, (Foto: COMET, aus Müller et al. 2017).

Der Zustand nach dem Versatzprozess für das in Abb. 4.1 gezeigte Grubengebäude ist in Abb. 4.5 dargestellt. Im Rahmen des In-situ-Versuches der Nagra konnte für den Bentonitversatz eine durchschnittliche Trockendichte von etwa 1.500 kg m^{-3} erreicht werden. Die Trockendichte der einzelnen kompaktierten Pellets in dem Granulat betrug 2.180 kg m^{-3} (Müller et al. 2017).

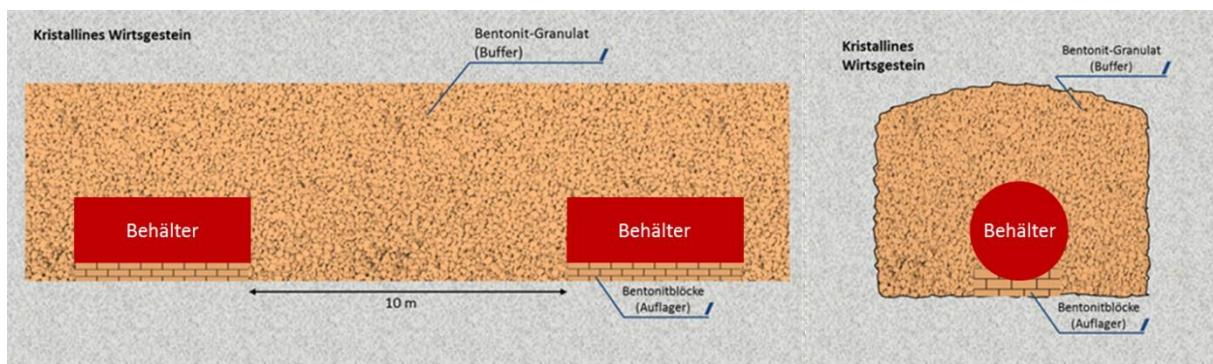


Abb. 4.5: Zustand nach dem Versatz in einer Einlagerungsstrecke

Die mit dem Buffer versetzten Einlagerungsstrecken werden an der Einmündung in die Querschläge mit einem Abschlusswiderlager (blau in Abb. 4.6 links) verschlossen. Die Querschläge bleiben solange befahrbar, bis sämtliche Einlagerungsstrecken eines Einlagerungsfeldes beladen und versetzt sind. Ist die Entscheidung gefallen, ein Einlagerungsfeld zu verschließen, werden auch die Querschläge versetzt und an der

Einmündung in die mittlere Zugangsstrecke ebenfalls mit Abschlusswiderlagern versehen (blau in Abb. 4.6 links).

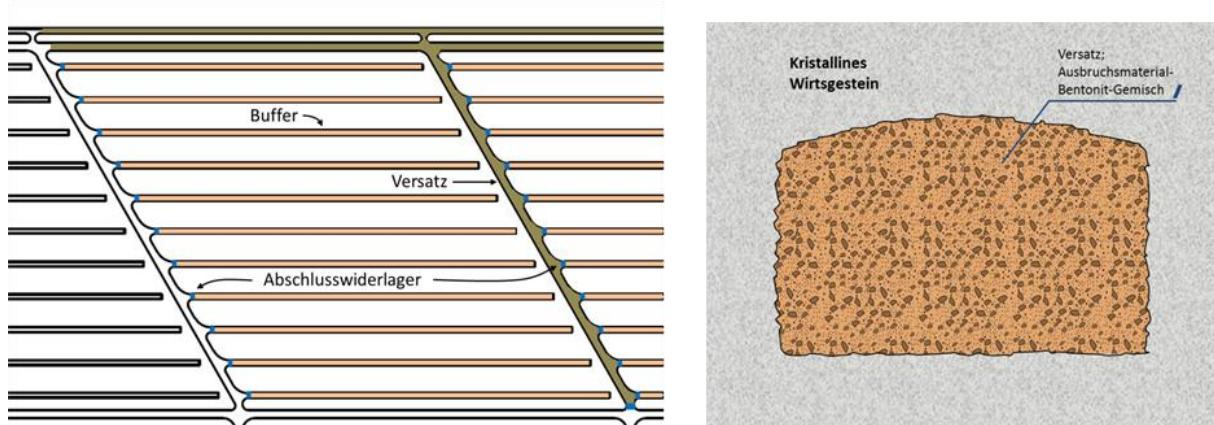


Abb. 4.6: Zustand nach Versatz von Einlagerungsfeldern

Die Abschlusswiderlager bestehen in jedem Fall aus Niedrig-pH-Beton um chemische Wechselwirkungen mit dem Bentonit im Buffer und Versatz zu minimieren. Durch dieses Abschlusswiderlager wird das Buffermaterial auch bei Einsetzen des Quellprozesses am Platz gehalten. Die Funktionsdauer der Abschlusswiderlager ist begrenzt bis zum Zeitpunkt des Versetzens der Querschläge eines Einlagerungsfeldes, längstens jedoch bis zur vollen Quelldruckentwicklung des Versatzes in den Querschlägen. Welche lokalen Auswirkungen eine anschließende Korrosion der Zementphasen der Widerlager haben, sollte durch Analysen geklärt werden. Ggf. kommt es zu einer lokalen Veränderung des Quellverhaltens des Versatzes, da korrodierte Zementphasen des Betons die hydrochemischen Verhältnisse verändern. Durch die Aufsättigung und den Quellprozess des Buffers wird eine Fluidbewegung innerhalb der Einlagerungsstrecken minimiert. Gemäß dem Nachweiskonzept bestehen zwar keine konkreten Anforderungen an einen Buffer, da der Nachweis des sicheren Einschlusses über den ewG geführt wird, aber eine zusätzliche Migrationsbarriere mit Rückhalteeigenschaften und Stabilisierung des hydrochemischen Milieus wird als positive Unterstützung des sicheren Einschlusses angesehen.

Das doppelte Zugangsstreckensystem in der Mitte des längsgestreckten Grubengebäudes bleibt während der gesamten Betriebsphase uneingeschränkt befahrbar. Die äußeren Zugangsstrecken werden sukzessive mit Abwurf der Einlagerungsfelder versetzt (Abb. 4.6 rechts). Bei dem Versatzmaterial für die Querschläge und Zugangsstrecken handelt es sich um ein Gemisch aus Ausbruchsmaterial und Bentonit. Eine optimale Korngrößenverteilung für den Versatz mit Bentonit ist durch entsprechende Untersuchungen zu bestimmen. Wichtig ist in dem Zusammenhang, dass der Bentonitanteil nicht aus dem Korngerüst ausgespült wird. Als Arbeitshypothese wird derzeit von einem Mischungsverhältnis von 70/30% Ausbruchsmaterial/Bentonit ausgegangen. Bei diesem Mischungsverhältnis wurden Permeabilitäten von 10^{-17} bis 10^{-18} m^2 gemessen (Pusch 1998). Entsprechend langsam verläuft dann auch die Fluidmigration in Richtung der Tageszugänge (Schächte oder Rampen). Dies verschafft den dortigen Verschlusselementen Zeit um ihre volle Abdichtwirkung zu erreichen. Beim Einbau des Versatzes werden möglichst homogene Materialeigenschaften angestrebt, um eine gleichmäßige Aufsättigung sicherzustellen.

Ein eventueller Streckenausbau behindert das Aufsättigen des Versatzes durch zutretende Gebirgslösungen nicht, da er eine höhere Durchlässigkeit als das Gebirge hat. Wohl aber kann es am Kontakt von Ausbau und Versatz zu einer Veränderung des Quellverhaltens des Versatzes kommen, da korrodierte Zementphasen des Betons die hydrochemischen Verhältnisse dort verändern können. Dies sollte durch Analysen geklärt werden.

Im Falle des Antreffens von hydraulisch signifikant wirksamen Klüften in den Strecken sind Kluftverschlüsse analog zu denen, die beim Konzept des multiplen ewG beschrieben sind, vorzusehen. Schutzfunktion, Leistungsziel und Designanforderungen gelten entsprechend.

Gemäß Kapitel 2.2 werden dem Buffer und dem Versatz Schutzfunktionen zugeordnet.

Schutzfunktion: *Buffer und Versatz sollen den Fluidtransport in den Einlagerungs- und Zugangsstrecken minimieren.*

Damit sind folgende Leistungsziele verbunden.

Buffer und Versatz

Leistungsziel 1: *Buffer und Versatz sollen nach erfolgter Aufsättigung mit Lösung innerhalb der Strecke insgesamt eine Permeabilität erreichen, die folgende Ungleichung erfüllt: $k \leq 1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$*

Nach Fertigstellung des vollständigen Verschlusssystems ist diese Arbeitshypothese durch Prozessanalysen zu verifizieren und das Leistungsziel ggf. anzupassen.

Leistungsziel 2: *Buffer und Versatz sollen nach erfolgter Aufsättigung mit Lösung einen Quelldruck erreichen, der einen Kraftschluss zum Gebirge herbeiführt und folgende Gleichung erfüllt: $p_q \approx 0,5 \text{ MPa}$*

Nach Fertigstellung des vollständigen Verschlusssystems ist diese Arbeitshypothese durch Prozessanalysen zu verifizieren und das Leistungsziel ggf. anzupassen.

Designanforderungen

Für den Buffer mit dem Referenzmaterial (Ca-Bentonit Typ Salzdetfurth, vgl. Kap. 2.3.1) wird als Arbeitshypothese davon ausgegangen, dass er zum einen als granulares binäres Gemisch eingebracht wird und dass die Trockendichte des Gemisches insgesamt bei $\rho \approx 1.650 \text{ kg m}^{-3}$ liegen sollte, um einen Quelldruck von 0,5 MPa zu erreichen. Je nach verwendeter Bentonitsorte ist dieser Wert zu prüfen und ggf. anzupassen.

Für den Versatz wird als Arbeitshypothese von einem Mischungsverhältnis von 70/30 Ausbruchsmaterial/Bentonit ausgegangen, wobei das Ausbruchsmaterial schotterförmig aufbereitet werden soll, um eine Setzungsarmut zu erreichen.

4.2.2 Verschluss der Tageszugänge

Schächte und/oder Rampen sind nach Verschluss des untertägigen Grubengebäudes bis zur Tagesoberfläche zu verfüllen. Bei der Endlageroption vom Typ „überlagernder ewG“ durchörtern die Tageszugänge die Barriereformation und damit auch den ewG. Diese Durchörterungen des ewG müssen anforderungsgerecht für den gesamten Bewertungszeitraum verschlossen werden. In dem Zusammenhang besteht die Aufgabe des Schacht- oder Rampenverschlusses darin, Fluidbewegungen sowohl aus dem Deckgebirge in

das Endlager hinein, als auch vor allem Fluidbewegungen aus dem Endlager heraus durch den ewG in das Deckgebirge zu minimieren.

Bei der Minimierung des Lösungszutritts in das Endlager hinein geht es darum, Störungen des hydrochemischen Milieus im Einlagerungshorizont zu minimieren. Das heißt, der Verschluss soll gewährleisten, dass nur ein möglichst geringer Zustrom meteorischer Wässer bzw. von Wässern mit unterschiedlicher Lösungszusammensetzung aus dem Deckgebirge in den Einlagerungshorizont erfolgt. Bei der Minimierung des Migrierens aus dem Endlager heraus geht es um die Minimierung einer möglichen Freisetzung durch bzw. aus dem ewG, um gemäß den Sicherheitsanforderungen die Grenzwerte am Rand des ewG einzuhalten.

4.2.2.1 Schachtverschluss

Der Entwurf für den Schachtverschluss sieht vor, die Barriereformation inklusive des ewG nahezu vollständig mit Sorelbeton als Abdichtmaterial zu verfüllen, da u. a. auch hochsalinare $MgCl_2$ reiche Lösungen aus den Kaliflözen der Barriereformation zu erwarten sind. Abb. 4.7 zeigt ein geologisches Profil, das seitens der BGR für den Modellstandort entwickelt wurde. Unter diesen Voraussetzungen kann der Sorelbeton als langzeitstabil angesehen werden. Eingeschlossen wird das Element oberseitig von einem Element aus Salzbeton und unterseitig von einem Element aus Anhydritmörtel (Widerlagerfunktion) sowie jeweils einer dazwischen liegenden Schicht aus Bischofit. Letztere dient dem Schutz des Sorelbetons, da sie, auch bei Anstrom mit NaCl reichen Lösungen aus dem Salzbeton oder dem Anhydritmörtel diese in für den Sorelbeton verträgliche Lösungen umwandelt und so eine längerfristig zu erwartende Korrosion des Sorelbetons vermeidet. Die Tatsache, dass sich das Sorelbeton-Element fast über die gesamte Barriereformation erstreckt und nicht nur den darin liegenden ewG abdichtet, bildet eine Sicherheitsreserve, falls es doch zu Korrosionserscheinungen am Sorelbeton-Element kommt. Letzteres könnte z. B. eine Folge einer zu geringen Mächtigkeit des Bischofit sein. Diese ist durch eine Einwirkungsanalyse inklusive einer entsprechenden Bemessung auszulegen. Alternativ könnte in homogenen Zechsteinbereichen zusätzlich noch ein Element aus Salzgrus implementiert werden, welches langfristig durch Kompaktion auch eine Dichtfunktion übernehmen kann. Dies ist je nach Ausdehnung und Homogenität der Zechsteinbereiche zu entscheiden.

Eine weitere Einrahmung geschieht durch zwei Bitumen-verfüllte Schottersäulen. Diese verhindern, insbesondere in der transienten Phase, in der der Endlagerbereich noch nicht wieder aufgesättigt ist, also noch als Potenzialsenke fungiert, ein erhöhtes Anströmen von Fluiden von oben auf die Dichtelemente innerhalb der Barriereformation.

Ein weiteres Modul des Schachtverschlusses, das sogenannte Trennmodul bestehend aus Bentonit, dient in erster Linie dazu, vorhandene Aquifere voneinander zu trennen, die ansonsten über den Schacht miteinander kurzgeschlossen wären. Dies ist eine bergrechtliche Auflage (OCZ 1996). Der übrige Teil des Schachtes wird zur mechanischen Stabilisierung mit schotterförmig aufbereitetem Ausbruchsmaterial verfüllt. Derzeit wird davon ausgegangen, dass für die Errichtung eines Schachtverschlusses alle Einbauten und auch ein eventueller Spritzbetonausbau, im Bereich der Dichtelemente entfernt werden. Zur Definition von Sicherheits- und Schutzfunktionen der Funktionselemente des Schachtverschlusses wird unterschieden zwischen den Komponenten, die innerhalb des ewG positioniert sind und denen, die außerhalb des ewG positioniert sind.

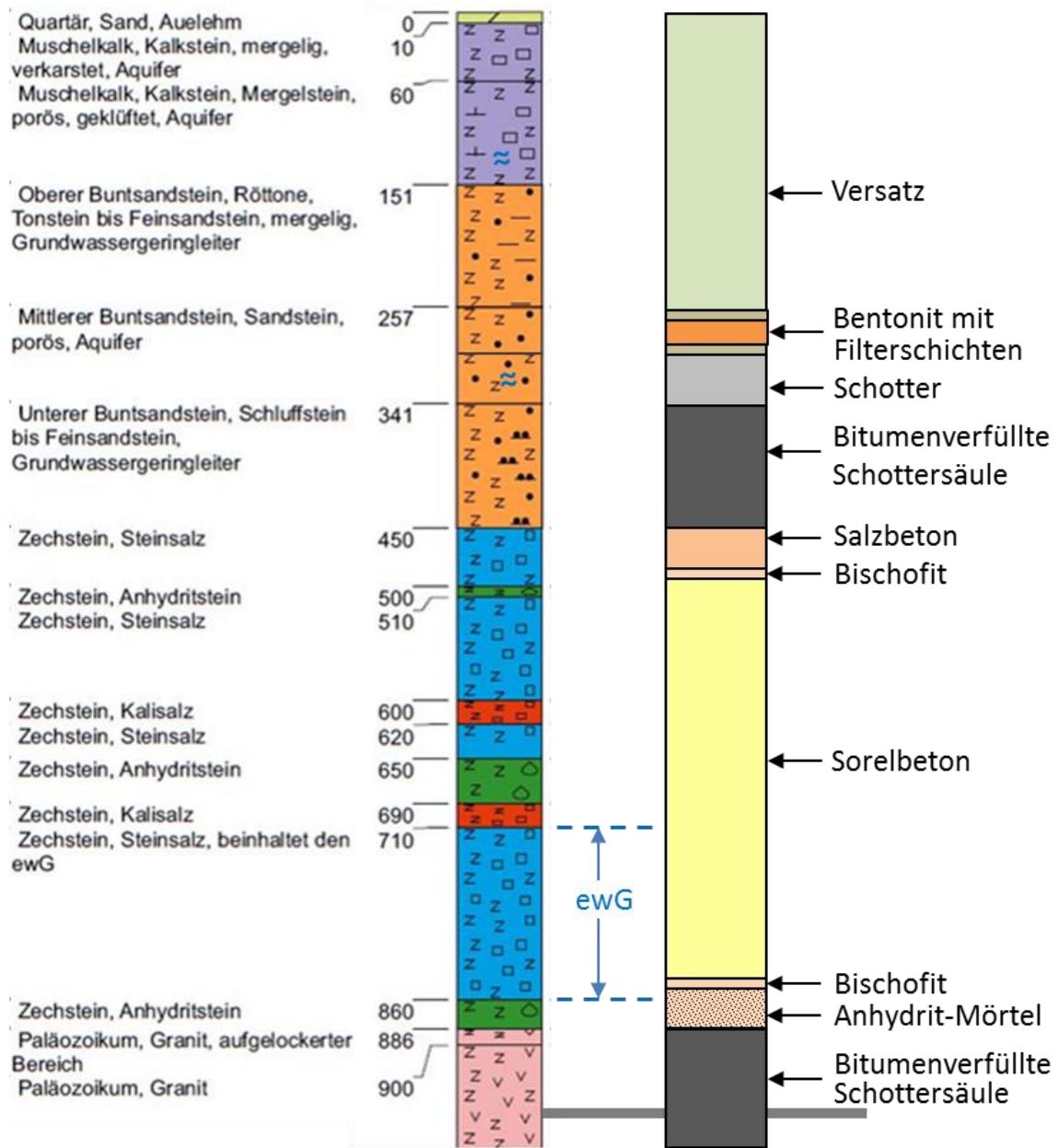


Abb. 4.7: Geologisches Profil für den betrachteten Modellstandort mit der Barriereförderung aus dem Zechstein (450 bis 886 m u. GOK) und Ausweisung des „überlagernden ewG“ im Steinsalz (blau), (Weitkamp et al. 2021).

