



Sachplan Geologische Tiefenlager, Etappe 3

Stellungnahme der EGT zum Konzept zur Versiegelung und zum Verschluss eines Geologischen Tiefenlagers (NAB 21-12)



10. November 2023

Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung (EGT)

Sachplan Geologische Tiefenlager, Etappe 3

Stellungnahme der EGT zum Konzept zur Versiegelung und zum Verschluss eines Geologischen Tiefenlagers (NAB 21-12)

10. November 2023

© Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung EGT

www.egt-schweiz.ch

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Anlass und Ziele der Stellungnahme	3
1.2	Anforderungen an das Verschlusskonzept	3
1.3	Konkretisierung und Nachweise des Verschlusskonzeptes für das RBG	5
1.4	Zentrale Elemente des Verschlusskonzeptes der Nagra	6
1.5	Berichtsaufbau und Autorenschaft	7
2	Anforderungen aus der Perspektive der Langzeitsicherheit	8
2.1	Rückhaltung und langsame Freisetzung der Radionuklide	8
2.2	Beherrschung der Gasdrücke	10
2.3	Berücksichtigung geochemischer Wechselwirkungen	12
2.4	Berücksichtigung langfristiger geologischer Prozesse	16
3	Anforderungen im Hinblick auf die Betriebssicherheit	17
4	Anforderungen, abgeleitet aus umweltrechtlichen Aspekten	19
5	Anforderungen aus wirtschaftlicher Sicht	20
6	Anforderungen für die bautechnische Umsetzung	21
7	Anforderungen hinsichtlich der Rückholbarkeit der Abfälle	23
8	Offene Fragen und Empfehlungen	24
8.1	Versiegelungskonzept, Nachweise und alternative Varianten	24
8.2	Spezifische Anforderungen an die Versiegelungen und Verfüllungen	25
8.3	Langfristigen Funktionsfähigkeit der Versiegelungskomponenten	25
9	Referenzen	27

1 Einleitung

1.1 Anlass und Ziele der Stellungnahme

Im Dezember 2021 veröffentlichte Nagra den Bericht NAB 21-12, welcher Hintergrundinformationen zum Entsorgungsprogramm (EP) 2021 liefert und die Antwort auf die Bundesratsaufgabe 5.4 zum EP 2016 darstellen soll. Der NAB 21-12 beschreibt das Verschlusskonzept eines geologischen Tiefenlagers und eine erste konzeptuelle Auslegung der Verschlussbauwerke. NAB 21-12 nimmt zudem Bezug auf die ENSI-Präzisierungen der sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager (ENSI 33/649) vom November 2018. Die sicherheitstechnischen Vorgaben des ENSI zu Etappe 3 beinhalten folgende Anforderungen an das Verschlusskonzept:

Das Konzept für die Stilllegung der Oberflächeninfrastruktur und das Konzept für den Verschluss eines geologischen Tiefenlagers sind gestützt auf Art. 23 KEV mit dem Rahmenbewilligungsgesuch für den gewählten Standort einzureichen. Mit dem Verschluss ist das geologische Tiefenlager in einen Zustand zu überführen, in welchem keine weiteren Massnahmen zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit erforderlich sind. Der Verschluss umfasst das Verfüllen sämtlicher nach der Beobachtungsphase noch offener Teile des geologischen Tiefenlagers, das Überführen des Pilotlagers in einen langfristig sicheren Zustand und das Versiegeln der für die Langzeitsicherheit und die Sicherung massgebenden Teile (Art. 69 KEV).

Die EGT hat den NAB 21-12 hinsichtlich der vorgenannten Anforderungen geprüft und bewertet; die vorliegende Stellungnahme präsentiert eine Zusammenfassung der Ergebnisse. Weitere wichtige ältere Dokumente zum Thema Verschluss, welche in dieser Stellungnahme verwendet werden, sind die folgenden Nagra-Berichte:

- NTB 14-03 (Bewertung der Barriersysteme E2 SGT),
- NTB 14-10 (Transport und Durchflussberechnungen),
- NTB 16-03 (Gas-Produktion und Transport),
- NAB 20-31 (Mindestabstand HAA-SMA im Kombilager),
- NTB 21-02 (Forschungs- und Entwicklungsplan 2021),
- NAB 21-17 (GAST Status Report).

Die Ausführungen der Nagra anlässlich der Nagra-ENSI-EGT Fachsitzung vom 13.4.23 zum GAST-Experiment werden in diesem Bericht zusätzlich berücksichtigt.

1.2 Anforderungen an das Verschlusskonzept

Gemäss Art. 31 KEG umfasst der Verschluss das Verfüllen und Versiegeln aller untertägigen Hohlräume sowie der Zugangsbauwerke eines geologischen Tiefenlagers nach Abschluss der Beobachtungsphase. Art. 69 Abs. 1 KEV schreibt vor, dass der Eigentümer beim Verschluss eines geologischen Tiefenlagers alle [noch offenen] Hohlräume des Tiefenlagers verfüllen und die für die Langzeitsicherheit und die Sicherung massgebenden Teile versiegeln muss. Dies beinhaltet gemäss Art. 69 Abs. 2 KEV die Überführung des Pilotlagers in einen langfristig sicheren Zustand und die Gewährleistung der Langzeitsicherheit. Art. 69 Abs. 3 KEV hält zudem fest, dass der Eigentümer des Tiefenlagers insbesondere dafür sorgen muss, dass über die verfüllten Zugänge keine unzulässige Freisetzung von Radionukliden erfolgt, und dass die vor der Errichtung des geologischen Tiefenlagers bestehende Trennung der wasserführenden Gesteinsschichten langfristig wiederhergestellt wird. Art. 22 Abs. 2 Bst. k KEG und Art.

42 Abs. 1 KEV schreiben vor, dass der Inhaber einer Betriebsbewilligung alle zehn Jahre [...] den Verschlussplan überprüfen und aktualisieren muss.

Die Richtlinie ENSI-G03 stellt in Art. 7.3 "Verfüllung und Versiegelung" zusätzlich folgende Forderungen:

- Die Lagerstollen des Hauptlagers für hochaktive Abfälle sind im Anschluss an die Einlagerung der Abfallgebinde fortlaufend zu verfüllen und unmittelbar nach Abschluss der Verfüllung zu versiegeln.
- Die Versiegelungen der SMA-Lagerkavernen und -stollen haben eine ausreichende mechanische Stabilität aufzuweisen, um die verfüllten Lagerstollen zu schützen und dem Quell- und Gasdruck in den Lagerstollen standzuhalten.

ENSI-G03 Art. 7.5 verlangt zusätzlich, dass Vorkehrungen für einen temporären Verschluss zu treffen seien. Dieser habe sich vom ordnungsgemässen Verschluss (Art. 39 Abs. 3&4 KEG) dadurch zu unterscheiden, dass eine vereinfachte (Teil-)Versiegelung durch schnelleres Handeln während "einiger Wochen bis Monaten" möglich sein sollte. Zudem solle die Anlage eine Reversibilität der getroffenen Massnahmen ermöglichen.

Nagra hat eine 5-stufige Hierarchie von Anforderungen an die Lagerauslegung (inklusive Verschluss) entwickelt. Die strategisch höchsten Anforderungen (Stufe 1) an den Verschluss bestehen nach Nagra (NAB 21-12) aus folgenden Gruppen:

- Langzeitsicherheit
- Arbeits- und Betriebssicherheit sowie Machbarkeit
- Umwelt, Raumplanung und Gesellschaft
- Ressourcen und Wirtschaftlichkeit

Für diese Gruppen von Anforderungen formuliert die Nagra in NAB 21-12 jeweils Ziele, denen die EGT grundsätzlich folgen kann. Aus Sicht der EGT ist das Verschlusskonzept insbesondere vor dem Hintergrund folgender Anforderungen und Ziele zu bewerten:

Anforderungen aus der Perspektive der Langzeitsicherheit

- Rückhaltung und langsame Freisetzung der Radionuklide
- Kontrolle der Gasdrücke und -flüsse im SMA-Lager
- Berücksichtigung geochemischer Wechselwirkungen
- Berücksichtigung langfristiger geologischer Prozesse

Anforderungen im Hinblick auf die Betriebssicherheit

- Konventionelle Betriebssicherheit und Strahlenschutz
- Gefährdungsbilder und betriebliche Auswirkungen im Standortgebiet

Anforderungen, abgeleitet aus umweltrechtlichen Aspekten

- Trennung von Grundwasserstockwerken
- Schonung von Umwelt-Ressourcen (Energie, Rohstoffe, Luft)
- Wiederverwendung von Ausbruch-Materialien
- Schutz der Erdoberfläche (Bodenbewegungen etc.)

Anforderungen aus wirtschaftlicher Sicht

- Alternative Barrierekonzepte und Optimierung der Wirtschaftlichkeit

Anforderungen für die bautechnischen Umsetzung

- Vergleich mit bisherigen Erfahrungen im Berg-, Tunnel- und Kavernenbau
- Spezifische Anforderungen an das Bauwerk
- Dimensionierung der Verschlusselemente
- QS Management und Überprüfung der Zielerreichung

Anforderungen hinsichtlich der Rückholbarkeit der Abfälle

- Einfache Rückbaubarkeit von Versiegelung und Verschluss (ohne grossen Aufwand)

1.3 Konkretisierung und Nachweise des Verschlusskonzeptes für das RBG

Die Entwicklung des Verschlusskonzeptes und einer detaillierten Auslegung von Verschluss- und Versieglungsmassnahmen erfolgen in mehreren Phasen, welche im Realisierungsplan des Forschungsprogramms der Nagra 2021 (NTB 21-02, insbesondere Kap. 7.9, Kap. 8.4.8, Kap. 8.5.3.3) dokumentiert sind. Für das Rahmenbewilligungsgesuch (RBG) wird nur ein standortspezifisches Verschlusskonzept gefordert. Nach Einreichung des RBG erfolgt die stufengerechte Konkretisierung des Verschlusskonzeptes gemäss den Anforderungen an das nukleare Baubewilligungsgesuch und an das nukleare Betriebsbewilligungsgesuch. Entsprechend erfolgt die detaillierte Auslegung der Versieglungs- und Verschlussbauwerke des SMA-Lagers erst in der Zeitperiode 2030-2040, und jene des HAA-Lagers in der Periode 2040-2050. Das Verschlusskonzept in NAB 21-12 basiert auf dem heutigen Stand der Kenntnisse über die Sicherheitsbarrieren und die Lagerauslegung für ein Kombilager. Das Konzept soll darüber hinaus nach NAB 21-02 auch auf zwei Einzellager (SMA und HAA) anwendbar sein. Grundsätzlich erachtet es die EGT als sinnvoll, das Verschlusskonzept stufengerecht zu konkretisieren.

Das Verschlusskonzept stellt einen zentralen Pfeiler in der Gewährleistung der Langzeitsicherheit für das RBG dar (Abbildung 1) und soll mehrere zentrale Sicherheitsfunktionen erfüllen. Dabei kommt den Sand-Bentonit-Siegeln (S/B Siegel) als Dichtelement der SMA-Kavernen eine tragende Funktion zu. Folgende 4 zentrale Eigenschaften müssen nach Nagra durch die S/B Siegel im SMA Lager erfüllt werden:

- 1 Sie tragen über den gesamten Betrachtungszeitraum zur mechanischen und chemischen Stabilität des SMA-Nahfelds bei.
- 2 Sie beschränken wirksam den Porenwasserfluss entlang der verfüllten Zugangsbauwerke bei frühem Wasserzutritt.
- 3 Sie beschränken den Stofftransport (Radionuklidaustrag) entlang der verfüllten Zugangsbauwerke.
- 4 Die in den SMA-Kavernen produzierten Gase werden durch die S/B Siegel in die Zugangskavernen abgeführt, ohne dass unzulässige Gasüberdrucke entstehen.

Aufgrund dieser grossen funktionellen Bedeutung ist der Nachweis der Funktionsfähigkeit des Verschlusskonzeptes für das RBG von enormer Bedeutung. Die EGT erwartet, dass im RBG für das Verschlusskonzept mit robusten Argumenten aufgezeigt wird, dass alle gestellten Anforderungen auch tatsächlich langfristig erfüllt werden. Dabei sollen die wesentlichen Entwicklungsszenarien im Nahfeld explizit berücksichtigt und diskutiert werden. Diese Szenarien umfassen die zeitliche Entwicklung der

Belastungen und Zustände aller Versiegelungsbauwerke während des Betriebs, der Beobachtungs- und Verschlussphase sowie des gesamten Zeitraums, während dessen die Langzeitsicherheit betrachtet wird. Die Robustheit der Nachweise bemisst sich an der Belastbarkeit des Prozessverständnisses, der Realitätsnähe der Modellannahmen und der Konsistenz aller experimentellen Befunde.

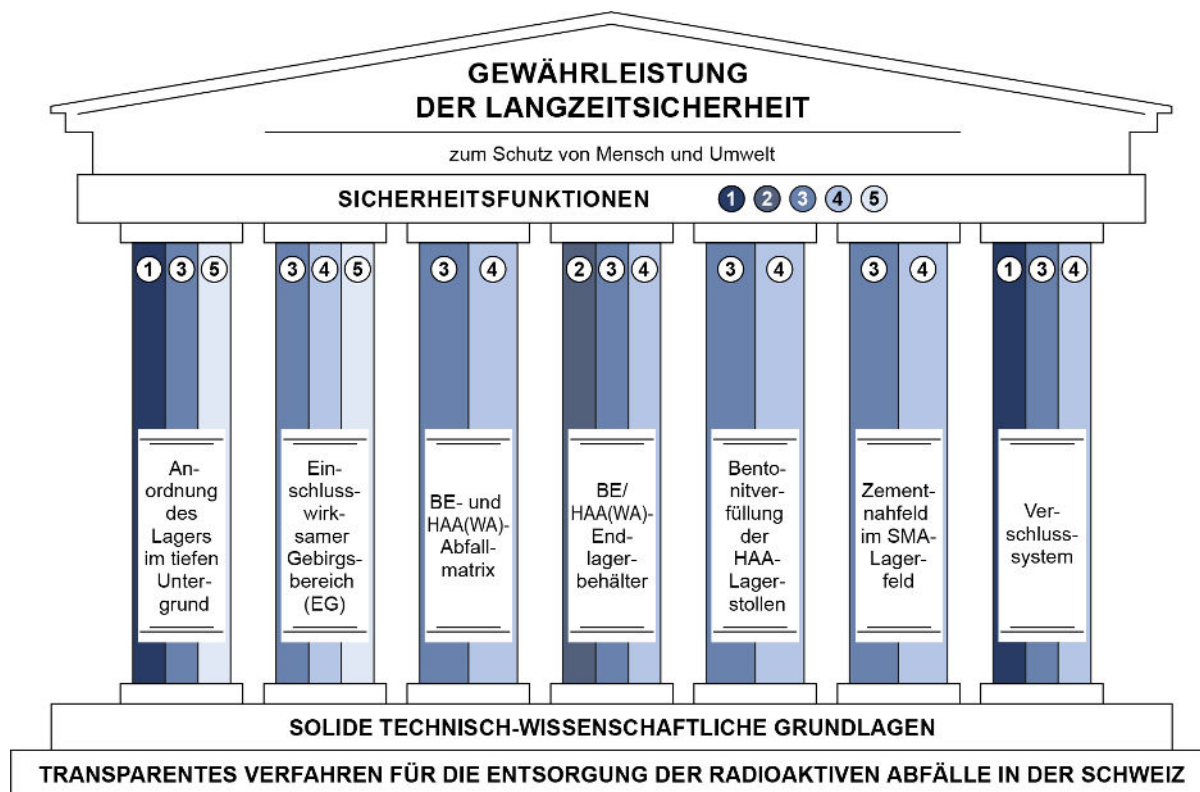


Abbildung 1: Sicherheitstechnische Relevanz der SMA-Siegel im Rahmen des Sicherheitsnachweises der Nagra

1.4 Zentrale Elemente des Verschlusskonzeptes der Nagra

Das im NAB 21-12 vorgestellte Verschlusskonzept besteht aus 3 Typen von Versiegelungsbauwerken: V1 (am Zugang zu jeder Lagerkammer), V2 (an den Lagerfeldzugängen) und V3 (in den Zugangsbauwerken). Im Konzept sind ebenfalls die Verfüllungen der Zugangsbauwerke, die Lagerfeldzugänge und die Lagerstollen/Kavernen enthalten. Alle Versiegelungsbauwerke basieren gemäss NAB 21-12 auf einem ähnlichen Bauwerkstyp und dienen der Gewährleistung der Langzeitsicherheit. Eine Hierarchisierung von V1, V2 und V3 erfolgt nicht, d.h. allen drei Verschlussbauwerkstypen wird die gleiche Bedeutung zugemessen. Sie bestehen aus einem Dichtelement (10 m kompaktierbarer Bentonit für HAA, respektive 20 m Sand-Bentonit-Gemischen für SMA) mit einer intrinsischen Permeabilität von 10^{-17} bis 10^{-19} m², einem 4 m respektive 7.5 m langen Widerlager aus hochwertigem Konstruktionsbeton (> 25 MPa Druckfestigkeit) und 4 je 1-1.5 m starken Übergangsschichten. Für das Versiegelungsbauwerk V3 sind 3 in Reihe geschaltete Dichtelemente vorgesehen. Die Übergangsschichten haben sowohl bautechnische als auch geochemische und hydraulische Funktionen.