Die Sicherheitsfunktion des Teils des Schachtverschlusses, der innerhalb des ewG liegt, wird wie folgt definiert:

Sicherheitsfunktion: Der Teil des Schachtverschlusses, der innerhalb des ewG positioniert ist, soll den Einschluss der Radionuklide im Zusammenspiel mit dem ewG im gesamten Bewertungszeitraum gewährleisten.

Die spezifische Funktion des Schachtverschlusselementes innerhalb des ewG ist, Fluidbewegungen innerhalb der ewG-Durchörterungen in beiden Richtungen zu minimieren. Mit diesen Funktionen sind die folgenden Leistungsziele verbunden.

Sorelbeton-Dichtelement

Leistungsziel 1: Das Sorelbeton-Dichtelement soll das Fließdruck-Kriterium im Bewertungszeitraum erfüllen.

Leistungsziel 2: Das Sorelbeton-Dichtelement soll im gesamten Bewertungszeitraum eine integrale Permeabilität besitzen, die folgende Ungleichung innerhalb des ewG erfüllt: $k \leq 10^{-18} m^2$

Die Schutzfunktion des Teils des Schachtverschlusses, der außerhalb des ewG liegt, wird wie folgt definiert:

Schutzfunktion: Der Teil des Schachtverschlusses, der außerhalb des ewG positioniert ist, soll generell eine Fluidmigration innerhalb des Schachtes minimieren.

Die spezifische Funktion des Schachtverschlusselementes außerhalb des ewG ist es, den Anstrom von Lösungen aus dem Deckgebirge auf die Dichtelemente innerhalb des ewG minimieren. Innerhalb des Deckgebirges sollen außerdem hydraulische Kurzschlüsse über die Schachtröhre vermieden werden. Mit diesen Funktionen sind die folgenden Leistungsziele verbunden.

Sorelbeton-Dichtelement

Leistungsziel 1: Das Sorelbeton-Dichtelement soll einen Kraftschluss zum Gebirge aufweisen.

Leistungsziel 2: Das Sorelbeton-Dichtelement soll im Bewertungszeitraum eine integrale Permeabilität besitzen, die folgende Ungleichung erfüllt: $k \leq 10^{-18} m^2$

Bischofit-Schichten

Leistungsziel: Die Bischofit-Schichten sollen salinare Lösungen, die ggf. NaCl-dominiert sind, insoweit puffern, dass der Sorelbeton mit seiner MgCl₂-Dominanz nicht signifikant korrosiv geschädigt wird.

Salzbeton-Dichtelement

Leistungsziel: Das Salzbeton-Dichtelement soll im gesamten Bewertungszeitraum eine integrale Permeabilität besitzen, die folgende Ungleichung innerhalb des ewG erfüllt: $k \leq 10^{-18} m^2$

Bitumen-verfüllte Schottersäulen

Leistungsziel: Die Bitumen-verfüllten Schottersäulen sollen zumindest während der transienten Phase eine integrale Permeabilität erreichen, die folgende Ungleichung erfüllt: $k \leq 1 \cdot 10^{-19} m^2$

Schotter

Leistungsziel: *Die geringmächtige Schottersäule soll eine hohe Porosität und Permeabilität besitzen, um im Bereich von Aquiferhorizonten unter Beibehaltung des örtlichen hydraulischen Gradienten einen möglichst geringen hydraulischen Druckstau zu verursachen.*

Bentonit-Dichtelement

Leistungsziel 1: *Das Bentonit-Element soll nach erfolgter Aufsättigung mit Lösung eine Permeabilität erreichen, die folgende Ungleichung erfüllt:
 $k \leq 1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$*

Nach Fertigstellung des vollständigen Verschlussystems ist diese Arbeitshypothese durch Prozessanalysen zu verifizieren und das Leistungsziel ggf. anzupassen.

Leistungsziel 2: *Das Bentonit-Element soll nach erfolgter Aufsättigung mit Lösung einen Quelldruck erreichen, der folgende Gleichung erfüllt:
 $p_q \approx 1 \text{ MPa}$*

Filterschichten

Leistungsziel: *Die Filterschichten sollen einen geeigneten Porositätsgradienten zwischen dem Versatzmaterial bzw. dem Schotter und dem Bentonitmaterial besitzen.*

Designanforderungen

Damit die eben aufgeführten Leistungsziele für die einzelnen Funktionselemente erreicht werden können, werden für diese Elemente Designanforderungen erstellt. Für die Implementierung des Bentonit-Elementes wird ein binäres Gemisch vorgeschlagen, dass in-situ während des Einbaus verdichtet wird. Material und Verfahren wurden bereits in früheren In-situ-Versuchen erfolgreich getestet (Breidung 2002). Für das Referenz-material (Ca-Bentonit Typ Salzdetfurth, vgl. Kap. 2.3.1) wird als Arbeitshypothese davon ausgegangen, dass die Trockendichte bei $\rho \approx 1.750 \text{ kg m}^{-3}$ liegen sollte, um einen Quelldruck von 1 MPa zu erreichen. Je nach verwandeter Bentonitsorte ist dieser Wert zu prüfen und ggf. anzupassen. Inwieweit ein Nachschnitt der Kontur erforderlich ist, muss vor Ort anhand des Zustandes der ALZ geprüft und entschieden werden. Für die Filterschichten ist ein lagenweiser Einbau von granularem Material mit unterschiedlichen Korngrößen vorzusehen. Die Errichtung der Bitumen-verfüllten Schottersäulen sollte in Lagen von etwa 50 cm erfolgen, um sicherzustellen, dass auch alle Hohlräume innerhalb des Schotters von dem heißen Bitumen erreicht und gefüllt werden, bevor dieses zu kalt und damit zu zähflüssig/viskos wird. Das Sorelbeton-Dichtelement soll sich nicht nur über den ewG erstrecken, sondern annähernd über die gesamte salinare Formation, um bei eventueller korrosiver Schädigung noch ausreichend Sicherheitsreserven bzgl. seiner Mächtigkeit zu haben.

4.2.2.2 Rampenverschluss

Bei einer Rampe (Abb. 4.8) handelt es sich prinzipiell um eine geneigte Strecke. Außerhalb des ewG wird die Rampe mit aufbereitetem Ausbruchsmaterial verfüllt. An den Stellen der Rampe, an denen hydraulisch wirksame Klüfte durchfahren wurden, werden, analog zu den

Schachtverschlüssen, sogenannte Kluftverschlüsse implementiert. Diese bestehen aus Bentonit-Dichtelementen links und rechts der Kluft inklusive Filterschichten als Erosionsschutz. Im Bereich der durchteuften Kluftzone besteht die Verfüllung aus durchlässigem Schotter.

Der Verlauf der Rampe innerhalb des ewG kann auch Bereiche enthalten, die ein geringes Gefälle besitzen oder ganz ohne Neigung sind, um einen längeren Streckenbereich innerhalb des „überlagernden ewG“ zu ermöglichen. Je länger der Streckenbereich, desto ausgedehnter kann auch die Dichtung innerhalb des ewG konfiguriert werden. Die Ausdehnung kann so den Anforderungen an den hydraulischen Widerstand angepasst werden.

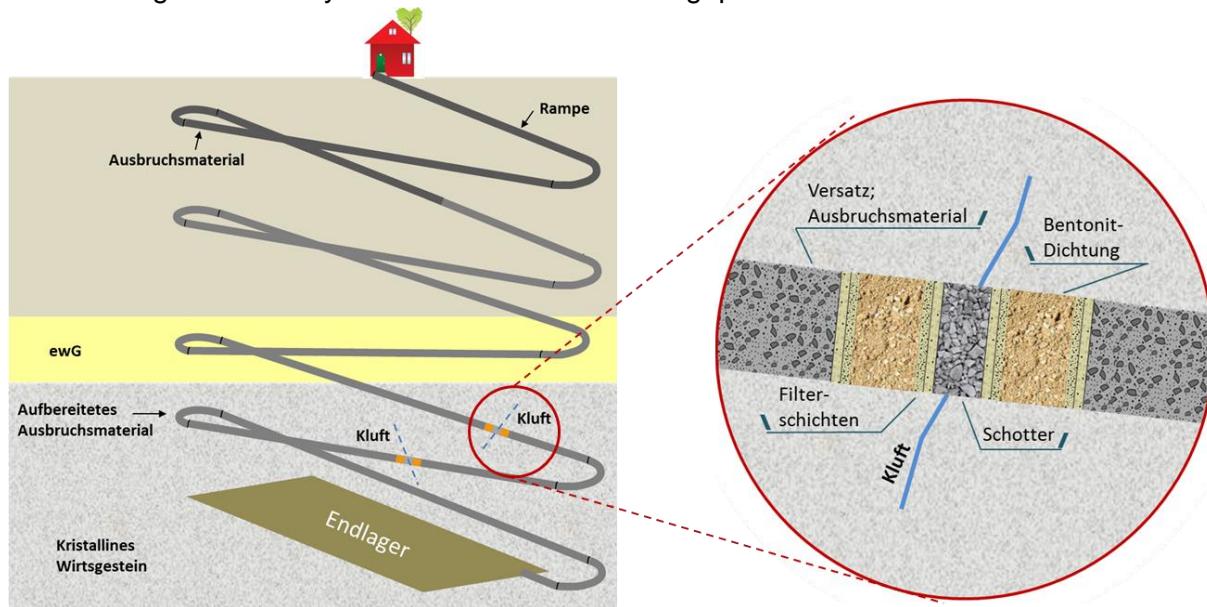


Abb. 4.8: Konzept für den Verschluss einer Rampe, speziell mit Kluftverschlüssen

Die Dichtung bzw. der Streckenverschluss innerhalb des ewG besteht aus drei Teilen (Abb. 4.9). Der Kern der Dichtung besteht aus einem langen Element aus arteigenem/autochthonem aufbereitetem Salzgrus, das beidseitig von Widerlagern aus Sorelbeton eingespannt wird. Zu beiden Seiten schließt sich dann jeweils ein Element bestehend aus einem Gemisch aus angefeuchtetem Salzgrus und feinem Bentonit (Bentonitmehl) an. Die Anfeuchtung verbessert das Kompaktionsverhalten des Salzgruses signifikant und das beigegebene Bentonitmehl beginnt durch die Feuchtigkeit zu quellen. Der Quelldruck ist zwar gering, aber die Porenräume im Salzgrus werden verstopft. Das dieses Vorgehen praktikabel ist, wurde im Rahmen von Laborversuchen und durch Untersuchungen an Dünnschliffen gezeigt (Kudla & Herold 2021, Jobmann 2018). Auch diese Elemente werden durch Widerlager aus Sorelbeton eingespannt.

An den Stellen, an denen die Rampe die Ränder des ewG durchstößt, werden Dichtelemente aus Asphalt implementiert. Deren Funktionsdauer ist limitiert auf den Zeitraum, den die Salzgrus-Elemente benötigen, um durch konvergenzbedingte Kompaktion ihre volle Dichtwirkung zu erreichen. Ein weiteres Modul des Rampenverschlusses, das sogenannte Trennmodul aus Bentonit, dient in erster Linie dazu, vorhandene (Kluft-)Aquifere voneinander zu trennen, die ansonsten über die Rampe miteinander hydraulisch kurzgeschlossen wären. Dies ist eine bergrechtliche Auflage (OCZ, 1996). Im Hangenden des ewG minimieren sie den Zutritt von Deckgebirgslösungen in das Grubengebäude. Der übrige Teil der Rampe wird zur mechanischen Stabilisierung mit schotterförmigem (aufbereitetem) Ausbruchsmaterial verfüllt.

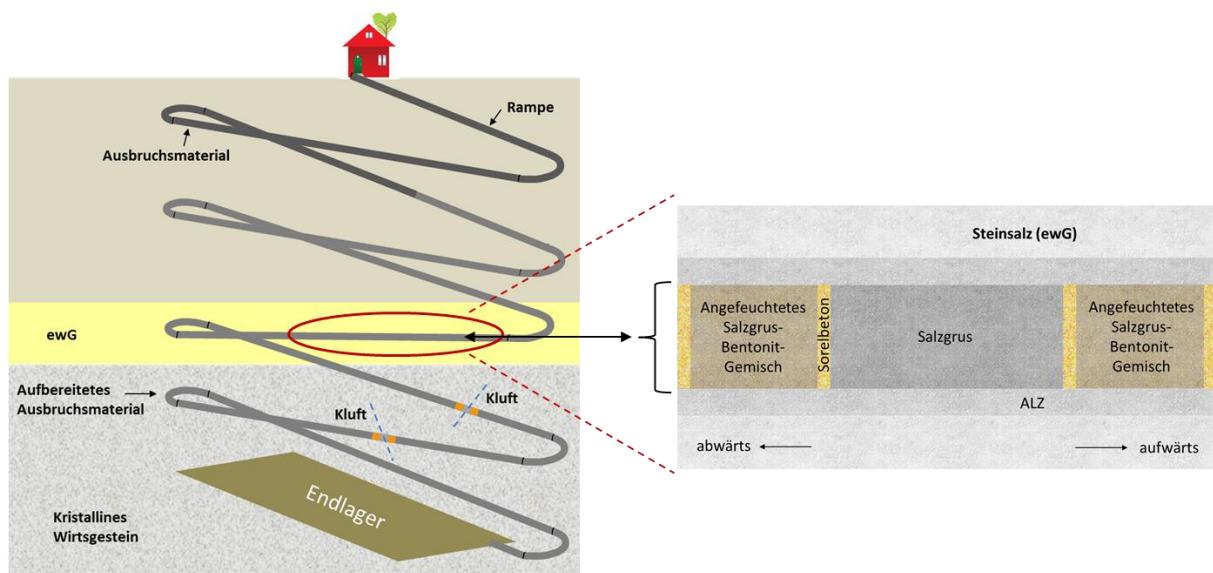


Abb. 4.9: Konzept für den Verschluss einer Rampe, speziell im Bereich des überlagernden ewG

Die Sicherheitsfunktion eines Rampenverschlusses innerhalb des ewG wird wie folgt definiert.

Sicherheitsfunktion: Der Rampenverschluss innerhalb des ewG soll in Ergänzung zur ewG-Formation den Einschluss der Radionuklide im Bewertungszeitraum gewährleisten.

Die spezifische Funktion des Rampenverschlusses ist es, Fluidbewegungen innerhalb der ewG-Durchörterungen zu minimieren. Damit sind die folgenden Leistungsziele verbunden:

Salzgrus-Dichthelement

Leistungsziel 1: Das Salzgrus-Dichthelement soll nach Abschluss der Kompaktion das Fluiddruck-Kriterium im verbleibenden Bewertungszeitraum erfüllen.

Leistungsziel 2: Das Salzgrus-Dichthelement soll nach Abschluss der Kompaktion im Bewertungszeitraum eine integrale Permeabilität besitzen, die folgende Ungleichung innerhalb des ewG erfüllt: $k \leq 10^{-18} m^2$

Sorelbeton-Widerlager/Dichthelemente

Leistungsziel 1: Die Sorelbeton-Widerlager/Dichthelemente sollen bis zu dem Zeitpunkt an dem sowohl das Salzgrus-Dichthelement als auch die Salzgrus-Bentonit-Gemisch-Dichthelemente ihre volle Dichtwirkung erreicht haben, eine integrale Permeabilität besitzen, die folgende Ungleichung erfüllt: $k \leq 10^{-18} m^2$

Leistungsziel 2: Die Sorelbeton-Widerlager/Dichthelemente sollen innerhalb der transienten Phase der Endlagerentwicklung lagestabil sein, damit die geschlossenen Dichthelemente durch das Aufkriechen des Gebirges an Ort und Stelle kompaktiert werden und dem Druck nicht durch laterale Deformation ausweichen können.

Salzgrus-Bentonit-Gemisch-Dichtelemente

Leistungsziel: *Die Dichtelemente aus Salzgrus-Bentonit-Gemisch sollen nach Abschluss der Aufsättigung mit Lösung eine integrale Permeabilität besitzen, die folgende Ungleichung erfüllt: $k \leq 10^{-18} \text{ m}^2$*

Asphalt-Dichtelemente

Leistungsziel: *Die Asphalt-Dichtelemente sollen eine integrale Permeabilität erreichen, die folgende Ungleichung erfüllt: $k \leq 10^{-19} \text{ m}^2$*

Die Schutzfunktion eines Rampenverschlusses außerhalb des ewG wird wie folgt definiert:

Schutzfunktion: *Der Rampenverschluss außerhalb des ewG soll generell eine Fluid-migration innerhalb einer Rampe minimieren.*

Eine spezifische Funktion des Rampenverschlusses außerhalb des ewG ist, den Anstrom von Fluiden auf die Dichtelemente innerhalb des ewG zu minimieren. Eine andere spezifische Funktion ist die Vermeidung von hydraulischen Kurzschlüssen zwischen unterschiedlichen Grundwasserhorizonten und/oder (Kluft-)Aquiferen. Mit diesen Funktionen sind die folgenden Leistungsziele verbunden:

Bentonit-Dichtelemente

Leistungsziel 1: *Die Bentonit-Elemente sollen nach erfolgter Aufsättigung mit Lösung eine Permeabilität erreichen, die folgende Ungleichung erfüllt: $k \leq 1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$*

Nach Fertigstellung des vollständigen Verschlussystems ist diese Arbeitshypothese durch Prozessanalysen zu verifizieren und das Leistungsziel ggf. anzupassen.

Leistungsziel 2: *Die Bentonit-Dichtelemente sollen nach erfolgter Aufsättigung mit Lösung einen Quelldruck erreichen, der folgende Gleichung erfüllt: $p_q \approx 0,5 \text{ MPa}$*

Nach Fertigstellung des vollständigen Verschlussystems ist diese Arbeitshypothese durch Prozessanalysen zu verifizieren und das Leistungsziel ggf. anzupassen.