Das V1-Widerlager muss gemäss NAB 21-12 einer Wassersäule von bis zu 100 bar standhalten (Schutz gegen Wassereintrüche). Zudem darf während der ersten 100 Jahre nach Verschluss des Endlagers der kumulative Wasserfluss durch den Verschluss V1 dessen Porenvolumen nicht überschreiten. In

allen Elementen des Abdichtungssystems dürfen endlagerinduzierte Effekte nicht zu Temperaturveränderungen führen, die mehr als ± 20 °C vom ungestörten Zustand abweichen. Die Hydratationswärme, die durch das Befüllen der SMA-Kavernen mit Verfüllmörtel entsteht, darf nicht zu Temperaturen führen, die höher sind als die Paläotemperaturen des Opalinustons (ca. 90°C), und sie darf nicht zu nachteiligen Auswirkungen auf die benachbarten technischen Barrieren und einer Schädigung der Endlagerbehälter führen (z.B. hitzebedingte Rissbildung oder verzögerte Ettringitbildung).

Die Verfüllungen der Lagerstollen/Kavernen werden als Teil der Nahfeldbarriere betrachtet; die definitiven Materialien wurden durch die Nagra bewusst noch nicht festgelegt. Die Verfüllungen der Lagerfeldzugänge und des zentralen Bereiches dienen der langfristigen mechanischen Stabilisierung der Hohlräume, als Gasspeicher für volatile ^{14}C -Nuklide und als Erosionsschutz für die V1 und V2-Versiegelungen. Die Verfüllung der SMA-Lagerkavernen soll ein Gasspeichervolumen (20 % wasserfüllbare Mindestporosität) zur Verfügung stellen. Der M1-Mörtel der SMA-Lagerkavernenverfüllung übernimmt die lagerseitige Widerlagerfunktion und soll die entstehenden Quelldrücke des Dichtelements aufnehmen. Durch seine einheitliche Korngrösse ermöglicht dieser die Aufrechterhaltung eines Mindestporenraums unter Kompressionsdrücken. Die Gaspermeabilität des Verfüllmörtels der SMA-Einlagerungskaverne soll $\geq 10^{-10}$ m² betragen. Die Schachtverfüllungen haben verschiedene Funktionen: Sie schützen vor Fremdeinwirkungen im Allgemeinen, sie schirmen die V3-Versiegelungen vor Erosion ab und dienen als Barriere zwischen Aquiferen sowie im unteren Teil als Stütze (Auflager) für die Versiegelungen. Dies ist auch der Grund, wieso sie setzungsstabil sein müssen.

1.5 Berichtsaufbau und Autorenschaft

Die Anforderungen an das Verschlusskonzept gemäss Kapitel 1.2 werden in den nachfolgenden Kapiteln 2-7 systematisch bewertet und in Kapitel 8 zusammenfassend beurteilt. In der Beurteilung der Anforderungen werden zunächst jeweils die wesentlichen Aussagen der Nagra zum Verschlusskonzept für ein geologisches Tiefenlager (gemäss NAB 21-12) zusammengefasst und im Anschluss die Beurteilung der EGT dargelegt.

Die Autoren dieses Berichtes waren folgende Experten der EGT: Prof. em. Dr. Simon Löw (PL), Prof. Dr. Olaf Kolditz, Prof. Dr. Heinz Konietzky, Prof. Dr. Thorsten Schäfer, Prof. em. Dr. Friedemann Wenzel.

2 Anforderungen aus der Perspektive der Langzeitsicherheit

2.1 Rückhaltung und langsame Freisetzung der Radionuklide

Aussagen der Nagra

Die langfristige Rückhaltung der Radionuklide wird durch Versiegelungen auf Bentonitbasis erreicht, welche den Wassereintritt durch die untertägigen Zugänge und die Korrosion der Lagerbehälter so lange wie möglich verzögern. Anschliessend erfolgt eine langsame Freisetzung der Radionuklide, welche zum Teil im Bentonit durch Sorption zurückgehalten werden. Die Sorption und geringe Wasserdurchlässigkeit der Versiegelungen auf Bentonitbasis sollen sicherstellen, dass die Freisetzung der Radionuklide primär durch das intakte Wirtsgestein erfolgt. Eine Schädigung des Wirtsgesteins (Auflockerungszone (EDZ) im Opalinuston mit erhöhter Durchlässigkeit) soll durch einen formschlüssigen Einbau der Versiegelungen und das Quellen des gesättigten Bentonits weitgehend unterbunden werden. Die Gasdurchlässigkeit der SMA-Versiegelungen und eine entsprechende Kontrolle der Gasdrücke soll durch eine Sand-Bentonit-Mischung (80/20 Massen-Prozente) erreicht werden, welche nach Nagra eine um 6 Grössenordnungen höhere Durchlässigkeit für Gas aufweist als für Wasser. Angestrebt wird eine intrinsische Permeabilität des gequollenen Bentonits von 10^{-17} bis 10^{-19} m² (entsprechend einer gesättigten Wasser-Durchlässigkeit von 10^{-10} bis 10^{-12} m/s).

Im NTB 14-10 untersucht Nagra den Fluss des Wassers und den Transport der Radionuklide durch die Untertagehöhlräume und die geologische Barriere für die HAA- und SMA-Lagerauslegungen und Versiegelungsbauwerke von SGT Etappe 2 (Abbildung 2). Die Lagerauslegung in Etappe 2 weicht hauptsächlich insofern von Etappe 3 ab, als hier nun das Konzept eines Kombilagers den Basisfall definiert und keine Zwischensiegel mehr zum Einsatz kommen. Die 3 Hauptversiegelungen und Verfüllungen in Etappe 2 sind im Prinzip mit der Lagerauslegung in Etappe 3 vergleichbar. Die Autoren von NTB 14-10 untersuchen den langfristigen stationären Wasserdurchfluss und den Radionuklidtransport für unterschiedliche Wasser-Durchlässigkeiten der V1 Siegel am Ende der HAA-Stollen (Verfüllung 10^{-13} bis 10^{-7} m/s, mit EDZ 10^{-12} bis 10^{-6} m/s¹) und der EDZ in den SMA-Kavernen (10^{-10} bis 10^{-6} m/s). Zusätzlich werden verschiedene Lagerkonfigurationen (3 Schächte mit Zwischensiegeln), verschiedene Ausbildungen der EDZ und Transporteigenschaften (Dispersion und Diffusion) untersucht. Für die Wasserdurchlässigkeit der Verfüllungen aus Sand-Bentonit-Gemisch oder Ausbruchsmaterial wird ein Wert von 10^{-9} m/s (EDZ 10^{-10} m/s) und für die V2/V3³-Siegel aus Sand-Bentonit-Gemisch von 10^{-11} m/s (EDZ 10^{-11} m/s) angenommen. Für die Wasserdurchlässigkeiten der Auflockerungszone (EDZ) werden um eine Grössenordnung höhere Werte angesetzt.

Die Autoren kommen zu folgenden Schlussfolgerungen: "Die unter Verwendung von realistischen Parameterwerten für die hydraulischen Eigenschaften der Versiegelungsbauwerke und der zugehörigen Auflockerungszonen berechneten Freisetzungsraten aus den Zugangsbauwerken sind für alle betrachteten Varianten äusserst niedrig und deutlich geringer als die Freisetzungsraten aus dem Wirtsgestein. Schliesslich liegen die berechneten Dosiswerte auch für sehr ungünstige Parameterwerte für die hydraulischen Eigenschaften der Versiegelungsbauwerke und der zugehörigen Auflockerungszonen deutlich unterhalb des behördlichen Schutzkriteriums von 0,1 mSv pro Jahr."

¹ Kationen-Porosität von 0.36 und Mächtigkeit der Auflockerungszone von 0.7 m

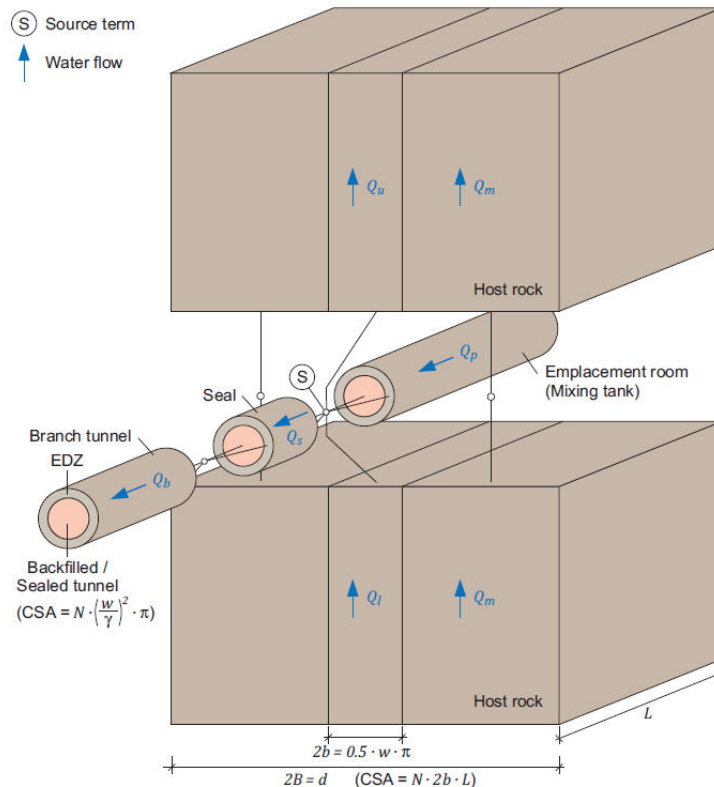


Abbildung 2: Konzeptuelles Modell für den Radionuklidtransport aus dem geologischen Tiefenlager nach NTB 14-10.

Beurteilung der EGT

Die wesentlichen Unterschiede zwischen den Modellannahmen in NTB 14-10 und der heutigen Lagerauslegung und dem aktuellen Versiegelungskonzept (NAB 21-12) beziehen sich auf folgende Eigenschaften:

- Ein Kombilager für SMA/HAA, respektive urspr. zwei Einzellager
- Die Mächtigkeit der wasserdurchlässigen EDZ (urspr. von 0,7 m)
- Die Mächtigkeit der geologischen Barriere (urspr. 100 m)
- Die Mischungsverhältnisse in den Sand-Bentonit-Siegeln (70/30 Massen-Prozente)
- Die Länge der Sand-Bentonit-Siegel (urspr. je 2 mal 50 m)
- Eine urspr. Unterscheidung zwischen Schachtsiegel (Bentonit) und Rampensiegel (Sand/Bentonit-Gemisch)
- Urspr. keine Lüftungstunnel für HAA
- Andere Geometrie der Hohlräume im zentralen Bereich

Die berechneten Modellszenarien betrachten nur einen stationären hydraulischen Zustand des Endlagers nach sehr langen Zeiträumen, kontrolliert durch einen ungestörten vertikalen Potenzialgradienten von 1 m/m (gerichtet von unten nach oben) über den ganzen Opalinuston (NTB 14-10, Seite A-1). Es kann mit diesen Modellrechnungen gezeigt werden, dass in diesem stationären Fall der Grundwasserfluss und der Radionuklidtransport entlang der Untertagehohlräume und durch die Schächte/Rampe in die überliegenden Aquifere für die geohydraulischen Annahmen (Wasser-Durchlässigkeiten und entsprechende Permeabilitäten) im NAB 21-12 sehr gering sind. Zudem wird ersichtlich, dass die Transportraten durch die Untertagebauten deutlich kleiner sind als direkt (vertikal) durch

den Opalinuston. Allen Modellrechnungen liegt die Annahme zugrunde, dass der Wasserzufluss durch eine intakte Opalinustonbarriere erfolgt und demzufolge stark begrenzt ist. Es kann vermutet werden, dass die neue Lagerkonfiguration in SGT Etappe 3 diese Resultate nicht stark verändern würde, was durch entsprechende Modellrechnungen noch belegt werden sollte.

Auf der anderen Seite fehlt in NAB 21-12 ein systematisches "Drehbuch" über die zeitliche Lagerentwicklung in Bezug auf die Wasser- und Gasflüsse vor und nach dem Einbau der Versiegelungen und Verfüllungen, an dem sich die relevanten Modellrechnungen orientieren könnten. Drehbücher über die transienten Nahfeldprozesse wurden zwar in den NTBs 14-13 und 14-14 erstellt, aber das Versiegelungskonzept wurde bisher nicht in diesem Rahmen evaluiert. In den Modellrechnungen werden keine Wasserzutritte in die Lagerstollen durch die Untertagebauwerke analysiert, und die transiente Entwicklung der Lageraufsättigung und Porenwasserdrücke wird nicht untersucht. Wie in den Kapiteln 1.2 und 1.4 ausgeführt, stellen eine Kontrolle der Wasserzutritte und die Möglichkeit eines kurzfristigen Verschlusses aber wesentliche Anforderungen an das Versiegelungskonzept dar. Es können daher aus den vorliegenden Modellrechnungen zum Wasserfluss und den Radionuklidosen nur begrenzt Anforderungen an die V1, V2 und V3 Siegel abgeleitet werden.

2.2 Beherrschung der Gasdrücke

Aussagen der Nagra

Neben dem Rückhalt und einer retardierten Freisetzung von Radionukliden (2.1) muss das Verschlussbauwerk auch eine Beschränkung der Gasdrücke und einen kontrollierten Transport der während der Einlagerung entstehenden Gase aus dem SMA-Lager gewährleisten (Gasmanagement). In NAB 21-12 wird primär die Beherrschung von ungünstigen Gasdrücken erwähnt, um Schädigungen der geologischen und geotechnischen Barrieren zu vermeiden (Abschn. 3.1.2 und 3.1.3). Bezüglich des Gasmanagements müssen nach Nagra Versiegelungen von SMA-Lagerkammern (V1) und Lagerfeldern (V2) dementsprechend einen gewissen Gasfluss (Gasdurchlässigkeit gemäss Kapitel 2.1 oben) gewährleisten. Für die V1-Versiegelungen der HAA-Stollen wird primär von Bentonit und geringen Mengen an Zusätzen (z.B. Sand) ausgegangen. Die Versiegelung des Zugangsbauwerks (V3) hingegen muss eine vollständige hydraulische Trennung des Tiefenlagers von wasserführenden Schichten im Hangenden gewährleisten. Die Verfüllungen der Lagerfeldzugänge, der Pilotlager, des zentralen Bereiches und der Kontrollstollen (VF1, respektive VF2) müssen genügend Gasspeichervolumen durch ausreichende Porosität des Verfüllmaterials zur Verfügung stellen, um die Gasdrücke hinreichend zu beschränken. Im NAB 21-12 erfolgt hier keine klare Differenzierung zwischen SMA- und HAA-Lagerteilen.