Filterschichten

Leistungsziel: *Die Filterschichten sollen einen geeigneten Porositätsgradienten zwischen dem Versatzmaterial und dem Bentonit besitzen.*

Aufsättigungskammern (im Kluftbereich)

Leistungsziel: *Die Aufsättigungskammer soll einen geeigneten Porenraum besitzen, um ausreichend Lösung aufnehmen und zur Aufsättigung der Bentonit-Elemente bereitstellen zu können.*

Versatz aus aufbereitetem Ausbruchsmaterial

Leistungsziel: Der schotterförmig aufbereitete Versatz soll auch bei erfolgter Quelldruckentwicklung der Bentonit-Elemente eine Setzungsarmut bzw. eine so geringe Kompaktion besitzen, dass folgende Ungleichung für das Bentonit-Versatz-Element erfüllt ist: $\Delta L/L \leq 3\%$

Designanforderungen:

Damit die eben aufgeführten Leistungsziele für die einzelnen Funktionselemente erreicht werden können, werden für diese Elemente Designanforderungen erstellt. Für das Referenzmaterial (Ca-Bentonit Typ Salzdetfurth, vgl. Kap. 2.3.1) wird als Arbeitshypothese davon ausgegangen, dass die Trockendichte bei $\rho \approx 1.650 \text{ kg m}^{-3}$ liegen sollte, um einen Quelldruck von 0,5 MPa zu erreichen. Je nach verwendeter Bentonitsorte bzw. Smektitgehalt ist dieser Wert zu prüfen und ggf. anzupassen. Inwieweit ein Nachschnitt der Kontur erforderlich ist, muss vor Ort anhand des Zustandes der ALZ geprüft und entschieden werden.

Für die Filterschichten ist ein lagenweiser Einbau von granularem Material mit unterschiedlichen Korngrößen vorzusehen.

Für die Sorelbeton Widerlager bzw. Dichtelemente ist ein flüssiger Einbau ohne lange Wartezeiten vorzusehen, um eine Ausbildung von Grenzflächen im Bauwerk weitestgehend zu vermeiden. Sie sollten eine kohäsive Anbindung an das Barrieregestein besitzen. Für das Salzgrus-Dichtelement und die Salzgrus-Bentonit-Gemisch-Dichtelemente ist ein lagenweises Einbringen unter bestmöglicher in-situ (Rüttel-) Verdichtung (ggf. schräge Lagen) vorzusehen.

Für die Errichtung der Asphalt-Elemente sollte ein Kalteinbau in Blockform vorgesehen werden. Eine Monolithisierung erfolgt durch den Druck der Blöcke selbst, also das Eigengewicht, und zum anderen durch den Druckaufbau durch die anliegenden Materialien sowie dem Aufkriechen des Gebirges. Inwieweit ein Nachschnitt der Kontur erforderlich ist, muss vor Ort anhand des Zustandes der ALZ geprüft und entschieden werden.

4.3 Gesamtes Verschlussystem mit Sicherheitsfunktionen und Leistungszielen

Die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Verschlussbauwerke werden zu einem Gesamtverschlussystem zusammengeführt. Das Verschlussystem besteht demnach aus dem Buffer in den Einlagerungsstrecken mitsamt dem Abschlusswiderlager an den Verbindungen zu den Querschlägen, dem Versatz in den Querschlägen und Zugangsstrecken und dem Verschluss der Tageszugänge in Form von Schächten und/oder Rampen.

Analog zu den Angaben bei der Option „multipler ewG“ wird auch hier unterschieden zwischen Sicherheitsfunktionen und Schutzfunktionen (vgl. Kap. 2.2.2). In den nachfolgenden Tabellen (Tab. 4.1 und Tab. 4.2) wird ein Überblick gegeben über die einzelnen Komponenten des Verschlussystems und den ihnen jeweils zugeordneten Sicherheits- oder Schutzfunktionen. Damit die Sicherheits- oder Schutzfunktionen von den einzelnen Komponenten auch übernommen werden können, muss jede Komponente bestimmte Leistungsanforderungen erfüllen. Diese sind ebenfalls als Leistungsziele in Form von Parametern in der Grafik und der Tabelle mit aufgeführt.

Tab. 4.1: Überblick über entscheidende Komponenten des Verschlusskonzeptes sowie deren Sicherheitsfunktionen bzw. Schutzfunktionen und die zugehörigen Leistungsziele

Komponente	Wesentliche Barrieren			Weitere Barrieren			
	Innerhalb des ewG	Außerhalb des ewG	Behälter	Schacht-/Rampenverschluss	Buffer	Versatz	Abschlusswiderlager
<i>Sicherheitsfunktion oder Schutzfunktion</i>	Einschluss der Radionuklide im Bewertungszeitraum	Einschluss der Radionuklide im Bergungszeitraum	Einschluss der Radionuklide im Bergungszeitraum		Minimierung der Fluidbewegung im Grubengebäude		
Funktionselemente	Steinsalz	Salzgrus (+Bentonit); Sorelbeton	Pollux-Behälter	Salzbeton, Bentonit, Bitumen, Schotter, Sorelbeton, Bischofit	Bentonitgranulat	Ausbruchsmaterial Bentonit-Gemisch	Niedrig-pH-Beton
Spezifische Funktion	= SF	Minimierung einer Fluidbewegung innerhalb der ewG-Durchörterungen	= SF	Anstrom-Minimierung auf Dichtelemente im ewG aus dem Deckgebirge; Vermeidung von hydraulischen Kurzschlüssen	Minimierung einer Fluidbewegung innerhalb der Einlagerungsstrecken; Rückhaltung von Radionukliden	Minimierung einer Fluidbewegung innerhalb der Zugangsstrecken	Gewährleistung der Lagerstabilität von Buffer und Versatz in den Strecken
Spezifische Leistungsziele		Permeabilität $\leq 10^{-19} \text{ m}^2$; Erfüllung des Fluideindruck-Kriteriums	Mechanisch handhabbar; Erfüllung des Verformungskriteriums bis 500 Jahre; Einschluss radioaktiver Aerosole bis 500 Jahre	$\text{at} \leq 10^{-16} \text{ m}^2$	Kraftschluss zum Gebirge Permeabilität $\leq 10^{-16} \text{ m}^2$ Quelldruck $\geq 0,5 \text{ MPa}$	Kraftschluss zum Gebirge Permeabilität $\leq 10^{-16} \text{ m}^2$ Quelldruck $\geq 0,5 \text{ MPa}$	Lagestabil; Gering permeabel
<p><i>Bei den Zahlenwerten handelt es sich um Arbeitshypothesen, die durch Analysen noch zu verifizieren sind</i></p>							

Die darin angegebenen Zahlenwerte sind zunächst als Arbeitshypothesen zu verstehen, die im Zuge der Integritätsanalysen zu konkretisieren sind. Diese Leistungsziele wiederum können nur erreicht werden, wenn an die Konstruktion der Komponenten spezifische Anforderungen formuliert werden, die unter Einhaltung einer Qualitätssicherung im Zuge der Konstruktion umgesetzt werden. Diese Konstruktionsanforderungen sind in Tab. 4.2 ebenfalls angegeben. Die Leistungsziele bzgl. der Permeabilität und des zugehörigen Quelldruckes für die Bentonit-Dichtelemente wurden aus dem in-situ Experiment „Schachtverschluss Salzdorf“ und dem entsprechenden Stoffmodell abgeleitet (Jobmann 1998 und 2002).

Tab. 4.2: Überblick über Sicherheitsfunktionen (rot) bzw. Schutzfunktionen (blau) sowie die zugehörigen Leistungsziele und Designanforderungen an die Komponenten

Komponente	Sicherheitsfunktion	Leistungsziel	Designanforderung
Behälter	<i>Einschluss der Radionuklide im Bergungszeitraum</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziel	Designanforderung
Stahlbehälter	Tragfunktion; Schutz des Abfallinventars gegenüber mechanischen Lasten (Umgebungsdruck ggf. asymmetrisch, Scherbeanspruchung); Gewährleistung der Unterkritikalität (innere Struktur des Behälters)	Hohe mechanische Festigkeit; Geringes Deformationsvermögen; Geringe korrosive Gasbildungsraten; Mechanisch handhabbar über den Bergungszeitraum von 500 Jahren	Stahlsorte und Wandstärken sind gegen die zu erwartenden Lasten im Bewertungszeitraum auszulegen

Überlagernder ewG	<i>Einschluss der Radionuklide im gesamten Bewertungszeitraum von 1 Million Jahre</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziele	Designanforderung
Barrieregestein	Einschluss der Radionuklide Im Bewertungszeitraum	Keine Verletzung der Integrität im Bewertungszeitraum	Festlegung des ewG so, dass eine ausreichende Ausdehnung, Tieflage und Mächtigkeit des Barrieregesteins gewährleistet ist
Schachtverschluss	<i>Einschluss der Radionuklide im Zusammenspiel mit dem ewG im gesamten Bewertungszeitraum</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziel	Designanforderung
Sockelelement aus Bitumenverfüllter Schottersäule	Gewährleistung der Lagestabilität der darüber liegenden Verschlusselemente. Minimierung einer Fluidbewegung innerhalb des Schachtes, insbesondere Minimierung des Eindringens von Fluiden aus dem Hangenden für den Zeitraum, den der Streckenversatz für ein vollständige Sättigung benötigt.	Geringe Komprimierbarkeit bzw. Setzungssarmut Permeabilität $\leq 10^{-19} \text{ m}^2$ (transiente Phase)	<u>Schotter:</u> Einbringtechnologie über Fördergefäß mit Bodenentleerung bei festgeschriebener Fallhöhe. <u>Bitumen:</u> Heißeinbau des Bitumens durch lagenweises Einbringen in den Schotter mit festgeschriebenen Lagenhöhen.
Widerlager aus Anhydrit-Mörtel	Gewährleistung der Lagestabilität der darüber liegenden Verschlusselemente	Mechanische Festigkeit in der Größenordnung des umgebenden Gebirges (nicht größer)	Lagenweiser Einbau
Bischofit	Pufferung NaCl-haltiger Lösungen, so dass sie für das Sorelbeton-Dichtelement verträglich sind und nicht zu Korrosionserscheinungen führen.		Lagenweiser Einbau ober- und unterhalb des Sorelbeton-Dichtelementes.
Sorelbeton-Dichtelement	Minimierung einer Fluidbewegung entlang eines Schachtes im Bereich der Barriereformation	Permeabilität $\leq 10^{-18} \text{ m}^2$ Expansionsdruck $\geq 1 \text{ MPa}$	Heißer flüssiger Einbau ohne lange Wartezeiten um eine Ausbildung von Grenzflächen weitestgehend zu vermeiden. Kohäsive Anbindung an das Barrieregestein.
Salzbeton-Dichtelement	Minimierung einer Fluidbewegung entlang eines Schachtes im Bereich des Überganges vom Deckgebirge zur Barriereformation; speziell zur Minimierung eines Anstroms NaCl-dominierter Lösung auf das Sorelbeton-Dichtelement.	Permeabilität $\leq 10^{-18} \text{ m}^2$	Heißer flüssiger Einbau ohne lange Wartezeiten um eine Ausbildung von Grenzflächen innerhalb des Bauwerkes weitestgehend zu vermeiden. Kohäsive Anbindung an das Barrieregestein.
Bitumenverfüllte Schottersäule	Minimierung einer Fluidbewegung innerhalb des Schachtes. Verhinderung eines schnellen Eindringens von Lösungen aus hangenden Aquiferen.	Permeabilität $\leq 10^{-19} \text{ m}^2$ (transiente Phase)	<u>Schotter:</u> Einbringtechnologie über Fördergefäß mit Bodenentleerung bei festgeschriebener Fallhöhe. <u>Bitumen:</u> Heißeinbau des Bitumens durch lagenweises Einbringen in den Schotter mit festgeschriebenen Lagenhöhen.
Schotter	Durchlass der Aquiferströmung und damit Vermeidung von Änderungen der hydraulischen Druckbedingungen im angrenzenden Deckgebirge.	Hohe Porosität und Permeabilität. Setzungssarmut	<u>Schotter:</u> Einbringtechnologie über Fördergefäß mit Bodenentleerung bei festgeschriebener Fallhöhe.
Filterschichten	Minimierung von Erosionserscheinungen, speziell der Ausbildung lokaler Fließkanäle (Pipes) am Bentonit-Dichtelement.	Homogenisierung bzw. flächenhafte Verteilung des hydraulischen Druckaufbaus an den Stirnflächen des Bentonit-Dichtelementes.	Lagenweiser Einbau von Schichten aus granularem Material mit unterschiedlichen Korngrößen.

Bentonit-Dichtelement	Verhinderung eines hydraulischen Kurzschlusses von Aquiferen in unterschiedlichen Tiefenlagen im Deckgebirge über die Schachtröhre.	Permeabilität $\leq 10^{-17} \text{ m}^2$ Quelldruck 1 MPa Frei von Zugspannungen: $\sigma_{\text{III}}(\text{eff}) \geq 0$.	Mittlere Einbautrockendichte $\geq 1.750 \text{ kg m}^{-3}$ Vorkompaktierte Blöcke (Trockendichte $\geq 2.000 \text{ kg m}^{-3}$) mit Bentonitmehl als Füllmaterial für technische bedingte Resthohlräume.
Versatz bis GOK	Keine	Keine	Keine
Rampenverschluss	<i>Einschluss der Radionuklide im Zusammenspiel mit dem ewG im gesamten Bewehrungszeitraum</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziel	Designanforderung
Widerlager Sorelbeton	Gewährleistung der Lagestabilität der Dichtelemente aus Salzgrus und Salzgrus-Bentonit-Gemisch.	Mechanische Festigkeit in der Größenordnung des umgebenden Gebirges (nicht größer)	Heißer flüssiger Einbau ohne lange Wartezeiten um eine Ausbildung von Grenzflächen im Bauwerk weitestgehend zu vermeiden. Kohäsive Anbindung an das Barrierefestein.
Salzgrus-Bentonit-Dichtung	Minimierung einer Fluidbewegung entlang einer Rampe innerhalb des ewG	Permeabilität $\leq 10^{-17} \text{ m}^2$ (nach transienter Phase)	Einbringung einer vorgefertigten Mischung unter bestmöglicher in-situ (Rüttel-) Verdichtung (ggf. schräge Lagen)
Salzgrus	Minimierung der Fluidbewegung entlang einer Rampe innerhalb des ewG	Permeabilität $\leq 10^{-17} \text{ m}^2$ (nach transienter Phase)	Lagenweises Einbringen unter bestmöglicher in-situ (Rüttel-) Verdichtung (ggf. schräge Lagen)
Asphalt-Dichtelemente an den Rändern des ewG	Minimierung druckgetriebener Fluidbewegung innerhalb der Rampe bis die Dichtelemente im ewG ihre volle Dichtwirkung erreicht haben.	Permeabilität $\leq 10^{-19} \text{ m}^2$	Kalteinbau in Blockform. Monolithisierung durch Druck. Ggf. Nachschmitt der Kontur erforderlich.
Salzgrusversatz innerhalb der Rampe im Bereich der Barriereförderung	Vermeidung von Auflockerungen der Streckenkontur durch Lastaufnahme bei langfristig zu erwartender Konvergenz. Reduzierung druckgetriebener Fluidbewegung innerhalb der Rampe.	Porosität $\leq 30 \%$ Permeabilität $\leq 10^{-15} \text{ m}^2$ (nach transienter Phase)	Blasversatz
Bentonit-Dichtelemente unter und oberhalb von Aquiferen	Verhinderung eines hydraulischen Kurzschlusses zwischen Aquiferen in unterschiedlichen Tiefenlagen .	Permeabilität $\leq 10^{-17} \text{ m}^2$ Quelldruck 1 MPa Frei von Zugspannungen: $\sigma_{\text{III}}(\text{eff}) \geq 0$.	Mittlere Einbautrockendichte $\geq 1.750 \text{ kg m}^{-3}$ Vorkompaktierte Blöcke (Trockendichte $\geq 2.000 \text{ kg m}^{-3}$) mit Bentonitmehl als Füllmaterial für technische bedingte Resthohlräume.
Schotter im Bereich von Aquiferen	Geringe Beeinflussung der Aquiferströmung und damit Vermeidung von Änderungen der hydraulischen Druckbedingungen z. B. im angrenzenden Deckgebirge.	Hohe Porosität und Permeabilität. Setzungsarmut	Schotter: Einbringtechnologie über Fördergefäß mit Bodenentleerung bei festgeschriebener Fallhöhe.
Filterschichten	Minimierung von Erosionsscheinungen, speziell der Ausbildung lokaler Fließkanäle (Pipes) am Bentonit-Dichtelement.	Homogenisierung bzw. flächenhafte Verteilung des hydraulischen Druckaufbaus an den Stirnseiten des Bentonit-Dichtelementes.	Lagenweiser Einbau von granularem Material mit unterschiedlichen Korngrößen.
Versatz bis GOK	Vermeidung von Auflockerungen der Streckenkontur durch Lastaufnahme bei langfristig zu erwartender Konvergenz.	Porosität $\leq 30 \%$ Permeabilität $\leq 10^{-15} \text{ m}^2$ Quelldruck $\geq 0,2 \text{ MPa}$	Einbau z. B. mit Verdichterplatten zur Erzeugung einer mittleren Einbaudichte von $\geq 1.500 \text{ kg m}^{-3}$.

Komponente	Schutzfunktion		
Buffer	<i>Minimierung der Fluidbewegung im Grubengebäude</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziel	Designanforderung
Bentonit Granulat	Ausfüllung der verbleibenden Hohlräume um die Behälter in den Einlagerungsstrecken	Permeabilität $\leq 10^{-16} \text{ m}^2$ Quelldruck 0,5 MPa mit Kraftschlussbildung zum Gebirge	Mittlere Trockendichte des granularen Bentonits $\geq 1.650 \text{ kg m}^{-3}$
Bentonit Auflager	Gewährleistung einer standfesten Auflage für die Behälter in den Einlagerungsstrecken	Permeabilität $\leq 10^{-16} \text{ m}^2$	Vorkompaktierte Blöcke; Mittlere Trockendichte des Bentonits 2.000 kg m^{-3}
Versatz	<i>Minimierung der Fluidbewegung im Grubengebäude</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziel	Designanforderung
Gemisch aus aufbereitetem Ausbruchsmaterial und Bentonit	Ausfüllung der Hohlräume in den Zugangsstrecken	Permeabilität $\leq 10^{-16} \text{ m}^2$ Quelldruck 0,5 MPa mit Kraftschlussbildung zum Gebirge	
Kluftzonenverschluss im Wirtsgestein	<i>Minimierung erosiver Fluidbewegungen in den versetzten Strecken</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziel	Designanforderung
Bentonitdichtung	Minimierung advektiv getriebener Fluidbewegung innerhalb der Rampe.	Permeabilität $\leq 10^{-17} \text{ m}^2$ Quelldruck 1 MPa Frei von Zugspannungen: $\sigma_{\text{III}}(\text{eff}) \geq 0$.	Mittlere Einbautrockendichte $\geq 1.750 \text{ kg m}^{-3}$ Vorkompaktierte Blöcke (Trockendichte $\geq 2.000 \text{ kg m}^{-3}$) mit Bentonitmehl als Füllmaterial für technisch bedingte Resthohlräume.
Aufsättigungskammer	Hohe Aufnahmefähigkeit für Flüssigkeit zur großflächigen Weitergabe an die anschlossene Bentonitdichtung über Filterschichten	Porosität $\geq 35 \%$	Schotter
Bentonitdichtung	Minimierung advektiv getriebener Fluidbewegung innerhalb der Rampe.	Permeabilität $\leq 10^{-17} \text{ m}^2$ Quelldruck 1 MPa Frei von Zugspannungen: $\sigma_{\text{III}}(\text{eff}) \geq 0$.	Mittlere Einbautrockendichte $\geq 1.750 \text{ kg m}^{-3}$ Vorkompaktierte Blöcke
Filterschichten An den Stirnseiten der Dichtelemente	Minimierung von Erosionsscheinungen, speziell der Ausbildung lokaler Fließkanäle (Pipes) an den Bentonit-Dichtelementen.	Homogenisierung bzw. flächenhafte Verteilung des hydraulischen Druckaufbaus an den Stirnseiten der Bentonit-Dichtelemente.	Lagenweiser Einbau von Schichten aus granularem Material mit unterschiedlichen Korngrößen.