Eine entscheidende Rolle spielt dabei nach Nagra das optimale Einstellen von Gaspermeabilitäten und hydraulischen Leitfähigkeiten der Dichtelemente, um einerseits einen gewissen Gasfluss zu ermöglichen und andererseits eine wirksame hydraulische Barriere zu realisieren (Transport gelöster Radionuklide in der wässrigen Phase). Um eine gewisse Gasdurchlässigkeit auch im gequollenen Zustand für die SMA-relevanten Versiegelungsbauwerke aufrechterhalten zu können, soll eine Sand-Bentonit-Mischung (80:20) verwendet werden. Versuche im GAST-Projekt bzw. numerische Simulationen weisen nach Nagra darauf hin, dass sich in diesem Fall die relativen Werte für die Permeabilität von Wasser und Gas um bis zu sechs Grössenordnungen unterscheiden können. Im NAB 21-12 wird diesbezüglich aber nur auf vorläufige Studien und unvollständige Konferenzberichte verwiesen (Spillmann et al. 2015; „Nagra in prep.“). In NAB 21-17 werden die Resultate des GAST Experimentes bis Ende 2021 im Detail zusammengefasst und die vorhandenen Resultate bewertet (eine Nachmodellierung war bisher erfolglos). Das Experiment ist komplex und musste zunächst aufgrund einer Leckage am Sensorsystem unterbrochen werden (leakage event vom 28.01.2014). Die Leckage konnte anschliessend abgedichtet

und das experimentelle Programm (Aufsättigung und „Gas Property Test“, GPT) mit einer entsprechenden Zeitverzögerung fortgesetzt werden. Dabei konnten insbesondere die hydraulischen Eigenschaften auf kleiner (Piezometerversuche, PPE) Skala und im Filtermassstab charakterisiert und entsprechende Parameterbereiche für hydraulische Leitfähigkeiten bestimmt werden ($3\text{-}5 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$). Auf der anderen Seite konnte im Gasflusstest (GPT) kein grossflächiger Gasfluss durch den S/B Siegel erzeugt und entsprechend analysiert werden (der Gasfluss entwickelte sich primär am Top des S/B Siegels und in der Bentonitgranulat-Verfüllung der Firste). Die bisher angenommenen Gasflusseigenschaften und Zweiphasenfluss-Prozesse konnten entsprechend nicht bestätigt werden. Ein zweiter Gasflusstest (GFT), welcher nach der Wiederaufsättigung in den Jahren 2022 bis Anfang 2023 durchgeführt wurde, ist bisher in keinem Arbeitsbericht der Nagra dokumentiert, sondern nur auf Folien, welche anlässlich der Fachsitzung vom 13.04.2023 präsentiert wurden. Es konnte in diesem Experiment ein Gasfluss von mehr als 150 m^3 durch den S/B-Filter erzeugt werden. Die genauen Gasfliesswege sind aber unbekannt. Der Gasfluss stieg im Verlaufe des GFT-Experiments bei konstantem Druckgradienten zwischen den Filterelementen (S02, S14) von 0.5 bis auf fast 100 ml/min an. Die Interpretation dieses Anstiegs ist mehrdeutig (z.B. Entwicklung/Erweiterung präferenzierter Fliesspfade, abnehmende Wassersättigung, etc). Für vergleichbare Druckgradienten und bei hoher Wassersättigung waren die Gasflüsse um einen Faktor 200 höhere als die Wasserflüsse.

Wegen der notwendigen grossen Gasspeicherung sollen die SMA-Lagerstollen mit hochpermeablem Monokorn-Mörtel (M1-Mörtel) und die VF1 und VF2 mit hochporösem und permeablem Sand/Kies/Ton-Gemischen verfüllt werden. Die Widerlager aus unbewehrtem hochwertigem Konstruktionsbeton (Druckfestigkeit 25 MPa) sollen in der Lage sein, Gebirgsdrücke, Quelldrücke und portalseitige hohe Wasserdrücke aufzunehmen. Die Widerlager werden von der Nagra als nicht langzeitbeständig angenommen (NAB 21-12, S. 33), dies im Gegensatz zu den teilweise gaspermeablen Dichtelementen.

Beurteilung der EGT

Die Gaspermeabilitäten spielen eine zentrale Rolle bei der Auslegung der Versieglungsbauwerke des SMA-Lagers sowie bei den geplanten Verfüllungen durch die Nagra. Dieses Thema wird ausführlich im Forschungsplan der Nagra (NTB 21-02) besprochen (z.B. Kap. 8.5.2.2 und 8.5.3.3). Das Verschlusskonzept (NAB 21-12) bezieht sich allerdings nur wenig auf die bisherigen Resultaten von grossskaligen Experimenten. Gemäss NAB 21-17 und der Fachsitzung vom 13.04.2023 zum Stand des GAST-Experiments konnten bisher die Projektziele nicht erreicht werden, d.h. derzeit sind auf Projektskala keine gesicherten Aussagen zur Gaspermeabilität und zu den modellierten Gasströmungen in den Dichtelementen aus Bentonit-Sand-Gemischen möglich. Bei den aktuell vorhandenen Gasströmungsversuchen im GAST-Experiment handelt es sich vermutlich vor allem um präferenzuelle Fliesswege im granularen Bentonit, an Materialgrenzen und lokal im S/B-Filter. Eine gleichmässige Durchströmung von Dichtelementen der Verschlussbauwerke ist – zumindest in Demonstrationsexperimenten mit begrenzter Dauer - offensichtlich schwer zu erreichen; das Gas sucht sich den Weg des geringsten Widerstandes. Wie kleinskalige Laborversuche zeigen (z.B. NTB 16-07), verändert sich der Gastransport in Raum und Zeit aufgrund einer Vielzahl von Einflussfaktoren (u.a. Verdichtung, Spannungsfeld, Sättigung, Porenstruktur, Sättigungspfad). Dieser Befund ist auch relevant für den langfristigen Druckaufbau in den Lagerkammern, welcher entsprechend neu bewertet werden muss. Von den 4 zentralen Anforderungen an die S/B Siegel (Kapitel 1.2) konnten bisher im GAST-Experiment nur die geringe hydraulische Durchlässigkeit und eine grundsätzlich erhöhte Gasdurchlässigkeit nachgewiesen werden. Ein quantitativ kontrollierter Gasabfluss und Gasdruckabbau in den SMA-Kavernen ist aufgrund der bisherigen

grossskaligen experimentellen Daten für das EBS, respektive die V1- und V2-Siegel gemäss NAB 21-12 sehr fraglich.

Limitierende Gasdrücke (insbesondere im Hinblick auf die mögliche Bildung dilatanter Wegsamkeiten und von Gasfracks im Opalinuston) wurden bisher aus den minimalen in-situ Spannungen auf Lagertiefe und den Zugfestigkeiten des intakten Opalinustons abgeleitet und auf etwa 6-9 MPa begrenzt. Wie im ersten Bericht der EGT zur Gasproblematik (EGT, 2020) ausgeführt wird, können durch erhöhte Gasdrücke kritisch orientierte und gespannte Störungen möglicherweise schon bei tieferen Drücken reaktiviert werden und sich zu präferenziellen Gas/Wasserwegsamkeiten ausbilden. Für das Erstellen des Versiegelungskonzept sollten dementsprechend auch Gaswegsamkeiten entlang kritisch gespannter Störungen und die Auswirkungen auf Gasdrücke im Endlagersystem untersucht werden.

Weiterer Untersuchungsbedarf besteht in der Bewertung der zeitlichen Entwicklung der Versiegelungsbauwerke. Die Zweiphasenfluss-Eigenschaften der Dichtelemente ändern sich zeitlich infolge verschiedener Prozesse, u.a. des Quelldrucks, der durch die Wasseraufnahme des Bentonits aus dem umgebenden Wirtsgestein entsteht. Die zeitlichen Auswirkungen auf den Gastransport, die Radionuklid-Ausbreitung und die mechanische Stabilität sind heute noch nicht hinreichend verstanden.

Bei der Bewertung der Eigenschaften von Versiegelungsbauwerken und der Verfüllung sollten auch die Ergebnisse anderer Experimente zu den S/B-Gemischen berücksichtigt und dokumentiert werden (z.B. LASGIT, MEGAS, Sandwich-Experimente für Verschlussbauwerke, GMT, BEACON). Zwar wurde festgehalten, dass die Ergebnisse des GAST-Experiments mit den Ergebnissen vorangegangener Versuche im Felslabor Grimsel übereinstimmen (GMT Experiment), hierbei wurden allerdings z.T. andere Materialien (Kunigel-Bentonit) verwendet, und die Experimente wurden unter unterschiedlichen Randbedingungen durchgeführt.

Die bisherigen Modellrechnungen der Nagra zum Gastransport (insbesondere NTB 08-07, NTB 16-03) bilden eine erste gute Grundlage, sollten aber langfristig unter Berücksichtigung konkreter Bedingungen aus dem Standortvorschlag (Nördlich Lägern) und der Resultate grossskaliger Experimente überprüft und verfeinert werden. Bei den Tiefenlagermodellen für SMA und HAA in Etappe 2 wurden zwar hydraulische (Zweiphasenströmung) und thermische Prozesse für verschiedene Szenarien simuliert, bisher wurden aber noch keine hydro-mechanischen und thermo-mechanischen Effekte berücksichtigt. Entsprechende TH²M Modelle (Thermomechanik unter Zweiphasenströmungsbedingungen) sind mittlerweile verfügbar und sollten langfristig, d.h. nach dem RBG, auch zum Einsatz kommen. Ferner ist auf eine stringente/konsistente Notation bezüglich der intrinsischen Permeabilitäten und hydraulischen Durchlässigkeiten (für gas- and liquide Phasen) zu achten. Dabei sollte immer angegeben werden, welche Grösse gemessen und welche umgerechnet wurde, sowie die entsprechenden Umrechnungsformeln angegeben werden.

2.3 Berücksichtigung geochemischer Wechselwirkungen

Aussagen der Nagra

Die wichtigen geochemisch relevanten Festlegungen (NAB 21-29) im Hinblick auf die Lagerprojekte für das RBG sind:

- HAA-Endlagerbehälter aus Kohlenstoff-Stahl (ohne Beschichtung) und SMA-ELBs aus armiertem Beton
- einschaliges Ausbaukonzept für die Ausbruchsicherung mit Tübbing für HAA-Lagerstollen und zweischaliges Ausbaukonzept mit Spritzbeton/Ortbeton für SMA-Lagerkavernen

- Bentonit-Verfüllung in HAA-Lagerstollen und poröse M1- Zementmörtelverfüllung in SMA Lagerkavernen. In der Umsetzungsvariante (Kapitel 4.3.4.3, NAB 21-29) wird als Verfüllung der SMA-Lagerkavernen neben dem zementbasierten Referenzmörtel auch alternativer Zement (z.B. OPC) und alternative Aggregate wie z.B. Mischabbruch aus dem Rückbau von Kernkraftwerken diskutiert.
- Bentonit-Versiegelung der HAA-Lagerstollen (keine Zwischensiegel innerhalb der Lagerstollen) und gasdurchlässige S/B Versiegelung der SMA-Lagerkavernen.

Im NAB 21-12 werden bzgl. der **Mineralogie** zum Verschlusskonzept des geologischen Tiefenlagers relativ wenig Aussagen gemacht, ausser dass die Verfüllungen der Zugangsbauwerke (Schachtverfüllungen) oberhalb der V3-Versiegelungen aus einem Mineralgemisch aus tonreichen Materialien (z.B. aufbereiteter Opalinuston) mit Sand und Kies bestehen, währenddessen die VF1- und VF2-Verfüllungen auf Basis von Bentonit in unterschiedlichen Ausführungen oder im V1-/V2-SMA zur Beibehaltung der notwendigen Gaspermeabilität und des Gasspeicherraum als Sand-Bentonit- Gemisch (80:20) bestehen soll.

Bezüglich der **Geochemie** des Verschlussbauwerks kommt dem Wirtsgestein Opalinuston als geologische Hauptbarriere des Multibarrierensystems die Stabilisierung der reduzierenden geochemischen Bedingungen zu. Bei den Übergangsschichten der V1- und V2-Versiegelungsbauwerke kommen ausschliesslich langzeitbeständige Materialien zum Einsatz, wie z.B. Sande, Kiese oder Kalksandsteine, die das geochemische Milieu gar nicht oder tendenziell eher positiv beeinflussen. Um ungünstige geochemische Wechselwirkungen zu verhindern bzw. zu minimieren, ermöglichen die Übergangsschichten mit Filterschichten eine Trennung von Dichtelementen, Widerlagern und Verfüllungen. Dabei sind die Anforderungen an die Einbaumaterialien so zu wählen, dass diese Materialien mit dem jeweils angrenzenden Gesteinsbereich als auch mit den jeweils angrenzenden technischen Komponenten über den gesamten Betrachtungszeitraum verträglich sind.

Die Übergangsschichten werden in den V1- und V2-Versiegelungsbauwerken beidseitig der Widerlager positioniert. Somit werden die abträglichen Wechselwirkungen zwischen Bentonit und Zement limitiert. Sie erhalten zudem je eine vertikale Filterschicht. Somit unterstützen sie nach Nagra eine gleichmässige Aufsättigung des Dichtelements (innenseitig) und eine gleichmässige Beaufschlagung durch anstehendes Wasser (aussenseitig).

Folgende qualitative Aussagen werden in NAB 21-12 bezüglich des Porenwassers gemacht: Die chemische Zusammensetzung des Porenwassers (nach der Wechselwirkung des Zementporenwassers mit dem Opalinuston und mit Bentonit), das den Bentonit sättigt, muss gewährleisten, dass eine begrenzte Auflösung des Montmorillonits erfolgt und dass die Quellfähigkeit der Smektit im Bentonit nicht übermässig beeinträchtigt wird (soweit dies durch die Zementzusammensetzung gesteuert werden kann). Der Kontakt zwischen dem Zementporenwasser, welches zu Beginn ein alkalisches Milieu hat, und der Armierung in den Segmentlinern führt zur Passivierung des Stahls und zu einer langsameren Korrosion der Armierung. Die Konzentration organischer Beimischungen (die als zusätzliche organische Verbindungen für die Gasbildung betrachtet werden) sollte so weit wie technisch machbar minimiert werden.

Die Nagra stellt folgende geochemische Bedingungen an die geotechnischen Hilfsmittel:

- Das Zementporenwasser für zementbasierte Matrizen, die zur Konditionierung der metallischen Stilllegungsabfälle verwendet werden, muss geeignet sein (alkalische Bedingungen), um zu einer geringen Gasbildung beizutragen.

- Keine Anforderung, dass die Tunnelstützmittel (Spritzbetonschicht) ein Zement mit hohem pH-Wert sein muss. Beimischungen dürfen nicht zur Mobilisierung von Radionukliden beitragen (z. B. als starke Komplexbildner).
- Von der Innenschale des Tunnelausbaus nach innen ist Hoch-pH-Zement zu verwenden. Dieser soll die erforderlichen chemischen Bedingungen im Nahfeld sicherstellen und mit dem Mörtel verträglich sein.

Beurteilung der EGT

Das Gesamtversiegelungsbauwerk wird hinsichtlich der chemischen Wechselwirkungen auf zwei wichtige geochemische Themen beurteilt:

- geochemischen Prozesse in den Dichtelementen und Übergangsschichten
- geochemischen Prozesse in den Widerlagern

Dichtelemente und Übergangsschichten: Um den direkten Kontakt zwischen Widerlager und Dichtelement zu minimieren, einen gleichmässigen und effektiven Wasserzutritt zu gewährleisten (homogene Bentonitquellung) und ein stabiles geochemisches Milieu zu ermöglichen, wird von der Nagra eine Übergangsschicht von etwa einem halben bis mehrere Meter Mächtigkeit gewählt. Die geochemische Stabilität des Dichtelements Bentonit kann durch Temperatur, durch Korrosionsprodukte der Endlagerbehälter, durch mikrobielle Prozesse oder durch alkaline Kontaktlösungen beeinflusst werden. Für die hier zu betrachtenden Verschlussbauwerke V1, V2 (& V3) sind speziell die alkalischen Bedingungen durch das Betonwiderlager zu diskutieren. Bei der Wahl von Baustoffen auf Zementbasis (insbesondere Beton oder Injektionsmörtel) sollen solche mit einem geringen pH-Wert (HAA) gewählt werden (NAB 21-12). Basierend auf den Ergebnissen des CEBAMA (CEment-BASed Materials, properties, evolution, barrier functions) Horizon 2020 EURATOM Projekts (Duro et al., 2020) konnte gezeigt werden, dass Zemente mit niedrigem pH-Wert dazu beitragen, die retardierenden Eigenschaften der Tonbarriere (Dichtelement) zu erhalten. Weiterhin konnten die Auswirkungen der Hydratation des Zements mit niedrigem pH-Wert auf die endgültige mineralogische Zusammensetzung erstmalig modelliert werden und ein gutes Mass der Übereinstimmung mit einem langfristigen reaktiven Transportmodell dokumentiert werden. Obwohl das Verständnis der Mineralreaktionen verbessert wurde und die Auswirkungen von mineralogischen Veränderungen zementhaltiger Materialien auf ihre Transport-Eigenschaften erfolgreich modelliert wurden, bleibt eine wesentliche Frage ungelöst; diese betrifft das Ausmass und den Zeitpunkt der Verstopfung von Poren (Clogging) für gelösten Stofftransport (und Gastransport). Experimentelle Daten definieren die zeitliche Entwicklung der Reaktionsfronten noch nicht eindeutig. Die Modellierung solcher Grenzflächen ist äusserst empfindlich gegenüber der Auflösungskinetik von Tonen und dem Ionentransport in den Porositätsdomänen (Ton-Zwischenschicht und freie Poren), die beide mit ziemlich grossen Unsicherheiten behaftet sind. Systematische Untersuchungen zur Auflösungskinetik von Tonmineralien der Callovo-Oxfordian Formation (Claret et al., 2002) konnten zeigen, dass die natürliche Assoziation von organischen Substanzen bei der Reaktionskinetik der Tone eine wesentliche Rolle spielt und die Ton-Reaktivität signifikant verzögert. Ausmass und Zeitpunkt der Verstopfung durch Mineralneubildungen können daher derzeit nicht verlässlich vorhergesagt werden (siehe auch Nagra, 2019).