5 Einlagerungs- und Verschlusskonzept für das modifizierte KBS-3-Konzept

Bei dem modifizierten KBS-3-Konzept hat das Wirtsgestein, in dem das Endlagerbergwerk errichtet wird, hinsichtlich des Einschlusses keine nachweisrelevante Bedeutung. Es dient durch seine Standfestigkeit in erster Linie dem Schutz der Behälter und des zugehörigen Buffers. Diese beiden Komponenten stellen den geforderten sicheren Einschluss her, wobei der Buffer die Einschlussfunktion der Behälter unterstützt (s.u.). Die Erschwerung eines späteren menschlichen Eindringens (Human Intrusion) und damit eine erschwerte Erreichbarkeit der eingelagerten Behälter werden als weitere Funktion des Wirtsgesteins angesehen. Abb. 5.1 zeigt die dementsprechende Einteilung in wesentliche und weitere Barrieren, die im Folgenden weiter erläutert wird.

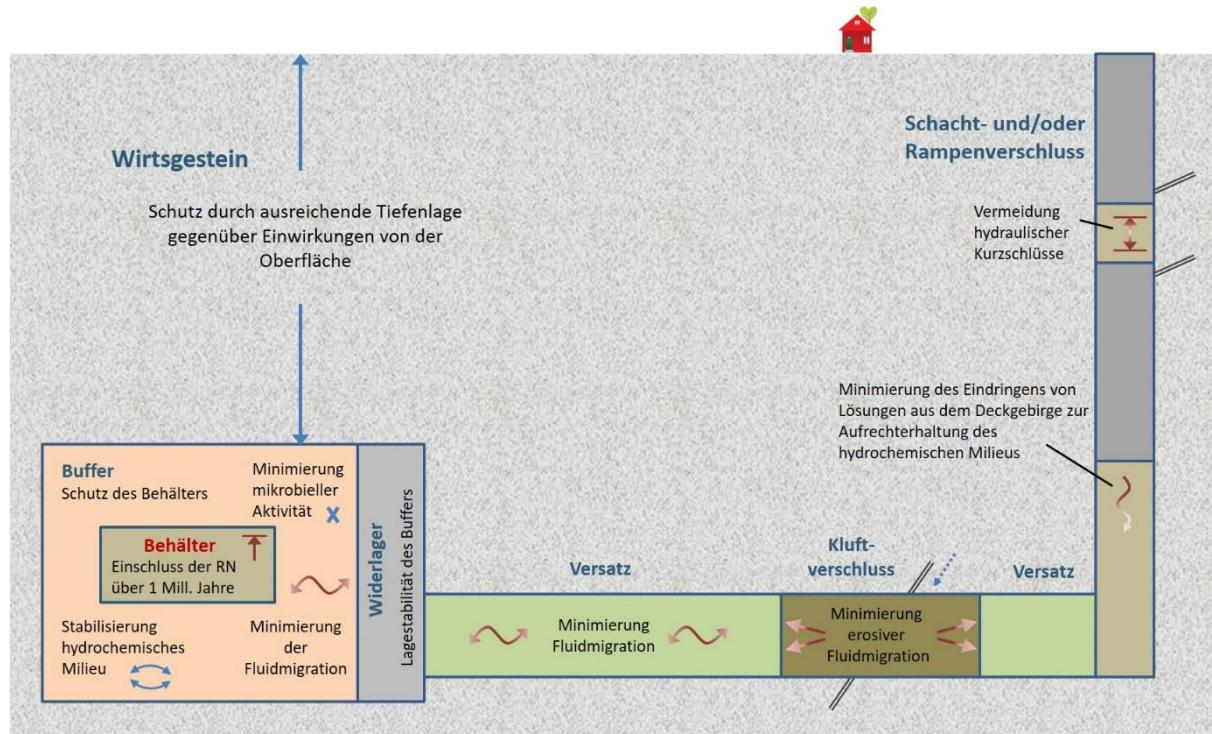


Abb. 5.1: Schematisierte Einteilung des Barrierensystems in wesentliche (rot) und weitere Barrieren (blau) für die Option "modifiziertes KBS-3" Konzept

Die Konfiguration zur Einlagerung in kurzen vertikalen Bohrlöchern ist in Abb. 5.2 dargestellt. Die Einlagerungsbohrlöcher haben eine Tiefe von etwa 11 m und einen Durchmesser von 1,20 m. Befüllt werden die Bohrlöcher zunächst mit zylinderförmigen Buffer-Platten und Buffer-Ringen aus hoch-kompaktiertem Bentonit.

Oberhalb der abschließenden Bentonitplatte wird zunächst eine Filterschicht aufgebracht, die dafür sorgt, dass von oben eindringende Fluide flächig auf dem Bentonit verteilt werden. Dadurch wird ein gleichmäßiges Quellen des Bentonits an seiner Oberfläche erreicht. Lokales Quellen oder Kanalbildung sollen so verhindert werden. Darüber hinaus können Teile der Filterschicht leicht herausgelöst werden, um die Installation des Widerlagers zu vereinfachen. Das Widerlager, bestehend aus einzelnen Festgesteinssplügen, wird konisch im Gebirge verankert (Abb. 5.2). Ein eventueller Resthohlraum wird mit Versatzmaterial verfüllt. Das Widerlager entspricht dem Widerlager, wie es auch für die Einlagerung im Rahmen des Konzeptes „multipler ewG“ vorgesehen ist (vgl. Abb. 3.12).

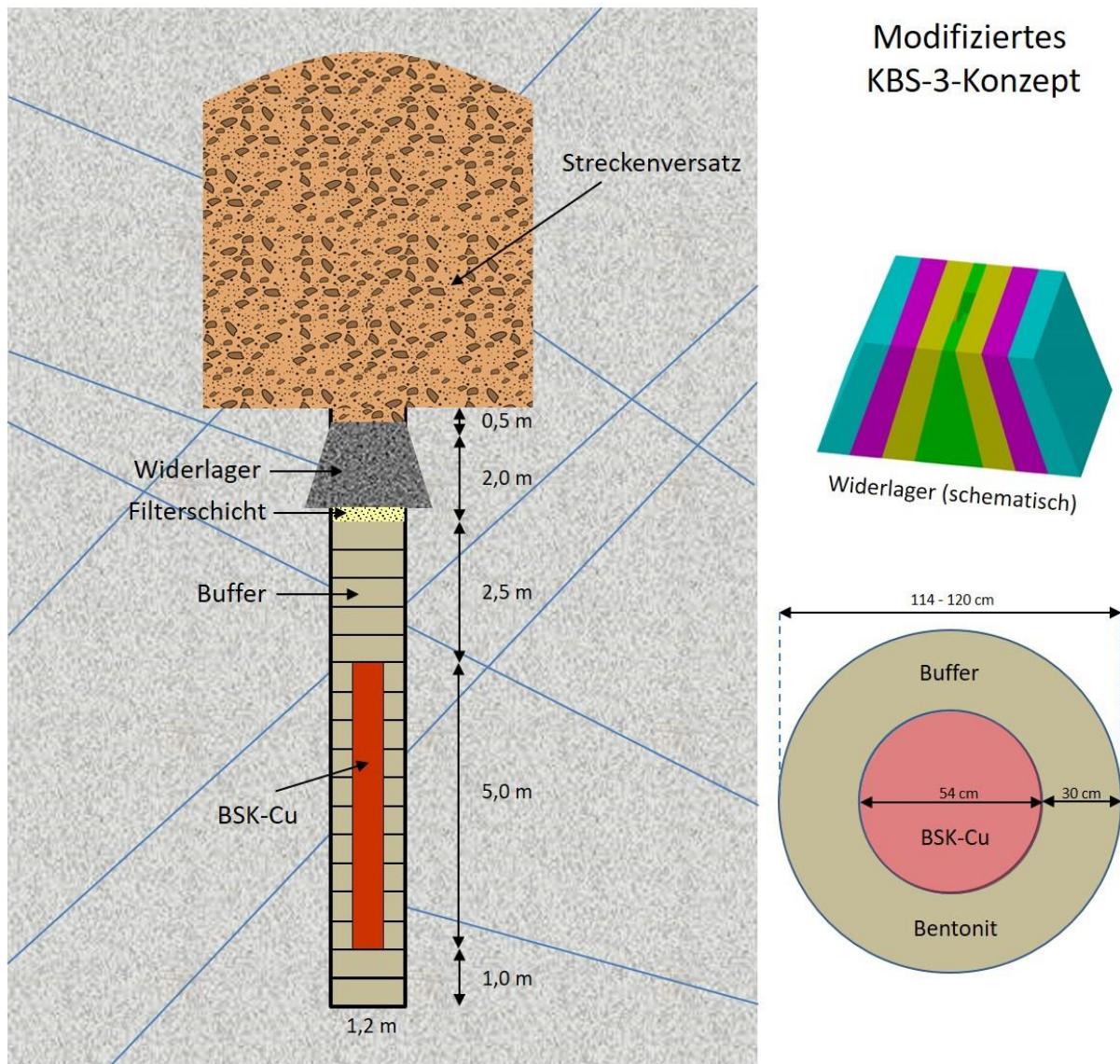


Abb. 5.2: Konfiguration zur Einlagerung gemäß dem modifizierten KBS-3 Konzept

5.1 Behälter

Die wesentliche Barriere in diesem Konzept stellt der Behälter dar. Bei dem modifizierten KBS-3 Konzept ist vorgesehen, die ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren und die radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in rückholbaren Kokillen in vertikale Bohrlöcher einzulagern. Für dieses Konzept soll eine Brennstab-Kokille (BSK-RCu) verwendet werden, die mit einer Kupferschicht von 50 mm ummantelt wird (Abb. 5.3). In der BSK-RCu kann ein Abfallgebindevolumen von ca. 1 m³ untergebracht werden. Mit Ausnahme der Dicke der Kupferhülle ist der Behälter identisch mit der rückholbaren Kokille des Konzeptes zum multiplen ewG. Auch bei der BSK-RCu handelt es sich um einen nicht abgeschirmten Behälter für dessen Handhabung und Transport ein Transferbehälter genutzt werden muss (Bertrams et al. 2017).



Abb. 5.3: Brennstabkokille für die Einlagerung im Rahmen der Option „modifiziertes KBS-3 Konzept“

Gemäß dem Sicherheitskonzept wird dem Behälter eine Sicherheitsfunktion zugeordnet (vgl. Kapitel 2.2.2). Diese lautet:

Sicherheitsfunktion: *Der Behälter soll den Einschluss der Radionuklide im gesamten Bewertungszeitraum gewährleisten.*

Mit Blick auf die Nachweisführung wird der Behälter in zwei Funktionselemente unterteilt, den inneren Stahlbehälter und die äußere Kupferhülle. Beiden Funktionselementen werden „spezifische Funktionen“ zugeordnet, die sie im Zuge der Nachweisführung erfüllen müssen. Der Stahlbehälter übernimmt die Tragfunktion und den mechanischen Schutz des Inventars. Der äußeren Kupferhülle wird die eigentliche Einschlussfunktion zugeordnet, da Kupfer eine sehr hohe Korrosionsresistenz hat. Im Hinblick auf diese Sicherheitsfunktion des Behälters werden für die Funktionselemente des Behälters folgende Leistungsziele festgelegt, die notwendig sind, um die Sicherheitsfunktion zu erfüllen.

Leistungsziel 1: *Der Stahlbehälter muss so ausgelegt sein, dass er den zu erwartenden Belastungen während des Bewertungszeitraumes standhalten kann und die Kriterien zur Tragfähigkeit und Verformungsbeständigkeit erfüllt.*

Leistungsziel 2: *Die Kupferhülle muss eine Korrosionsresistenz aufweisen, die gewährleistet, dass keine Freisetzung von Radionukliden im Bewertungszeitraum von 1 Million Jahre auftritt.*

Die in den Sicherheitsanforderungen geforderte mechanische Handhabbarkeit sowie den Einschluss radioaktiver Aerosole für den Bergungszeitraum von 500 Jahren ist durch diese Leistungsziele abgedeckt.

Designanforderungen:

Damit die aufgeführten Leistungsziele für die einzelnen Funktionselemente erreicht werden können, werden für diese Elemente Designanforderungen erstellt. Für den Stahlbehälter gilt, dass Stahlsorte und Wandstärken in einer Weise gewählt bzw. bemessen werden, dass er den zu erwartenden mechanischen Belastungen im Bewertungszeitraum ausreichend Widerstand entgegenzusetzen hat.

Für die Kupferhülle erscheint die Verwendung von geschmiedetem Kupfer erfolgsversprechend zu sein. Eine Dicke des Kupfermantels von 50 mm erscheint für das modifizierte KBS-3 Konzept ausreichend, um eine Korrosionsresistenz für den gesamten Bewertungszeitraum zu gewährleisten. Anders als beim Konzept „multipler ewG“ wird dem Gebirge hier keinerlei Einschlusssfunktion zugeordnet, so dass allein der Behälter im Bewertungszeitraum einschlusswirksam sein muss. Aus diesem Grund wurde die Dicke der Kupferschicht höher gewählt. Bei dieser Dicke von 50 mm können Schweißfehler noch zuverlässig detektiert werden, was für die Qualitätssicherung der Schweißnähte am Deckel wichtig ist. Bezuglich der Abschätzung der Korrosionsrate kann auf schwedische und kanadische Literatur neueren Datums zurückgegriffen werden. Dort werden Korrosionsraten von maximal 5 mm innerhalb von 10^6 Jahren als konservativ eingeschätzt (Kremer 2017, SKB 2010c).

Es wäre grundsätzlich auch möglich, Kupferschichten mittels des „Coating Verfahrens“ direkt auf den Stahlinneneinhälter aufzutragen, anstatt einen geschmiedeten Kupferbehälter zu verwenden. Bei diesem Verfahren wird Kupfer mittels Galvanisierung oder Kältespray-Verfahren direkt auf die Oberfläche des Behälters aufgebracht. Nach jetziger Kenntnis wurden dabei Schichtdicken von 3 mm erreicht. Diese Schichtdicke wird in Kanada als ausreichend abgeschätzt, um die Korrosion der Behälter unter den dort vorherrschenden Bedingungen und dem dort vorliegenden hydrochemischen Milieu im Endlager ausreichend zu behindern (Keech 2014). Zum einen ist diese Technologie für größere Schichtdicken (z. B. 50 mm) nach jetziger Kenntnis noch nicht eingesetzt worden und zum anderen ist das Coating Verfahren eine noch sehr junge Technologie, die zum jetzigen Zeitpunkt nicht abschließend bewertet werden kann.

5.2 Buffer

Eine weitere Barriere in diesem Konzept stellt der Buffer dar. Bei dem Buffer steht nicht die Barrierefunktion als solche im Vordergrund, also die Rückhaltung von Radionukliden, sondern die Unterstützung des Behälters in seiner Einschlusssfunktion. Da der Buffer den Behälter nur mit einer begrenzten Mächtigkeit einschließen kann, ist auch die Rückhaltefunktion des Buffers gegenüber Radionukliden sehr begrenzt. Die Schutzfunktion des Buffers wird wie folgt definiert:

Schutzfunktion: *Der Buffer soll den Behälter vor äußeren Einwirkungen schützen und ihn damit in seiner Einschlusssfunktion unterstützen.*

In diesem Zusammenhang werden dem Buffer mehrere „spezifische Funktionen“ zugeordnet. Die erste Funktion besteht darin, eine Migration von Lösungen sowohl zum Behälter hin als auch vom Behälter weg zu minimieren. Dadurch wird eine Stabilisierung des hydrochemischen Milieus ermöglicht, wodurch Korrosionsprozesse minimiert werden. Gleichzeitig wird sichergestellt, dass korrosionsfördernder Material-(Kolloid-), Lösungs- und Gastransport so gering wie möglich gehalten wird. In seiner zweiten Funktion soll der Buffer neben der hydrochemischen Korrosion auch die mikrobielle Korrosion minimieren. Mikrobielle Aktivitäten innerhalb des Buffers können chemische Elemente produzieren, die eine Kupferkorrosion beschleunigen können. Die diesbezüglich bedeutendsten Mikroben sind die Sulfat-reduzierenden Mikroben, die Sulfide produzieren. Voraussetzungen für signifikante mikrobielle Aktivitäten sind das Vorhandensein von freiem Wasser, Nährstoffen (z. B. Kohlenstoff) und ausreichendem Lebensraum.

Bezuglich mechanischer Einwirkungen soll der Buffer auch eine Schutzwirkung für den Behälter übernehmen, die dafür sorgt, dass auch bei eventuellen Scherverformungen des Wirtsgesteins auf seinen Kluftstrukturen diese Verformungen nicht direkt auf den Behälter übertragen

werden, sondern dass zunächst der Buffer die Verformungsenergie aufnimmt und somit nur abgeschwächt auf den Behälter überträgt. Eine weitere Funktion aus mechanischer Sicht besteht darin, den Behälter in seiner Position zu halten, so dass er weder einsinkt noch in eine Schieflage gerät, die einen direkten Kontakt mit dem Wirtsgestein zur Folge hat. Ungeachtet der Tatsache, dass die Rückhaltewirkung gering ist, soll der Buffer auch temporär in der Lage sein, Radionuklide zurückzuhalten, um deren Freisetzung zu verzögern. Mit Blick auf diese spezifischen Funktionen werden die Leistungsziele wie folgt festgelegt.