Solange in diesem Zusammenhang konsistentere und realistischere thermodynamische Daten sowie kinetische Daten für Schlüsselmineralreaktionen ausstehend sind, ist die gewählte Dimensionierung von mindestens 1,5 m lagerseitig der Übergangsschichten aus Sicht der EGT sinnvoll.

Ein weiterer Aspekt ist der Einfluss der Oberflächenladung der einzelnen Verschlussmaterialien. Der Einfluss negativ geladener Tonmineraloberflächen auf Bentonit-Porenwasser ist weitgehend

akzeptiert. Die permanente Schichtladung führt zu einem speziesabhängigen Transport im Porenwasser. „Single Porosity“-Codes weisen allen Spezies entweder gleiche Transporteigenschaften zu, oder sie berücksichtigen unterschiedliche aber konstante Transporteigenschaften für individuelle Spezies (z.B. diffusionszugänglich oder advektions-aktive Porositäten, Tortuositäten). Beide Ansätze können für statische Mikrostrukturen gelten, versagen jedoch bei der Beschreibung von Systemen mit Porositätsänderungen. In diesem Fall sollten sich die Transporteigenschaften individuell für die zu betrachtende Spezies ändern. Die Experimente von Chagneau et al. (2015) führten zur Erkenntnis, dass in einem kompaktierten Illit die diffusionszugängliche Porosität von Anionen nach der Fällung von Coelestin gegen Null gehen sollte. Dies ist offenbar deshalb der Fall, weil der Cl-Flux aufhörte. Im Gegensatz dazu setzte sich der HTO-Fluss auf einem niedrigeren Wert fort. Eine solche Spezies-abhängige Kopplung von Transport- und Porositätsänderungen ist im Allgemeinen nicht in Single-Porositäts-Modelle implementiert (Ausnahme Gimmi & Alt-Epping, 2018). Multi-Porositätsmodelle können hier die experimentellen Daten akkurater beschreiben. Basierend auf bisher verfügbaren experimentellen Daten müssen die Transportparameter in den verschiedenen Porositätsbereichen deshalb systematisch evaluiert werden.

Die Übergangsschichten dienen zudem auch als Filterschichten und sollen eine gleichmäßige Aufsättigung begünstigen, um bevorzugte Wegsamkeiten im Dichtelement zu unterbrechen. Dies wurde allerdings in den bisherigen Demonstrationsexperimenten nicht erreicht (siehe Kapitel 2.2). Hierzu sollen nach Nagra gegebenenfalls Materialien wie Sande, Kiese oder Kalksandsteine verwendet werden (NAB 21-12). Neuere Arbeiten von Nakarai et al. (2021) zeigen hier eindeutig, dass der Karbonatgehalt kritisch für die Porenverstopfung (clogging) an der Zement-Grenzfläche ist. Es scheint, dass die Poren verstopft werden, wenn der Karbonatgehalt einen Schwellenwert überschreitet. Allerdings sei vermerkt, dass keine Messungen über die Permeabilität für Gas in den alterierten Proben durchgeführt wurden.

Widerlager: Die Nagra macht in NAB 21-12 keine Aussagen über die langfristigen geochemischen Prozesse im hochwertigen Konstruktionsbetons, welcher verwendet werden soll. Sie äussert sich lediglich zur Nenndruckfestigkeit und liefert einen vernachlässigbaren Beitrag zur Dichtigkeit im Rahmen der Langzeitsicherheit. Insgesamt wird den V1/V2 Versiegelungen inklusive des Widerlagers ein Gaseingangsdruck von < 1 MPa und eine intrinsische Permeabilität von 10^{-17} - 10^{-18} m² (V1/V2) zugeschrieben. Bei den Angaben wird kein Grad der Wassersättigung spezifiziert, so dass hier von einem wasserfreien System ausgegangen wird (siehe Kameche et al., 2014). Hinsichtlich des Massentransports weisen zementartige Materialien typischerweise günstigere hydraulischen Eigenschaften auf als Tonmaterialien. Die Gas-Permeabilitäten, welche von der Nagra verwendet wurden, sind kleiner als die Werte, welche z.B. von Djerbi Tegguer et al. (2013) für OPC und HPC (vor mechanischer Belastung) bestimmt wurden. Sie sind allerdings vergleichbar mit den Daten von Kim et al. (2013) und Referenzen darin. Falls das Widerlager die gaspermeabilitäts-bestimmende Komponente des Versiegelungsbauwerks im Falle des SMA-Lagers ist und eine Alteration nur zu einer Erhöhung der Gaspermeabilität führt, dann würden zu allen Zeiten die Permeabilitätskriterien des Versiegelungsbauwerks erfüllt werden.

Im HAA-Lager Konzept ist weiterhin zu beachten, dass das verwendete Behältermaterial (z.B. Kupferummantelung oder SSiC-Behälter oder -umhüllung) einen wesentlichen Einfluss auf den Zeitpunkt und die Menge der Gas- und Nuklidfreisetzung haben können, ebenso wie auf den Chemismus der Kontaktwässer.

2.4 Berücksichtigung langfristiger geologischer Prozesse

Aussagen der Nagra

Die Berücksichtigung langfristiger geologischer Prozesse betrifft i.W. die Sicherheitsfunktion S5: Langzeitstabilität des Mehrfachbarrierensystems bezüglich geologischer und klimatischer Langzeitentwicklungen (Kap. 2.7.1). Die Sicherheitsfunktion S5 ist nach Nagra für das Verschlusskonzept nur indirekt relevant und wird durch die geeignete Standortauswahl und eine ausreichende Tiefenlage gewährleistet.

Beurteilung der EGT

Nach Ansicht der EGT ist ein Nachweis der Langzeitstabilität des Verschlusskonzeptes im Hinblick auf geologische und klimatische Einwirkungen nicht direkt aus dem von der Nagra vorgeschlagenen Standortgebiet Nördlich Lägern und seiner Tiefenlage ableitbar und sollte zumindest qualitativ im Sinne möglicher Szenarien diskutiert werden. Anforderungen an das Verschlusskonzept, welche für die Langzeitsicherheit relevant sind, betreffen die langfristige Stabilität der Versiegelungsbauwerke im Hinblick auf Schäden an den Verschlussbauwerken durch aktive Störungen, Erdbeben (siehe auch Kapitel 6) und glaziale Vereisungszyklen, die zu geomorphologischen, hydrogeologischen und geomechanischen Veränderungen im Umfeld des geologischen Tiefenlagers führen können. Diese Prozesse wurden bisher noch wenig von der Nagra untersucht. Basierend auf den Ergebnissen der Berechnungen, die im Rahmen für den Entsorgungsnachweis Opalinuston (NTB 02-05) ausgeführt wurden, kann zwar davon ausgegangen werden, dass moderate glaziale Überdeckungen im Bereich von 200-400 m die hydraulischen Potentiale und Spannungen auf Lagerebene beeinträchtigen, vermutlich aber aufgrund der geringen Veränderungen das Versiegelungskonzept nicht in Frage stellen.

3 Anforderungen im Hinblick auf die Betriebssicherheit

Aussagen der Nagra

Die Betriebssicherheit umfasst (a) die konventionelle Betriebssicherheit (Normalbetrieb sowie potentielle Störfälle) und (b) die Strahlenschutzsicherheit. Die konventionelle Betriebssicherheit wird, wie in NAB 21-02 beschrieben, ganz wesentlich durch die Technik bestimmt, die für die Verfüllung und Versiegelung eingesetzt wird. Dabei wird explizit berücksichtigt, ob lokales Rauben des Ausbaus die Betriebssicherheit beeinträchtigt. Hier kommt dem verantwortungsbewussten Handeln der Mitarbeitenden vor Ort eine grosse Bedeutung zu (Einhaltung aller Regeln bzw. Vorschriften, Schulungen der Mitarbeitenden, Arbeitsschutzkleidung, strenge Kontrollen, messtechnische Überwachung etc.).