Leistungsziel 1: *Der Buffer soll nach Aufsättigung mit Lösung, also nach erfolgter Quellentwicklung, eine integrale Permeabilität von $k \leq 10^{-18} \text{ m}^2$ besitzen.*

Bei diesem Wert handelt es sich um eine Arbeitshypothese basierend auf Erfahrungswerten. Nach Fertigstellung des vollständigen Verschlussystems ist diese Arbeitshypothese durch Prozessanalysen zu verifizieren und das Leistungsziel ggf. anzupassen.

Leistungsziel 2: *Der Buffer soll nach Abschluss der Aufsättigung mit Lösung einen Quelldruck von $p_q \geq 2 \text{ MPa}$ entwickeln.*

Dieser Wert entstammt Untersuchungsergebnissen von Posiva und SKB aus Finnland und Schweden, die besagen, dass oberhalb eines Quelldruckes von 2 MPa die mikrobiellen Aktivitäten deutlich limitiert sind (Bengtsson et al. 2015). Dieser Quelldruck geht einher mit einer durch Kompaktion erzielten hohen Trockendichte und damit geringen Porosität, die gleichzeitig den Lebensraum für Mikroben stark limitiert.

Designanforderungen:

Damit die aufgeführten Leistungsziele erreicht werden können, ist die Verwendung hochkompakter zylindrischer Bentonit-Formsteine (Ringe und Scheiben) notwendig. Die Herstellbarkeit derartiger Formsteine wurde im Zuge des schwedischen Endlagerprogramms bereits gezeigt.

Für das Referenzmaterial Ca-Bentonit (vgl. Kap. 2.3.1) wird als Arbeitshypothese davon ausgegangen, dass die Trockendichte der kompaktierten Blöcke bei $\rho \geq 2.000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ liegen sollte, um einen Quelldruck von 2 MPa zu erreichen. Je nach verwendeter Bentonitsorte ist dieser Dichtewert zu prüfen und ggf. anzupassen. Die zylinderförmigen Blöcke haben eine Höhe von 30 cm. Nach Einbringung eines jeden zylindrischen Blockes oder Ringes wird eine dünne Schicht Bentonitmehl eingebracht, das dazu dient, die radialen Toleranzen, zumindest an den Schnittstellen der zylindrischen Blöcke, zu überbrücken, um einen Kontakt mit dem Gebirge herzustellen und damit eine kapillare Wasseraufnahme aus dem umgebenden Gestein zu initiieren. Die integrale Einbautrockendichte, also kompakte Blöcke und Bentonitmehl zusammen betrachtet, sollte bei $\rho \geq 1.750 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ liegen. Auch dieser Wert ist als Arbeitshypothese zu verstehen und entsprechend zu verifizieren.

5.3 Bohrlochwiderlager

Die Verwendung eines Bohrlochwiderlagers steht in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Buffer. Die Schutzfunktion des Bohrlochwiderlagers wird daher folgendermaßen definiert:

Schutzfunktion: *Gewährleistung der Lagesetzung des Buffers und Behälters innerhalb der Einlagerungsbohrung im gesamten Bewertungszeitraum*

Die spezifische Funktion des Widerlagers ist die Vermeidung einer inneren Auflockerung des Buffers durch den Quellprozess. Würde es zu einer signifikanten Verschiebung des Widerlagers beispielsweise durch die Quelldruckentwicklung des Buffers kommen, würde dies zu einer inneren Auflockerung des Buffers führen und seine Eigenschaften verändern. Wenn die Auflockerung des Buffers weniger als 3 % (Volumen) beträgt, verändern sich die Dichte und damit der erreichbare Quelldruck und die damit verbundene Permeabilität nicht wesentlich (Wagner 2005). Werden die 3 % überschritten, ist mit einer signifikanten Verringerung des Quelldrucks und einer damit verbundenen Erhöhung der Permeabilität zu rechnen. Als Leistungsziel für das Widerlager wird daher definiert:

Leistungsziel: *Das Widerlager soll auch bei erfolgter Quelldruckentwicklung des Buffers seine Position derart wahren, dass folgende Ungleichung für den Buffer erfüllt ist: $\Delta L/L \leq 3\%$*

Designanforderung:

Das Bohrlochwiderlager (Abb. 5.4) besteht aus Festgesteinblöcken und sollte kegelförmig konzipiert und eingesetzt werden (Herold 2019). Das Widerlager besteht aus einzelnen Festgesteinblöcken, wobei die mittleren Steine kegelförmig präpariert werden, um bei Druckbelastung von unten die gewünschte Gewölbewirkung zu erzielen. Abb. 5.4 zeigt das Widerlager in seinen einzelnen Teilen. Der mittlere kegelförmige Stein, der als Letzter eingesetzt wird, muss zunächst tiefer gesetzt werden. Dazu ist eine Aussparung innerhalb der darunter liegenden Filterschicht vorzusehen. Durch den auf diese Weise geschaffenen Hohlraum im Bereich des mittleren Steins, wird künstlich Lösung der Filterschicht zugeführt. Die Filterschicht sorgt dafür, dass die Lösung sich gleichmäßig auf der Bentonitoberfläche verteilt. Das Bentonit nimmt die Lösung auf und beginnt zu quellen. Der mittlere Stein wird ggf. hochgezogen und (temporär) fixiert. Der zuvor geschaffene Hohlraum in der Filterschicht wird durch das Quellen des Bentonit zgedrückt und speziell der mittlere Stein permanent fixiert. Das Widerlager kann somit seine Funktion aufnehmen. Die geringfügige Volumenausdehnung des Buffers an seiner Oberseite ist für die Quelldruckentwicklung ohne Bedeutung. Der große Vorteil dieser Option besteht darin, dass kein Material mit Zementphasen verwendet wird, so dass eine Langzeitstabilität vorausgesetzt werden kann. Damit kann die Funktionsdauer des Widerlagers auf den gesamten Bewertungszeitraum ausgedehnt und von der Entwicklung des überlagernden Versatzes entkoppelt werden.

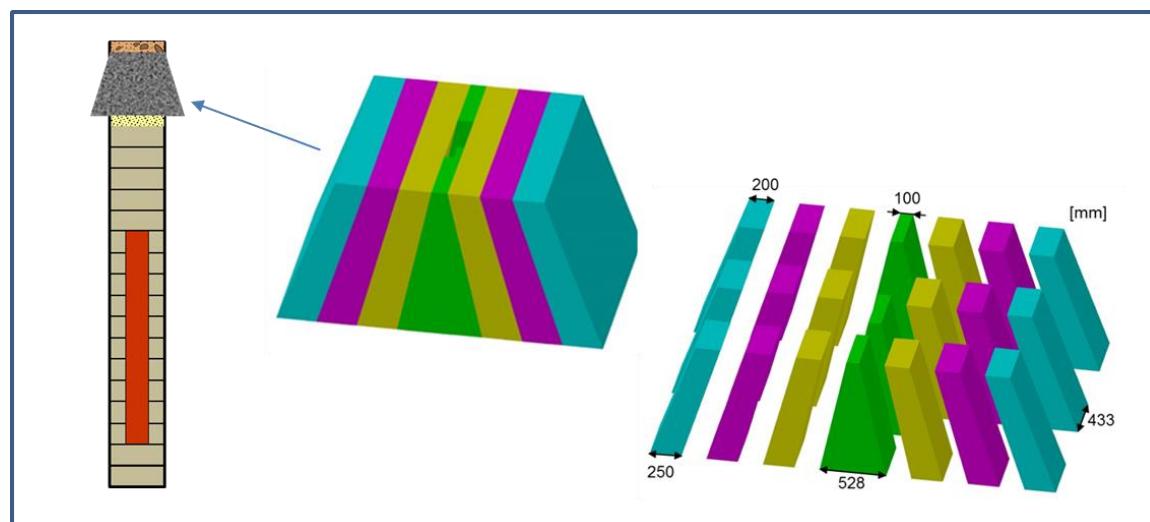
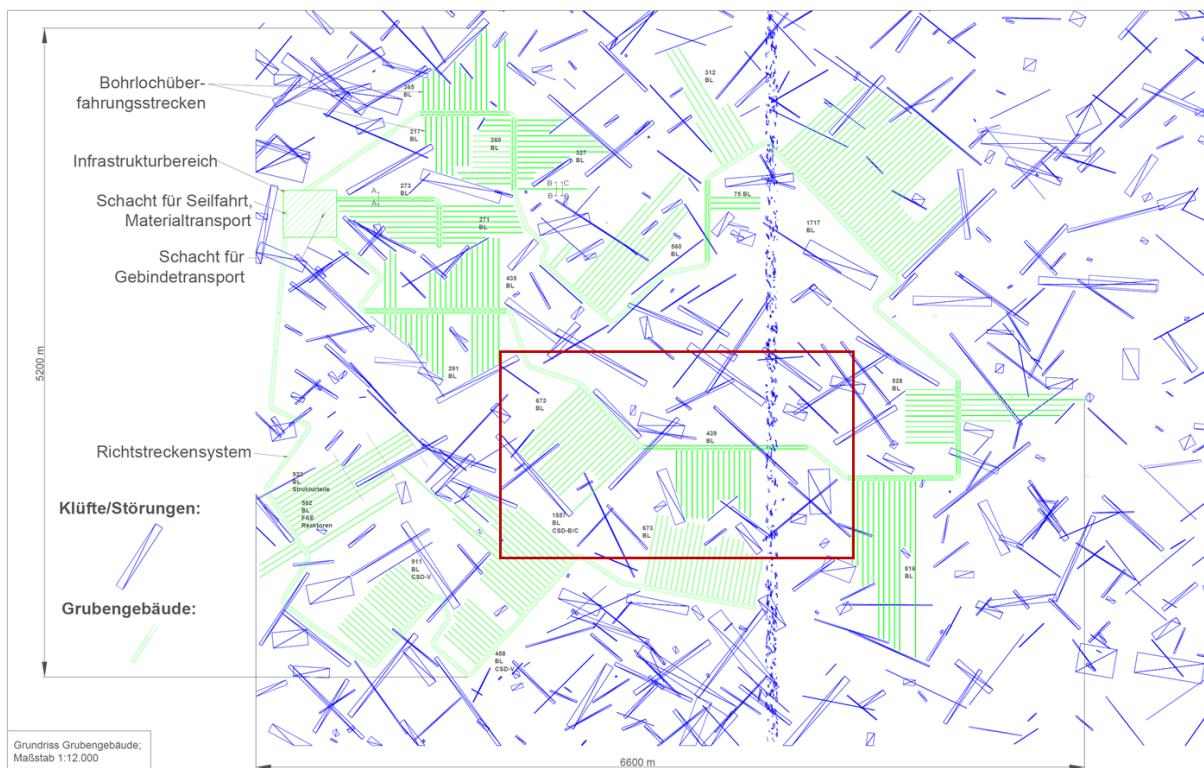


Abb. 5.4: Konzeption des Widerlagers zur Gewährleistung der Lagestabilität des darunter liegenden Buffers (Herold 2019)

5.4 Streckenversatz

Unabhängig von der Tatsache, dass dem Wirtsgestein bei diesem Konzept, wie oben erwähnt, keine nachweisrelevante Einschlusshandlung zukommt, wird, analog zum Konzept des „multiplen ewG“, davon ausgegangen, dass lokale Gebirgsbereiche für die Einlagerung ausgewählt werden, die einen vergleichsweise geringfügigen Klüftigkeitsgrad aufweisen. Im Forschungsprojekt RESUS wurde unter dieser Prämisse ein Grubengebäude konzipiert, das dieser Annahme Rechnung trägt (Becker et al. 2020a). In einem Modell, das auf einer statistischen Klüftgenerierung basiert, wurden Bereiche für Einlagerungsfelder mit geringer Klüftigkeit ausgewählt. Abb. 5.5 skizziert das so generierte Grubengebäude.

Ein vergrößerter Ausschnitt (roter Kasten in Abb. 5.5) mit zwei lokalen Einlagerungsfeldern ist in Abb. 5.6 dargestellt. Die lokalen Einlagerungsfelder bzw. Einlagerungsstrecken werden mit einem doppelten Zugangsstreckensystem direkt angefahren, ohne Verwendung von Querschlägen. Sind alle Einlagerungsbohrungen einer Einlagerungsstrecke befüllt, wird diese Einlagerungsstrecke mit Versatzmaterial verfüllt. Als Versatzmaterial ist ein Gemisch aus aufbereitetem Ausbruchsmaterial und Bentonit vorgesehen.



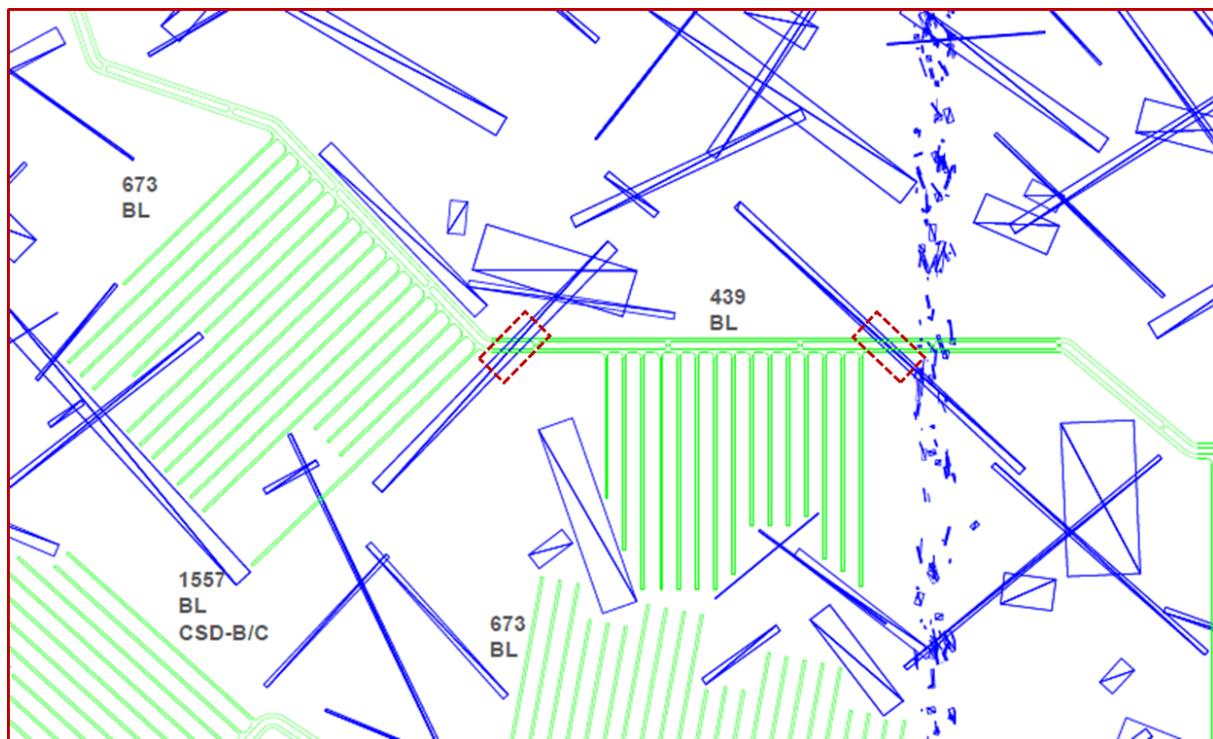


Abb. 5.6: Lokale Einlagerungsfelder außerhalb größerer Kluftzonen; durchörterte Kluftzonen rot gestrichelt eingeraumt; vergrößerter Ausschnitt aus Abb. 5.5 (aus Becker et al. 2020a)

Der Streckenversatz zählt nicht zu den wesentlichen Barrieren, sondern zu den weiteren Barrieren, die zusätzlich zu den wesentlichen Barrieren und im Zusammenwirken mit ihnen eine Ausbreitung von Radionukliden be- oder verhindern sollen (EndlSiAnfV 2020). Gemäß Kapitel 2.2.2 wird, zur besseren Unterscheidung der Barrieretypen, bei den weiteren Barrieren nicht von Sicherheitsfunktionen gesprochen, sondern von Schutzfunktionen. Als Schutzfunktion für den Versatz wird definiert:

Schutzfunktion: *Der Streckenversatz soll gewährleisten, dass eine Migration von Lösungen innerhalb der Strecken inklusive der Auflockerungszone möglichst gering ist.*

Die damit verbundenen spezifischen Funktionen des Versatzes sind zum einen, den Hohlraum in der Strecke kraftschlüssig zum Gebirge auszufüllen, so dass keine weiteren Rissbildungen im Gebirge durch Konvergenz und Abschalungen entstehen bzw. sich die Auflockerungszone vergrößert. Zum anderen soll der Versatz die Migration von Lösungen durch das Grubengebäude minimieren. Das wird durch den Bentonitanteil erreicht, der im Kontakt zur Lösung quillt und die Resthohlräume verschließt. Mit Blick auf diese spezifischen Funktionen werden die Leistungsziele wie folgt festgelegt:

Leistungsziel 1: *Der Versatz soll nach Abschluss der Aufsättigung mit Lösung also nach erfolgter Quellentwicklung eine Permeabilität von $k \leq 5 \cdot 10^{-16} m^2$ besitzen.*

Bei diesem Permeabilitätswert handelt es sich noch um eine Arbeitshypothese basierend auf Erfahrungswerten. Nach Fertigstellung des vollständigen Verschlussystems ist diese

Arbeitshypothese durch Prozessanalysen zu verifizieren und das Leistungsziel ggf. anzupassen.

Leistungsziel 2: *Der Versatz soll nach Abschluss der Aufsättigung mit Lösung einen Quelldruck von $p_q \approx 0,1 \text{ MPa}$ entwickeln.*

Dieser Wert entstammt Untersuchungsergebnissen von Posiva und SKB, die besagen, dass oberhalb eines Quelldruckes von 0,1 MPa auch eventuell vorhandene Kanalbildungen (Piping), die sich während der Aufsättigung gebildet haben könnten, wieder versiegelt werden (Posiva & SKB 2017).

Leistungsziel 3: *Der Versatz soll ein tragfähiges Gerüst bilden, so dass keine weiteren Rissbildungen im Gebirge durch Konvergenz und Abschalungen entstehen bzw. sich die Auflockerungszone vergrößert.*

Designanforderung:

Derzeit wird für das Versatzmaterial als Arbeitshypothese ein Mischungsverhältnis von 70/30% (aufbereitetes Ausbruchsmaterial/Bentonit) angenommen. Bei diesem Mischungsverhältnis wurden Permeabilitäten von 10^{-17} bis 10^{-18} m^2 gemessen (Pusch1998). Das genaue Verhältnis muss im Zuge der Auslegungsplanung festgelegt werden. Die Bildung eines tragfähigen Gerüstes kann durch Verwendung eines setzungssarmen Schottergerüstes innerhalb der Versatzmischung erreicht werden. Das Ausbruchsmaterial sollte dementsprechend schotterförmig aufbereitet werden.

An den Einmündungen der Einlagerungsstrecken in die Zugangsstrecke wird jeweils ein Abschlusswiderlager vorgesehen. Ein solcher Zustand ist in Abb. 5.7 skizziert. Die Abschlusswiderlager sorgen dafür, dass der Versatz in den Einlagerungsstrecken verbleibt, die Zugangsstrecken befahrbar bleiben und sich bei einsetzendem Quellvorgang des Versatzes eine Einspannung ergibt.

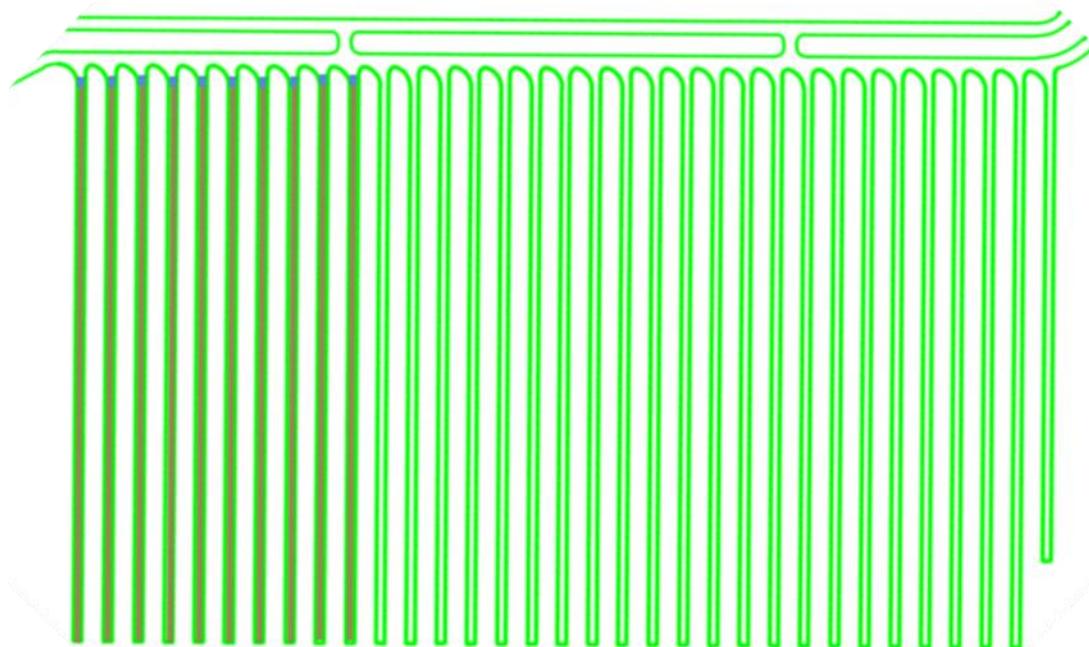


Abb. 5.7: Einlagerungsfeld mit teilweise versetzten Einlagerungsstrecken

Die Funktionsdauer der Abschlusswiderlager ist im Wesentlichen auf die Betriebsphase begrenzt. Im Zuge des Verschlusses des Endlagers werden die Zugangsstrecken ebenfalls mit quellfähigem Versatz verfüllt, der nach dem Quellvorgang des Bentonitanteils die Funktion der Abschlusswiderlager übernimmt.

5.5 Kluft- Schacht- und Rampenverschlüsse

Im Falle von durchörterten größeren hydraulisch wirksamen Kluftzonen (gekennzeichnet durch die rot gestrichelten Kästchen in Abb. 5.6), die einen signifikanten Zulauf von Lösungen bewirken, werden diese Zonen mit speziellen Kluftverschlüssen versehen. Für diese Kluftverschlüsse wird das gleiche Konzept angenommen, wie es für die Option „multipler ewG“ entwickelt wurde (vgl. Abb. 3.15). Auch hier gilt es, erosive Prozesse im Versatzmaterial zu beiden Seiten der Kluftverschlüsse zu verhindern.

Auch für den Verschluss von Schächten und/oder Rampen wird auf die Konzepte zurückgegriffen, die für den „multiplen ewG“ erarbeitet wurden (vgl. Abb. 3.16 und Abb. 3.17). In dem Konzept des „multiplen ewG“ liegen die Tageszugänge, unabhängig ob Schacht oder Rampe, außerhalb der einzelnen ewG. Den Verschlüssen der Tageszugänge werden demnach keine Sicherheitsfunktionen, sondern Schutzfunktionen zugeschrieben. Das System der Tageszugänge des „multiplen ewG“ ist demnach vergleichbar mit dem „modifizierten KBS-3 Konzept“, so dass die entsprechenden Verschlussbauwerke analog angenommen werden können.

5.6 Tabellarische Übersicht

Die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen technischen und geotechnischen Verschlusselemente werden zu einem Gesamteinschlusssystem zusammengeführt. Das Einschlusssystem besteht demnach aus den Behältern als wesentliche Barrieren. Unterstützt werden die Behälter durch die weiteren Barrieren, also den die Behälter umgebenden Buffer in den vertikalen Einlagerungsbohrlöchern innerhalb der Bohrlochüberfahrungsstrecken, den Versatz in den Bohrlochüberfahrungsstrecken mit den Abschlusswiderlagern an deren Einmündung in die Zugangsstrecken, den Versatz in den Zugangsstrecken sowie die Verschlüsse der Tageszugänge (Schacht und/oder Rampe). Eine Optimierungsmöglichkeit unter Anwendung einer (diversitären) Redundanz ist bei diesem System nicht gegeben. Keine der genannten Barrieren kann eine Redundanz gegenüber dem Behälter erfüllen.

Analog zu den Angaben bei den Optionen „multipler ewG“ und „überlagernder ewG“ wird auch hier unterschieden zwischen Sicherheitsfunktionen und Schutzfunktionen. Sicherheitsfunktionen sind solche Funktionen, die im Rahmen des Sicherheitsnachweises zwingend der Nachweismethodik unterliegen. Schutzfunktionen werden solchen Elementen zugeordnet, die dazu beitragen, die wesentlichen Barrieren in ihrer Funktion zu unterstützen. In den nachfolgenden Tabellen (Tab. 5.1 und Tab. 5.2) wird ein Überblick gegeben über die einzelnen Komponenten des Einschlusssystems und die ihnen jeweils zugeordneten Sicherheits- oder Schutzfunktionen. Damit die Sicherheits- oder Schutzfunktionen von den einzelnen Komponenten auch übernommen werden können, muss jede Komponente bestimmte Leistungsziele erreichen. Diese sind ebenfalls in Form von Parameterwerten in der Grafik und der Tabelle mit aufgeführt.

Die angegebenen Zahlenwerte sind zunächst als Arbeitshypothesen zu verstehen, die im Zuge der Integritätsanalysen zu konkretisieren sind. Diese Leistungsziele können nur erreicht werden, wenn an die Konstruktion dieser Komponenten spezifische Designanforderungen formuliert werden, die unter Einhaltung einer Qualitätssicherung im Zuge der Konstruktion umgesetzt werden. Diese Designanforderungen sind ebenfalls in Tab. 5.2 angegeben.

Tab. 5.1: Überblick über die Komponenten des Verschlusskonzeptes mit Sicherheits- und, Schutzfunktionen sowie den für die einzelnen Komponenten festgelegten Leistungszielen

	Wesentliche Barrieren		Weitere Barrieren						
Komponente	Behälter		Buffer	Wider-lager	Wirts-gestein	Versatz	Abschluss-widerlager	Kluft-verschluss	Schacht-/Rampen-verschluss
Sicherheitsfunktion oder Schutzfunktion	Einschluss der Radionuklide im Bewertungszeitraum	Schutz und Unterstützung des Behälters in seiner Einschlussfunktion	Lagestabilität des Buffers im Bewertungszeitraum	Erschwernis für menschliches Eindringen	Minimierung einer Fluidbewegung in den Strecken	Gewährleistung der Lagestabilität des Versatzes (zeitlich begrenzt)	Minimierung erosiver Fluidbewegung in den Strecken	Minimierung des Eindringens von Lösungen aus dem Deckgebirge; Vermeidung von Aquifer-Kurzschlüssen	
Funktionselement	Kupferhülle	Stahlbehälter	Bentonit-Scheiben/Ringe	Festgestein-blöcke					
Spezifische Funktion	Einschluss der Radio-nuklide	Tragfunktion; Mechanischer Schutz	Minimierung der Fluidmigration; Stabilisierung des hydroch. Milieus; Minimierung mikrob. Aktivität; Pufferung mech. Lasten Rückhaltung von Radionukliden	Vermeidung einer Auflockerung des Buffers	Gewährleistung stabiles Grubengebäude				
Leistungsziele	Korrosionsresistenz (1 Mill. a)	Mechanisch handhabbar bis 500 Jahre	Permeabilität $\leq 10^{-18} \text{ m}^2$ Quelldruck $\geq 2,0 \text{ MPa}$	$\Delta L/L \leq 3\%$ des Bentonit-elementes	Permeabilität $\leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ Kraftschluss zum Gebirge	Lagestabil unter einseitiger Last	Permeabilität $\leq 10^{-16} \text{ m}^2$	Permeabilität $\leq 10^{-16} \text{ m}^2$ Lagestabil unter den regionalen hydraulischen Lasten	
Bei den Zahlenwerten handelt es sich um Arbeitshypothesen, die durch Analysen zu verifizieren sind									

Tab. 5.2: Überblick über Sicherheitsfunktionen (rot), Schutzfunktionen (blau), Leistungsziele und Designanforderungen an die Verschlusskomponenten

Komponente	Sicherheitsfunktion	Leistungsziel	Designanforderung
Behälter	<i>Einschluss der Radionuklide im gesamten Bewertungszeitraum von 1 Million Jahre</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziel	Designanforderung
Stahlbehälter	Tragfunktion; Schutz des Abfallinventars gegenüber mechanischen Lasten (Umgebungsdruck ggf. asymmetrisch, Scherbeanspruchung); Gewährleistung der Unterkritikalität (innere Struktur des Behälters)	Hohe mechanische Festigkeit; Geringes Deformationsvermögen; Geringe korrasive Gasbildungsraten; Mechanisch handhabbar über den Bergungszeitraum von 500 Jahren	Stahlsorte und Wandstärken sind gegen die zu erwartenden mechanischen Lasten im Bewertungszeitraum auszulegen
Kupferhülle	Einschluss der Radionuklide im gesamten Bewertungszeitraum von 1 Million Jahre	Hinreichende Korrosionsbeständigkeit für 1 Million Jahre unter den lokalen hydrochemischen und mikrobiellen Verhältnissen	Verwendung von geschmiedetem Kupfer; Qualitätsgesichertes Schweißen der Nähte für den Deckel; Geeignete Dicke des Kupfermantels (i) zur Korrosionsresistenz im Bewertungszeitraum und (ii) Minimierung des Nichterkennens von Schweißfehlern; Dicke $\geq 50 \text{ mm}$

Komponente	Schutzfunktion		
Buffer	<i>Schutz und Unterstützung des Behälters für den Einschluss der Radionuklide im gesamten Bewertungszeitraum</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziel	Designanforderung
Bentonit-Scheiben Bentonit-Ringe	Minimierung einer Lösungsmigration sowohl zum Behälter hin als auch vom Behälter weg; Stabilisierung des hydrochemischen Milieus durch geringe Lösungsmigration; Temporäre Rückhaltung von Radionukliden durch die Sorptions-eigenschaften der Tonminerale	Lösungspemeabilität $\leq 10^{-18} \text{ m}^2$ nach erfolgter Aufsättigung mit Lösung und vollständiger Ausbildung des Quelldruckes gemäß Auslegung; Quelldruck $\geq 2 \text{ MPa}$	Hoch kompaktierte zylindrische Bentonitringe zur Aufnahme der Behälter in ihrem Inneren; Hoch kompaktierte zylindrische Bentonitscheiben als Auflage und Abdeckung im Bohrloch; Die Trockendichte ist so zu wählen, dass der gemäß Auslegung gewünschte Quelldruck nach Aufsättigung erreicht wird; Einsatz von Bentonitmehl als Füllmaterial für technisch bedingte Resthohlräume speziell an der Kontur zum Gebirge
Bohrlochwiderlager	<i>Gewährleistung der Lagesetabilität des Buffers über den gesamten Bewertungszeitraum</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziel	Designanforderung
Festgesteinsteinsblöcke	Gewährleistung, dass sich der Buffer bei der gewünschten Quellentwicklung nicht auflöst, sondern sein Volumen weitestgehend konstant bleibt	Lagesetabilität unter einseitiger hydromechanischer Last aus der Einlagerungsbohrung resultierend aus der Quellwirkung des Buffers; Vertikale Verschiebung $\leq 3\%$ der vertikalen Erstreckung des Buffers	Verwendung von arteigenem/auftochthonem Material; Mechanische Verankerung im Gebirge; Auslegung gegen den zu erwartenden hydromechanischen Druck aus dem Einlagerungsbohrloch; Ausnutzung der „Gewölbewirkung“
Filterschicht	Flächige Verteilung von Widerlagerseitig eindringender Lösung auf der Buffer-Oberfläche	Homogenisierung der (vertikalen) Quelldruckentwicklung des Buffers	Lagenweiser Einbau von granularem Material mit unterschiedlichen Korngrößen
Wirtsgestein	<i>Erschweren für menschliches Eindringen</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungs-Eigenschaft	(Design)-Anforderung
Kristallingestein	Gewährleistung eines stabilen Grubengebäudes; Aufnahme und Fixierung der Behälter in ausreichender Tiefe	Hohe Gebirgsdruckfestigkeit bzw. Standfestigkeit	Geringe Kluftdichte mit möglichst geringer hydraulischer Wirksamkeit
Streckenversatz	<i>Minimierung der Fluidbewegung innerhalb des Streckensystems</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziel	Designanforderung
Gemisch aus: aufbereitetem Ausbruchsmaterial und Bentonit	Stützung des Gebirges zur Vermeidung weiteren Rissbildungen im Gebirge durch Konvergenz und Abschalungen; Verfüllung von Hohlräumen und Herstellung einer geringen Permeabilität	Herstellung eines zeitnahen Kraftschlusses zum Gebirge; Permeabilität $\leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ nach Aufsättigung des Bentonitanteils	Aufbereitung des Ausbruchsmaterials zu einem setzungsarmen Schottergerüst; Wahl eines geeigneten Mischungsverhältnisses aus Ausbruchsmaterial und granularem Bentonit (kleine Pellets). Als Arbeitshypothese gilt ein Verhältnis von 70/30; Mittlere Trockendichte des granularen Bentonitanteils $\geq 1.500 \text{ kg m}^{-3}$. Quelldruck $\geq 0,3 \text{ MPa}$. Einbau mit z. B. Verdichterplatten
Abschlusswiderlager an den Einlagerungsstrecken	<i>Gewährleistung der Lagesetabilität des Versatzes in den Einlagerungsstrecken</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziel	Designanforderung
Betonwiderlager an den Enden der Einlagerungsstrecken	Gewährleistung der Lagesetabilität des Versatzes in den Einlagerungsstrecken	Lagesetabilität unter einseitiger hydromechanischer Last aus Richtung	Material: Niedrig-pH-Beton Mechanische Verankerung im Gebirge;

	rungsstrecken speziell nach Aufsättigung und Quellen des im Versatz befindlichen Bentonitanteils	der Einlagerungsstrecken bis zu dem Zeitpunkt, an dem der Versatz in den Zugangsstrecken diese Aufgabe übernimmt	Auslegung gegen den zu erwartenden hydro-mechanischen Druck aus der Einlagerungsstrecke
Rampenverschluss	<i>Minimierung des Eindringens von Lösungen aus dem Deckgebirge zur Aufrechterhaltung des hydro-chemischen Milieus; Vermeidung von hydraulischen Kurzschlüssen</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziel	Designanforderung
Versatz	Stützung des Gebirges zur Vermeidung weiterer Rissbildungen im Gebirge durch Konvergenz und Abschalungen	Herstellung eines Kraftschlusses zum Gebirge; Hohe Druckfestigkeit	Aufbereitung des Ausbruchsmaterials zu einem setzungsarmen Schotter
Bentonit-Versatz-Gemisch	Minimierung von Advektion innerhalb der Rampe, insbesondere der Mischung von Lösungen aus angefahrenen Kluft-Clustern	Permeabilität $\leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	Aufbereitung des Ausbruchsmaterials zu einem setzungsarmen Schotter; Wahl eines geeigneten Mischungsverhältnisses aus Ausbruchsmaterial und granularem Bentonit (kleine Pellets). Als Arbeitshypothese gilt ein Verhältnis von 70/30. Mittlere Trockendichte des granularen Bentonitanteils $\geq 1.500 \text{ kg m}^{-3}$. Quelldruck $\geq 0,3 \text{ MPa}$. Einbau z. B. mit Verdichterplatten
Asphalt-Dichtelement	Minimierung von Advektion innerhalb der Rampe bis die angeschlossenen Bentonit-Versatz-Gemische ihre volle Dichtwirkung erreicht haben.	Permeabilität $\leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	Kalteinbau in Blockform; Monolithisierung durch Druck (Eigengewicht) oder Temperaturerhöhung; Ggf. Nachschnitt der Kontur erforderlich
Filterschichten	Minimierung von Erosionerscheinungen, speziell der Ausbildung lokaler Fließkanäle (Pipes) an den Bentonit-Versatz-Gemischen	Homogenisierung bzw. flächenhafte Verteilung des hydraulischen Druckaufbaus an den Stirnseiten der Bentonit-Versatz-Gemische	Lagenweiser Einbau von granularem Material mit unterschiedlichen Korngrößen
Schachtverschluss	<i>Minimierung des Eindringens von Lösungen aus dem Deckgebirge zur Aufrechterhaltung des hydro-chemischen Milieus; Vermeidung von hydraulischen Kurzschlüssen</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziel	Designanforderung
Sockelwiderlager	Gewährleistung der Lagestabilität der darüber liegenden Verschlusselemente	Geringe Komprimierbarkeit; Auslaufsicherheit im Füllortbereich	Einbauhöhe bis über die Oberkante des Füllortes
Bitumenverfüllte Schottersäule	Minimierung von Advektion innerhalb des Schachtes, insbesondere des Eindringens von Fluiden aus angefahrenen Kluft-Clustern	Permeabilität $\leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	<u>Schotter:</u> Einbringtechnologie über Fördergefäß mit Bodenentleerung bei festgeschriebener Fallhöhe; <u>Bitumen:</u> Heißeinbau des Bitumens durch lagenweises Einbringen in den Schotter mit festgeschriebenen Lagenhöhen.
Schottersäule	Gewährleistung der Lagestabilität der darüber liegenden Verschlusselemente	Setzungsarmut, maximale Setzung $\leq 3\%$ der Länge der darüber liegenden Bentonitdichtung	Einbringtechnologie über Fördergefäß mit Bodenentleerung bei festgeschriebener Fallhöhe.
Bentonidichtungen	Minimierung von Advektion innerhalb des Schachtes, insbesondere des Eindringens von	Permeabilität $\leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	Verwendung eines binären Bentonitgemisches analog zum Schachtverschluss Salzdorfurth

	Fluiden aus angefahrenen Kluft-Clustern		unter Anwendung einer In-situ Verdichtung.
Asphaltdichtung	Minimierung von Advektion innerhalb des Schachtes, insbesondere des Eindringens von Fluiden aus überlagerten Gebirgsbereichen, bis zu dem Zeitpunkt an dem die Bentonitdichtung ihre volle Dichtwirkung erreicht hat	Permeabilität $\leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	Kalteinbau in Blockform; Monolithisierung durch Druck (Eigengewicht) Ggf. Nachschnitt der Kontur erforderlich.
Filterschichten	Minimierung von Erosionsscheinungen, speziell der Ausbildung lokaler Fließkanäle (Pipes) an den Bentonitdichtungen	Homogenisierung bzw. flächenhafte Verteilung des hydraulischen Druckaufbaus an den Stirnseiten der Bentonitdichtungen	Lagenweiser Einbau von granularem Material mit unterschiedlichen Korngrößen
Schottersäule	Keine	Keine	Einbringtechnologie über Fördergefäß mit Bodenentleerung bei festgeschriebener Fallhöhe.
Versatz bis GOK	Keine	Keine	Keine
Kluftzonenverschluss	<i>Minimierung erosiver Fluidbewegung in Strecken</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziel	Designanforderung
Widerlager	Gewährleistung der Lagesicherheit der Dichtelement-Kombinationen im Kluftverschluss.	Maximale Verschiebung des Widerlagers $\leq 3\%$ der Länge der anliegenden Bentonitdichtungen.	Material: Niedrig-pH-Beton. Mechanische Verankerung im Gebirge. Auslegung gegen den zu erwartenden hydro-mechanischen Druck der Dichtelement-Kombinationen.
Asphalt-Dichtelemente	Minimierung druckgetriebener Fluidbewegung aus der Kluft in den Streckenversatz bis die geschlossene Bentonitdichtung ihre volle Dichtwirkung erreicht hat.	Permeabilität $\leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	Kalteinbau in Blockform. Monolithisierung durch Druck (Eigengewicht) oder Temperaturerhöhung. Ggf. Nachschnitt der Kontur erforderlich.
Bentonit-Dichtelemente	Minimierung druckgetriebener Fluidbewegung aus der Kluft in den Streckenversatz	Permeabilität $\leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	Mittlere Einbautrockendichte $\geq 1.500 \text{ kg m}^{-3}$. Quelldruck $\geq 0,3 \text{ MPa}$ Vorkompaktierte Blöcke mit Bentonitgranulat als Füllmaterial für technisch bedingte Resthohlräume.
Aufsättigungskammer	Gleichmäßig verteilte flächige Weitergabe der aus der Kluft einströmenden Lösung an die beiden angeschlossenen Bentonitdichtungen.	Hohe Aufnahmefähigkeit für Flüssigkeit. Porosität $\geq 35\%$	Aufbereitetes Ausbruchsmaterial (schotterförmig).

6 Verschlusskonzept für Erkundungsbohrungen

Grundsätzlich können zwei Arten von Erkundungsbohrungen unterschieden werden, für die ein Konzept zur Versiegelung entwickelt werden muss: Erkundungsbohrungen von der Erdoberfläche und untertägige Erkundungsbohrungen.

Tiefbohrungen von der Erdoberfläche können – analog zu Schächten oder Rampen – potentielle Verbindungen zwischen der Biosphäre und dem Endlagerniveau darstellen. Im Unterschied zu den Tageszugängen sind sie aber nicht an das Grubengebäude angebunden, sondern die Grubenräume halten einen Sicherheitsabstand zu diesen Bohrungen ein. Dieser Sicherheitsabstand kann z. B. im Zusammenhang mit dem Integritätsnachweis der geologischen Barriere dimensioniert werden.

Untertägige Erkundungsbohrungen aus dem Endlagerbergwerk sind an die Grubenräume angebunden. Sie erkunden das unmittelbare Umfeld des Endlagerbergwerks und werden in der Regel auf das kristalline Wirtsgestein begrenzt sein. Es ist nicht auszuschließen, dass diese Bohrungen Verbindungen zwischen hydraulisch getrennten Gebirgsbereichen im kristallinen Wirtsgestein und dem Grubengebäude herstellen. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass beiden Arten von Erkundungsbohrungen mit vergleichbaren Abdichtmodulen verschlossen werden.

Es gibt eine Reihe von In-situ-Versuchen zu Bohrlochverschlüssen in verschiedenen Wirtsgesteinstypen: Tongestein: Nagra (2002) (Wellenberg), Volckaert et al. (1997) (Hades); Kristalllingesteine: Blümling (2005) (Grimsel), Fairhurst et al. (1993) (ÄSPÖ); Salzgesteine: Finley & Tillerson (1992) (WIPP Site), Droste et al. (1998) (Forschungsbergwerk Asse). Die Konzepte variieren deutlich in Abhängigkeit von der Geologie. Auf die Ergebnisse dieser Versuche kann bei der Konzeptentwicklung zurückgegriffen werden.

Ziel eines Verschlusskonzeptes sollte es sein, dass sich die Bohrung in ihren hydraulischen Eigenschaften langfristig nicht signifikant vom umgebenden Gebirge unterscheidet. Die grundsätzliche Machbarkeit einer Bohrlochversiegelung wurde von Brenner & Jedelhauser (1989) gezeigt. Ein nach endlagerspezifischen Anforderungen entwickeltes Verschlusskonzept für Bohrlöcher in kristallinen Gesteinen gibt es in Deutschland noch nicht. Daher soll im Rahmen dieses Projektes auf das Konzept, das im Zuge der schwedischen Standortuntersuchung entwickelt wurde (SKB 2005a, b, 2010a), zurückgegriffen werden.

Es ist davon auszugehen, dass das übertägige Bohrprogramm zur Erkundung eines potenziellen Endlagerstandortes hydrogeologische Bohrungen zur Untersuchung des Deckgebirges, und Tiefbohrungen zur Untersuchung von Deckgebirge und Wirtsgestein umfasst. Bei den hydrogeologischen Bohrungen ist davon auszugehen, dass die Verrohrung vor der Verfüllung der Bohrungen gezogen wird. Die Verfüllung erfolgt nach berg- und wasserrechtlichen Anforderungen, wobei meist Zement-Bentonit-Gemische, Füllsand in Kombination mit Tonsperren und - in gestörten Bereichen - Kies als Füllmaterialien verwendet werden. Bei den Erkundungsbohrungen, die das Einlagerungsniveau im Kristalllingestein erreichen, ist davon auszugehen, dass vor der Verfüllung die Standrohre gezogen und die Schutzstandrohre überbohrt werden.

Da die von Übertage abgeteuften Tiefbohrungen potenzielle Wegsamkeiten zwischen der Einlagerungssohle und der Biosphäre darstellen können, ist Ihre Verfüllung von großer Bedeutung. Deshalb werden die Bohrungsabschnitte in kompakten Gebirgsbereichen mit hoch ver-

dichteten Bentonit-Elementen verschlossen. Die Bohrlochkontur wird hier mit perforierten Kupferrohren versehen, damit das Gebirgswasser zutreten und den Bentonit aufsättigen kann (Abb. 6.1). Im Bereich von Störungen/Klüften wird ein Verschluss aus Niedrig-pH-Zement eingebracht. Dieses Material hat lediglich eine Stützfunktion für die Bohrlochkontur und angrenzende Dichtelemente und muss keine niedrige hydraulische Leitfähigkeit haben. Der übrige Teil der Bohrung wird mit granularem sandförmigen Versatz verfüllt. Der oberste Teil des Bohrlochs wird mit kompaktiertem Lehm/Mergel, Zement/Beton (im Bereich von Störungen/Klüften) sowie einem abschließenden Gesteinszylinder verschlossen (SKB 2010b).

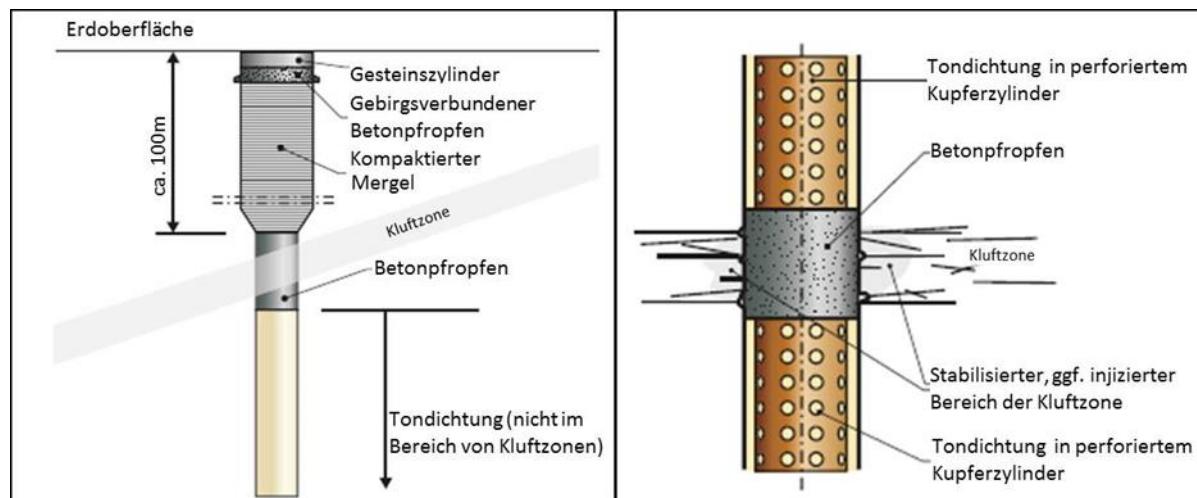


Abb. 6.1: Verfüllung von überträgigen Erkundungsbohrungen (SKB 2010b)

Dieses Konzept wurde seitens der SKB ausgiebig getestet und letztlich als Referenzkonzept festgelegt (Pusch & Ramqvist 2007). Analog zu den oben beschriebenen Verschlussystemen gibt Tab. 6.1 die Sicherheitsfunktionen und Leistungsziele für Verschlüsse von Erkundungsbohrungen an.

Tab. 6.1: Schutzfunktion und Leistungsziele von Verschlüssen für Erkundungsbohrungen

Komponente	Schutzfunktion		
Verschluss einer Erkundungsbohrung	<i>Minimierung der Wegsamkeiten für Lösungen aus dem Deckgebirge zur Aufrechterhaltung des hydrochemischen Milieus; Vermeidung von hydraulischen Kurzschlüssen</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziel	Designanforderung
Betonpropfen	Gewährleistung der Lagestabilität und Behinderung einer Volumenausdehnung des Dichtelementes. Die Funktionsdauer ist begrenzt bis der Bohrlochversatz durch Kompaktion vollständig eingespannt ist und somit die Widerlagerfunktion übernehmen kann.	Maximale Verschiebung des Widerlagers $\leq 3\%$ der Länge der anliegenden Bentonitdichtung	Material: Niedrig-pH-Beton; Kohäsive Gebirgsanbindung
Bentonitdichtung	Minimierung der Advektion innerhalb einer Erkundungsbohrung	Permeabilität $\leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	Vorkompaktierte Blöcke mit Bentonitmehl als Füllmaterial für technische bedingte Resthohlräume.

Das Leistungsziel der Bohrlochversiegelung könnte durch die Auflockerungszone um das Bohrloch beeinträchtigt werden. Aufgrund des geringen Bohrlochdurchmessers wird auch die Ausdehnung der Auflockerungszone (ALZ) sehr begrenzt sein. Da quellfähiges Tonmaterial als Komponente in den Bohrlochverschluss eingebaut wird, wird das Schließen der Auflockerungszone durch den entstehenden Quelldruck unterstützt.

7 Zusammenfassung

Die Konzeption eines Verfüll- und Verschlusskonzeptes ist ein essenzieller Bestandteil des Sicherheitskonzeptes. In diesem Bericht werden Verfüll- und Verschlusskonzepte beschrieben, die an die verschiedenen Einlagerungsoptionen für eineendlagerung im Kristallingestein und die damit verbundenen unterschiedlichen ewG-Optionen angepasst sind. Grundlage für das Verschlusskonzept sind die Zielsetzungen für die Sicherheit in der Nachverschlussphase sowie die zugehörigen planerischen Maßnahmen, die im Rahmen des Sicherheitskonzeptes definiert werden.

Allen Elementen der einzelnen Verschlusskonzepte wurden Sicherheits- oder Schutzfunktionen zugeordnet, die von den Komponenten erfüllt werden müssen, um die Sicherheit im Zuge einer entsprechenden Bewertung demonstrieren zu können.

Der Unterschied zwischen Sicherheitsfunktionen und Schutzfunktionen besteht darin, dass Sicherheitsfunktionen solche Funktionen sind, die im Rahmen einer Sicherheitsbewertung zwingend einer rechnerischen Prüfung unterliegen. Schutzfunktionen werden solchen Elementen bzw. weiteren Barrieren zugeordnet, die dazu beitragen, die wesentlichen Barrieren in ihrer Funktion zu unterstützen. Die Funktionen der weiteren Barrieren sind schlüssig zu erläutern. Damit die Sicherheits- oder Schutzfunktionen von den einzelnen Komponenten auch übernommen werden können, muss jede Komponente bestimmte Leistungsanforderungen erfüllen, die für jedes Verschlusskonzept tabellarisch aufgeführt sind.

Die darin angegebenen Parameterwerte sind als Arbeitshypothesen für die Leistungsziele zu verstehen, die im Zuge der Integritätsanalysen zu konkretisieren sind. Die Leistungsziele wiederum können nur erreicht werden, wenn an die Konstruktion der Komponenten spezifische Anforderungen (Designanforderungen) formuliert werden, die unter Einhaltung einer Qualitäts sicherung im Zuge der Konstruktion umgesetzt werden. Generelle Designanforderungen sind mit angegeben, müssen aber im Zuge einer Detailplanung konkretisiert werden.

8 Literaturverzeichnis

- Aland, H.-J., Handke, N., Leuschner, J., Bodenstein, J., Maelzer, K. & Sitz, P. (1999). Langzeitfunktionsstüchtiger Streckenverschluss aus kompaktiertem Bentonit im Bergwerk Sondershausen, Glückauf 135.
- Alonso, J., García-Siñeriz, J. L., Bárcena, I., Alonso, M. C., Fernández-Luco, L., García, J., et al. (2008). Temporary Sealing Technology. Final Report, ESDRED.
- ANDRA. (2005). Dossier 2005: Argile Tome: Architecture and management of a geological repository. Tech. rep., Andra.
- Anthony, J.W., Bideaux, R.A., Bladh, K.W. & Nichols, M.C. (Eds.) (1997). Handbook of Mineralogy - Halides, Hydroxides, Oxides. Vol. 3, 628 pp.; Chantilly (Mineralogical Society of America).
- BBergG (2021). Bundesberggesetz, zuletzt geändert durch Artikel 1 G. v. 14.06.2021.
- Becker, D.-A., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Frenzel, B., Krumpholz, M., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Möning, J., Müller-Hoepppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Weber, J.R., Wolf, J. (2020a). Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Kristallingesteinsformation mit Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren - Forschungsprojekt RESUS, GRS-577, ISBN 978-3-947685-63-9, BGE TECHNOLOGY, BGR, GRS, Peine, Hannover, Braunschweig.
- Becker, D.-A., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Flügge, J., Frenzel, B., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Möning, J., Mrugalla, S., Müller-Hoepppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Thiemeyer, T., Weber, J.R., Wolf, J. (2020b). Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Kristallingesteinsformation mit einer überlagernden Salzformation - Forschungsprojekt RESUS, GRS-575, ISBN 978-3-947685-61-5, BGE TECHNOLOGY, BGR, GRS, Peine, Hannover, Braunschweig.
- Benedix, R. (2008). Bauchemie - Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag GWV Fachverlage GmbH.
- Bertrams, N., Herold, P., Leonhard, J., Marggraf, U., Seidel, D. & Wunderlich, A. (2021). Weiterentwicklung der Konzepte der Transport- und Einlagerungstechnik von Endlagerbehältern, Forschungsprojekt TREND, Abschlussbericht, BGE TEC 2021-01, BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S., et al. (2017). Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland. FuE-Projekt KONEKD Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Blümling, P. (2005). Borehole sealing project at the Grimsel Test Site. Geotechnical and Geological Engineering, 23 (DOI 10.1007/s10706-004-2144-9), 843-858.
- Breidung, K. (2002). Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken. Forschungsvorhaben Schachtverschluss Salzdethfurth. Abschlussbericht FKZ: 02C0516, K+S AG, Kassel.
- Brenner, R., & Jedelhauser, P. (1989). Bohrlochversiegelung: Konzept und Machbarkeitsnachweis. Technischer Bericht, NAGRA, Baden, Schweiz.
- Burlaka, V. & Hassanzadegan, A. (2021). Spezifische Prozessanalysen, Forschungsprojekt CHRISTA-II, Technischer Bericht BGE TEC 2021-16, BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Burkhardt, G. & Egloffstein, T. (1995). Asphaltdichtungen im Deponiebau, Eine Standortbestimmung. expert Verlag.
- Droste, J., Rothfuchs, T., Koß, S., & Poley, A. (1998). in-situ testing of crushed salt backfill behaviour in a salt repository. In-situ testing in underground research laboratories for radioactive waste disposal.
- EndSiAnfV (2020). Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle, 06.10.2020, Berlin.
- Engelhardt, I. (May 12-14 2003). Invers modelling of gas, water, and heat flow in bentonite/crushed rock backfill. PROCEEDINGS, TOUGH Symposium. Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory.

- Engelhardt, I., Finsterle, S., & Hofstee, C. (2003). Experimental and Numerical Investigation of Flow Phenomena in Nonisothermal, Variably Saturated Bentonite–Crushed Rock Mixtures. *Vadose Zone Journal*, 2, 239-246.
- Engelhardt, J. & Müller-Hoeppen, N. (2011). Ermittlung der anfänglichen Porenraumsättigung vom Salzbeton Typ Asse und vom Sorelbeton A1 und Ca- Bentonit Typ Salzdetfurth (VSG Arbeitspaket 9.1.2), Technischer Bericht, DBE Technology.
- Engelhardt, J., Jobmann, M., & Müller-Hoeppen, N. (2011). Materialspezifikationen für Dichtelemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen (VSG Arbeitspaket 9.1.2). Technischer Bericht, DBETEC, Peine.
- Eschrich, H. (Oct. 1980). Properties and long-term behaviour of bitumen and radioactive waste-bitumen mixtures. Technical Report, SKBF/KBS, Stockholm.
- Fairhurst, C., Gera, F., Gnirk, P., Gray, M., & Stillborg, M. (1993). International Stripa Project 1980–1992 Overview Volume I. Tech. rep., OECD/NEA.
- Finley, R., & Tillerson, J. (1992). WIPP small scale seal performance tests - status and impacts. Tech. rep., SANDIA.
- Glaubach, U., Hofmann, M., Königer, F., Emmerich, K., Schuhmann, R., Viertel, T., Schrickel, C., Schieweg, A. & Wilsnack, T. (2016). Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von Funktionselementen von Schachtverschlüssen, Teilbericht zum Arbeitspaket 3: Laborversuche zu den Arbeitsschritten 2.1 bis 2.6, Forschungsprojekt: Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle, ELSA-Phase 2, TUBAF, Freiberg.
- Guo, R., Kjartanson, B., & Martino, J. (2005). Thermo-hydro-mechanical simulation of the concrete bulkhead during the heating phase of the tunnel sealing experiment. In E. Alonso, & A. Ledesma (Hrsg.), *Advances in Understanding Engineered Clay Barriers* (S. 431-441). Balkema Publishers.
- Hansen, J. (2016). DOPAS, Public Summary of Project Progress. Final Report, POSIVA.
- Herold, P. (2019). Konzeptentwicklung für ein Festgesteinswiderlager aus verzahnten Blöcken (persönliche Kommunikation).
- Herold, P., Gruner, M., Jobmann, M., Kudla, W. & Müller, C. (2020). Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse im Ton- und Salzgestein, Forschungsprojekt ELSA Phase II, Teilbericht zum Arbeitspaket 1, BGE TEC 2020-11, BGE TECHNOLOGY GmbH, TU Bergakademie Freiberg, Peine.
- Hirsekorn, R.-P., Boese, B. & Buhmann, D. (1999). LOPOS: Programm zur Berechnung der Schadstofffreisetzung aus netzwerkartigen Grubengebäuden. GRS-157, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig.
- Huismann, S. (2010). Materialverhalten von hochfestem Beton unter thermomechanischer Beanspruchung. Thesis, Technischen Universität Wien Fakultät für Bauingenieurwesen.
- IEC (2011). IEC 61508, Internationale Norm zur Entwicklung von elektrischen, elektronischen und programmierbaren elektronischen (E/E/PE) Systemen, die eine Sicherheitsfunktion ausführen. Titel: Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme. International Electrotechnical Commission (IEC). Inhaltsgleich mit der europäischen Norm EN 61508, Europäisches Komitee für Normung (2001).
- Jobmann, M. (1998). Modification and application of the TOUGH2 code for modelling of water flow through swelling unsaturated sealing constructions, Proceedings of the TOUGH Workshop 98, Berkeley, CA, USA.
- Jobmann, M. (2002). Hydraulische Modellierungen, F+E-Vorhaben Schachtverschluss Salzdetfurth. Technischer Bericht, DBETEC, Peine.
- Jobmann, M., Becker, D., Hammer, J., Jahn, S., Lommerzheim, A., Müller-Hoeppen, N., et al. (2016). Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland. Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, GRS, BGR, Peine.
- Jobmann, M., Breustedt, M., Li, S., Polster, M., & Schirmer, S. (2013). Investigations on THM effects in buffer, EDZ and argillaceous host rock. Final Report - FKZ: 02E10086, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Jobmann, M., Polster, M., & Schonebeck, M. (2007). Investigation on thermal expansion effects in clay formations. Final Report, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.

- Jobmann, M. (2018). Mikrostrukturelle Untersuchungen an Salzgrus-Ton-Gemischen und Bitumen-Steinsalz Proben. In: Kudla, W. & Herold, P. (2021). Schachtverschlüsse für Endlager für hoch-radioaktive Abfälle, (ELSA-Phase 2): Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von Funktionselementen von Schachtverschlüssen, Teilbericht zum Arbeitsschritt 4.1, Forschungsprojekt ELSA-Phase-II, TU Bergakademie Freiberg, BGE Technology, Freiberg, Peine.
- Jobmann, M., Beushausen, M., Burlaka, V., Flügge, J., Frenzel, B., Lommerzheim, M., Maßmann, J., Mrugalla, S., Müller, C., Noseck, U., Rübel, A., Simo, E., Sönnke, J., Thiedau, J., Weitkamp, A. & Wolf, J. (2021a). Strategie und konzeptionelles Vorgehen zur Sicherheitsbewertung, Forschungsprojekt CHRISTA-II, Technischer Bericht BGE TEC 2021-11, GRS, BGR, BGE Technology GmbH, Braunschweig, Hannover, Peine.
- Jobmann, M., Maßmann, J., Meleshyn, A., Müller, C. & Thiedau, J. (2021b). Quantifizierung von Integritätskriterien für Sicherheitsnachweise an Kristallinstandorten in Deutschland, Forschungsprojekt CHRISTA-II, Technischer Bericht BGE TEC 2021-14, GRS, BGR, BGE Technology GmbH, Braunschweig, Hannover, Peine.
- Johannesson, L. (2008). Backfilling and closure of the deep repository – Phase 3 pilot test to verify engineering feasibility, Geotechnical investigations made on unsaturated backfill materials. Tech. rep., SKB.
- Johannesson, L., & Nilsson, U. (2006). Deep repository – engineered barrier systems, Geotechnical behaviour of candidate backfill materials, Laboratory tests and calculations for determining performance of the backfill. Technical Report, SKB.
- Johannesson, L.-E., Börgesson, L., & Sanden, T. (1999). Backfill materials based on crushed rock (part 2), geotechnical properties determined in laboratory. International Progress Report, SKB, Stockholm, Sweden.
- Kadhim El-Tornachi, M. (2003). Rauheit von Betonoberflächen, 3D-Laser-Messung und Beschreibung der Rauheit von Betonoberflächen, Reibung und Kraftübertragung zwischen Alt- und Neubeton unter nicht ruhender Belastung. Thesis, Fakultät Bauwesen der Universität Dortmund.
- Keech, P.G., Vo, P., Ramamurthy, S., Chen, J., Jacklin, R. & Shoesmith, D.W. (2014). Design and development of copper coatings for long term storage of used nuclear fuel, Corrosion Engineering, Science and Technology, Vol. 49. No. 6.
- Kudla, W., Dahlhaus, F., Glaubach, U., Gruner, M., Haucke, J., Hofmann, M., & Wasowicz, B. (2009): Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, Abschlussbericht; Freiberg.
- Kudla, W. & Herold, P. (ed.) (2021). Shaft sealing systems for final repositories for high-level radioactive waste, Research project ELSA-Phase 2: Conceptual design of shaft sealings and test of functional elements of shaft sealings, Synthesis Report. TU Bergakademie Freiberg, BGE Technology GmbH, Freiberg, Peine.
- Kremer, E. P. (2017). Durability of the Canadian Used Fuel Container, IHLRWM 2017, Charlotte, NC, April 9-13.
- Martino, J., Dixon, D., Holowick, B., & Kim, C.-S. (2011). Enhanced Sealing Project (ESP): Seal Construction and Instrumentation Report. Technical Report, Atomic Energy of Canada Limited (AECL).
- Maßmann, J. & Ziefler, G. (2016). Integritätsnachweis geologische Barriere, in: Jobmann et al. (2016) Systemanalyse für die Endlagerstandortmodelle - Methode und exemplarische Berechnungen zum Sicherheitsnachweis, Forschungsprojekt ANSICHT, Technischer Bericht TEC 29-2016-TB, GRS, BGR, DBE Technology GmbH, Braunschweig, Hannover, Peine.
- Mata, C., & Ledesma, A. (2003). Permeability of bentonite - crushed granite rock mixture using different experimental techniques. Géotechnique.
- Meleshyn, A. (2011). Microbial processes relevant for the long-term performance of radioactive waste repositories in clays. Final Report - FKZ 02E10548, GRS, Braunschweig.
- Mingarro, E. a., del Villar, P., de la Cruz, B., Gómez, P., Hernández, A., Turrero, M., et al. (1991). Characterization of clay (bentonite)/crushed granite mixtures to build barriers against the migration of radionuclides: diffusion studies and physical properties. Final Report, Ciemat.
- Mönig et al. (2011). Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzepts, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Arbeitspaket 3 - Abschlussbericht, GRS-271, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Braunschweig.

- Mrugalla, S., Frenzel, B., Sönnke, J., Stark, L. & Weitkamp, A. (2021). CHRISTA-II – Beschreibung der generischen geologischen Modelle für die Endlagerkonzepte „multipler ewG“ und „mKBS-3“, Ergebnisbericht, BGR Hannover.
- Müller et al. (2017). Implementation of the full-scale emplacement (FE) experiment at the Mont Terri rock laboratory, Swiss J Geosci (2017) 110:287–306, DOI 10.1007/s00015-016-0251-2, Springer Verlag.
- Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.-J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wieczorek, K. & Xie, M. (2012): Integrität geotechnischer Barrieren - Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-287; Köln.
- Nagra. (2002). SMA/WLB: Bohrlochversiegelung/-verfüllung SB4a/schräg. Tech. rep., Nagra.
- Neumann, H., Rahimian, I., & Paczynska-Lahme, B. (1992). Zur Strukturalterung von Bitumen. Bitumen, 2, 54-56.
- Neumann, H.-J. (1995). Was ist Bitumen? Bitumen, 4/95, 146-151.
- OCZ (1996). Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld: Richtlinien des Oberbergamtes in Clausthal-Zellerfeld für das Verfüllen und Abdecken von Tagesschächten vom 15.02.1996-11.2-10.2-3/95II-BIIf5.2-II.
- Posiva & SKB (2017). Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository, Conclusions and recommendations from a joint SKB and Posiva working group, Posiva SKB Report 01, Olkiluoto and Stockholm.
- Pöhler, M., Amelung, P., Bollingerfehr, W., Engelhardt, H.J., Filbert, W. & Tholen, M. (2010). Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle im Tongestein. ERATO. Abschlussbericht. Förderkennzeichen 02E 10288, DBE TECHNOLOGY GmbH, TEC-28-2008-AB, Peine.
- Pusch R, Ramqvist G, 2007. Borehole project – Final report of Phase 3. SKB R-07-58, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Selden, P., & Nudds, J. (2006). Fenster zur Evolution: Berühmte Fossilfundstellen der Welt. (P. Selden, Hrsg.) Heidelberg: Elsevier, Spektrum Akademischer Verlag.
- Pusch, R. (1998). Backfilling with mixtures of bentonite/ballast materials or natural smectite clay?, Technical Report TR-98-06, SKB, Stockholm, Sweden.
- Radenberg, M. (2014). Einfluss der chemischen, rheologischen und physikalischen Grundeigenschaften von Straßenbaubitumen auf das Adhäsionsverhalten unterschiedlicher Gesteinskörnungen, Schlussbericht, Deutsches Asphaltinstitut, Bochum.
- Radenberg, M. (2017). Zusammenhang zwischen Bitumenchemie und straßenbautechnischen Eigenschaften, Literaturrecherche, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau, Heft S 106.
- Selden, P. A. & Nudds, J. R. (2006). Fenster zur Evolution: Berühmte Fossilfundstellen der Welt. Spektrum Akademischer Verlag, 160 Seiten, ISBN-10 : 3827417716
- Sitz, P. (1997). Materialuntersuchungen für Mehrkomponentensysteme auf Ton/Bentonit-Basis für Dichtung und Lastabtrag, mit hohem Rückhaltevermögen, für den langzeitsicheren Verschluss von UTD und Endlagern im Salinar. – Abschlussbericht, FKZ 02C0193, TU Bergakademie Freiberg.
- SKB (2005a). Site investigation Oskarshamn – annual report 2005, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- SKB (2005b). Site investigation Forsmark – annual report 2005, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- SKB (2010a): Design, production and initial state of the closure. - Technical Report TR-10-17, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- SKB (2010b). Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site, SKB Technical Report TR-10-47, Stockholm.
- SKB (2010c). Corrosion calculations report for the safety assessment SR site, TR-10-66, Stockholm.
- SKB (2011). Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark Main report of the SR-Site project, Volume I, Technical Report TR-11-01, Stockholm.
- Thiedau, J., Maßmann, J., Guevara, C., Weihmann, S. & Alfara, A. (2021). Analysen zur Integrität von geologischen Barrieren von Endlagersystemen im Kristallin, Forschungsprojekt CHRISTA-II, Ergebnisbericht, BGR Hannover.

- Thienel, K.-C. (2011). Werkstoffe des Bauwesens, Dauerhaftigkeit von Beton. Tech. rep., Universität der Bundeswehr München Institut für Werkstoffe des Bauwesens Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen.
- Thyssen Schachtbau (2015). Langzeitsichere Verschlussbauwerke und Abdichtungsmaßnahmen im Kali- und Steinsalzbergbau, Referenzliste SBB Verwahrung. <https://www.thyssen-schachtbau.com/2-schachtbau-referenzen-de>, Abruf 29.11.2019.
- Van Geet, M., Bastiaens, W., Volckaert, G., Weetjens, E., Sillen, X., Maes, N., Imbert, Ch., Billaud, P., Touzé, G., Filippi, M., Plas, F., Villar, M.V., Garcia-Gutiérrez, M., Mingarro, M., Gens, A. & Vallejan, B. (2009). RESEAL II, A large-scale in situ demonstration test for repository sealing in an argillaceous host rock – Phase II. Final Report, EUR 24161 EN, European Commission, Brussels.
- Volckaert, G., Holvoet, F.-X. G., Vaunat, J., Imbert, C., Villar, M.V., & Lepotier, C. (1997). A large scale in situ demonstration for REpository SEALing in an argillaceous host rock. In situ testing in underground research laboratories for radioactive waste disposal Proceedings of a Cluster seminar held in Alden Biesen, Belgium, 10 and 11 December 1997.
- Wagner, K. (2005). Beitrag zur Bewertung der Sicherheit untertägiger Verschlussbauwerke im Salinargebirge. Dissertation, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau der Technischen Universität Bergakademie Freiberg.
- Weitkamp, A., Frenzel, B., Krumbholz, M., Mrugalla, S. & Sönnke, J. (2021). CHRISTA-II – Beschreibung des generischen geologischen Models für das Endlagersystem „überlagernder ewG“. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Ergebnisbericht; Hannover.
- White, M., Doudou, S., Bosgiraud, J.-M., Foin, R., Czaikowski, O., Gentles, D., [...], Svoboda, J. (2016a). DOPAS Work Package 4 - Summary of Progress on, and Performance Evaluation of, Design, Construction and Monitoring of Plugs and Seals. WP4 Integrated Report, Deliverable 4.4, DOPAS Consortium, European Commission, Luxembourg.
- White, M., Doudou, S., Bosgiraud, J.-M., Foin, R., Czaikowski, O., Grahm, P., [...], Svoboda, J. (2016b). DOPAS Work Package 3 - Summary of, and Lessons Learned from, Design and Construction of the DOPAS Experiments. WP3 Final Summary Report, Deliverable 3.30, DOPAS Consortium, European Commission, Luxembourg.
- Wilsnack, Th., Sitz, P., Rumphorst, K. & Hunstock, F. (2008). Flüssigkeitsdichte Verwahrung von Schächten. Kali und Steinsalz, Heft 3.
- Wolf, M. (April 1989). Mikrobieller Abbau von Bitumen. Technischer Bericht, Nagra.
- Yildizdag, K., Herklotz, M., Jobmann, M., Polster, M., Schonebeck, M., & Uhlig, L. (2008). Investigation on the THM Behavior of a Heated Bentonite Barrier by Measurements and Numerical Calculations. Final Report, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Zirkler, E. (2001). Asphalt - ein Werkstoff durch Jahrtausende. Giesel Verlag.

Abkürzungsverzeichnis

ALZ	Auflockerungszone
ANDRA	Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (Nationale Agen- tur für das Management radioaktiver Abfälle)
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung
BE	Brennelemente
BFM	Backfilling Machine
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BSK-RCu	Rückholbare Brennstabkokille mit Kupfermantel
Ca	Calzium
CSD-B	Kokille mit verglasten Spülwässern
CSD-C	Kokille mit verpressten Hüllrohrstücken und Strukturteilen
CSD-V	Kokille mit verglasten Wärme entwickelnden Abfällen aus der Wiederaufarbei- tung
DE	Dichtelement
DOMPLU	Dome Plug (In-situ Experiment im Äspö Untertagelabor)
DOPAS	Full scale Demonstration Of Plugs And Seals (Europäisches Forschungs-Ver- bundprojekt)
EndlSiAnfV	Endlagersicherheitsanforderungsverordnung
ESDRED	Engineering Studies and Demonstration of Repository Designs (Europäisches Forschungs-Verbundprojekt)
ESP	Enhanced Sealing Project (In-situ Experiment im Untertagelabor in Kanada)
ewG	einschlusswirksamer Gebirgsbereich
FEP	Features, Events and Processes
GOK	Geländeoberkante
IAEA	International Atomic Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
KBS-3	Kärnbränslesäkerhet, nuclear fuel Safety
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KONEKD	Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente in Kristallinge- stein in Deutschland (Forschungsprojekt)
OCZ	Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld
OECD/NEA	Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) / Nuclear Energy Agency (NEA)
POPLU	Deposition tunnel end plug experiment (In-situ Experiment in ONKALO, Finn- land)
RESEAL	A large-scale in-situ demonstration test for repository sealing in an argillaceous host rock
RESUS	Grundlagenentwicklung für repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchun- gen und zur sicherheitsgerichteten Abwägung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen für die sichere Endlagerung hoch- radioaktiver Abfälle (Forschungsprojekt)

RGI	Radiologischer GeringfügigkeitsIndex
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB (Schwedisches Entsorgungsunternehmen für radioaktive Abfälle)
TSX	Tunnel Sealing Experiment (In-situ Experiment im Untertagelabor in Kanada)
TU	Technische Universität
WL	Widerlager

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