Der Versiegelungstyp V1 im HAA-Lager kann jederzeit auch als temporärer Verschluss platziert werden, wobei aus Strahlenschutzgründen ein ausreichender Abstand zwischen dem letzten Behälter und dem Bauwerk eingehalten werden muss. Jeder reguläre V1-Verschluss dient zudem auch als temporärer Verschluss.

Da die Notwendigkeit der Herstellung eines temporären Verschlusses jederzeit eintreten kann, müssen Informationen zur Dimensionierung, Technologie, Materialien etc. rechtzeitig vorliegen, d.h. (a) Konzepte zur abschliessenden Dimensionierung müssen spätestens für das Betriebsbewilligungsgesuch vorliegen, wie es in der Roadmap (NAB 21-02) vorgesehen ist, und (b) Informationen zu Technik, Materialien sowie erfahrenes Personal müssen spätestens zu Beginn der Einlagerungsphase verfügbar sein. Aus den Risikobeurteilungen werden die entsprechenden administrativen Massnahmen abgeleitet.

Beurteilung der EGT

Die konventionelle Betriebssicherheit ist weitestgehend identisch mit den Anforderungen, wie sie auch im untertägigen Bergbau oder im Kavernen- und Tunnelbau gelten, ergänzt durch Forderungen aus dem Strahlenschutz, wobei die Arbeitsabläufe in einem Endlager langfristig geplant und wesentlich ruhiger und geordneter sein werden. Zudem sind aufgrund der Standortauswahl (relativ ungestörtes Gebirge, sehr umfangreiche Erkundung) aussergewöhnliche bzw. überraschende gebirgsmechanische und geohydraulische Belastungen bzw. Ereignisse nahezu auszuschliessen (extrem geringes Risiko).

Das im NAB 21-12 vorgestellte Verschlusskonzept ist bezüglich der prinzipiellen Arbeitsabläufe und verwendeten Materialien ähnlich denen, die im Bergbau angewendet werden (siehe insbesondere Kali- und Steinsalzbergbau bzw. UTD's und UTV's). Ausserdem liegen Erfahrungen aus Demonstrationsprojekten (siehe z.B. Projekte DOPAS, FEBEX, GAST, MUSTER, BIBGEN, RESEAL, FE- und HE-Experiment, Large-Scale Sandwich-Experiment, DOMPLU, POPLU, ESPN, CARLA, MgO-Seal, ELSA) im Massstab 1:1 unter in-situ Bedingungen vor. Die Umsetzbarkeit ist daher prinzipiell gewährleistet.

Durch die sukzessive Versiegelung der Lagerkammern (V1) und später der Lagerfeldzugänge (V2) wird dem Strahlenschutz, der Betriebssicherheit im Regelbetrieb, aber auch potentiellen Störfällen Rechnung getragen, so dass grössere Gefährdungen für das Personal sowie das Endlager insgesamt praktisch ausgeschlossen werden können.

Aus den bautechnischen Gefährdungsbildern (Tab. 5.1 im NAB 21-12) werden auch potentielle Gefährdungen der Betriebssicherheit abgeleitet und mit entsprechenden Gegenmassnahmen belegt. Es fehlt allerdings das Gefährdungsbild „Erdbebenanregung“, auch wenn die Eintrittswahrscheinlich gering und die Auswirkungen beherrschbar sind (geringes Risiko). Das Gebiet liegt aber gemäss DIN bzw. SIA in der Erdbebenkategorie 2 bzw. 1, und in solchen Gebieten sind entsprechende Nachweise,

zumindest für sensible Strukturen wie kerntechnische Anlagen, zu führen. Am kritischsten – und unter konservativem Aspekt anzunehmen - wären wohl dynamische Erschütterungen während der Bauphase bei Erdbeben mit Magnituden von etwa 5 bis 6 (siehe z.B. Koller, 2003). Laut DIN EN 1998 liegt das deutsche Grenzgebiet bei ‚Nördlich Lägern‘ in der Erdbebenzone 2, laut SIA 261 liegt das potentielle Endlager in der Erdbebenzone 1.

Im NAB 21-12 werden die Tabellen 5-2 (bautechnische Massnahmen) und 5-1 (Gefährdungsbilder) in einen direkten Zusammenhang gesetzt. Dieser erschliesst sich allerdings nicht zwanglos, da Tabelle 5-1 spezifische geomechanische Gefährdungsbilder beschreibt, während Tabelle 5-2 sich an einer allgemeinen Gebirgsklassifizierung orientiert. Zudem ist unklar, was 'präferierte Gaspfade' (Tab. 5-2, A bzw. Fussnote 33 auf S. 53) bedeuten. Bisheriger Kenntnisstand ist, dass die Versiegelungsbauwerke selbst ‚gaspermeabel‘ und ‚fluiddicht‘ ausgeführt werden sollen.

Die Bohrerergebnisse im Gebiet Nördlich Lägern deuten in Lagerteufe auf hohe Gebirgstemperaturen von etwa 40 - 50°C hin. Dies erfordert nach den SUVA Normen eine aktive Kühlung, welche zu stark veränderten klimatischen Bedingungen untertage führt (Feuchteeintrag, thermische Spannungen). Wie sich diese Bedingungen auf das Wirtgestein und evtl. auch auf die Ausbau- und Sicherungsmassnahmen inkl. der Verfüllung/Versiegelung auswirken (z.B. verändertes Abbindeverhalten, thermische Rissbildungen etc.), wird weder im NAB 21-12 noch im Forschungsplan speziell thematisiert.

Beim SMA-Lager kann ein temporärer Verschluss V1 nur im Streckenbereich am Kammereingang platziert werden (möglicherweise ist dabei die Kammer nur partiell mit Behältern belegt). Dies bedingt zuvor die Restverfüllung der Kammer. Damit entstehen ein zeitlicher Verzug und ein veränderter technologischer Ablauf, der zu beachten ist (diesbezüglich sind im NAB 21-12 noch keine Angaben zu finden).

Das Design (Dimensionierung) als Grundlage für die Herstellung der Verschlüsse - auch unter Beachtung der Betriebssicherheit - soll gemäss NAB 21-02 Bestandteil des Betriebsbewilligungsgesuches (Operational License Applications) sein (siehe auch Tier 3 Roadmap Backfilling, Sealing and Closure im NTB 21-02). Aus der Roadmap wird aber auch ersichtlich, dass bereits zum Baubewilligungsgesuch für das L/ILW-Lager bzw. das HAA-Lager zumindest ein „detailed design“ eingereicht wird. Dies sollte dann auch eine fundierte Vordimensionierung beinhalten. In den bis dato existierenden Dokumenten ist eine Vordimensionierung nicht dokumentiert, wenngleich schon einige bautechnische Eckdaten benannt sind.

Insgesamt gesehen wird das Verschlusskonzept für das geologische Tiefenlager gemäss NAB 21-12 den Anforderungen an die Betriebssicherheit sowohl inhaltlich als auch in der zeitlichen Abfolge der noch zu unternehmenden Aktivitäten (Forschung, Dimensionierung, Antragstellung, Technikentwicklung etc.) – siehe NTB 21-02 - gerecht.

4 Anforderungen, abgeleitet aus umweltrechtlichen Aspekten

Aussagen der Nagra

Die Schachtverfüllung, welche bis zur Oberfläche reicht, und das Schachtabchlussbauwerk werden portalseitig der V3-Versiegelungen eingebracht (NAB 21-12, Abs. 6.1.5). Diese Verfüllung liegt nicht mehr im Wirtgestein und muss keine Anforderungen aus der Langzeitsicherheit erfüllen. Die Verfüllung dient dem Schutz des Lagers vor Fremdeinwirkungen und schützt die V3-Versiegelung vor Erosion. Die Schachtverfüllung unterhalb der Versiegelung hat zusätzlich die Funktion einer Widerlagerssäule für die V3-Schachtversiegelung. Ein zentrales Ziel der Schachtverfüllung ist die dauerhafte Sicherstellung der Grundwasserstockwerkstrennung, um die natürliche hydrogeologische Situation zu erhalten (NAB 21-12).

Abgesehen von der Umweltverträglichkeit (z.B. Grundwasser-, Boden- und Naturschutz) sowie der Setzungsstabilität gibt es keine speziellen Anforderungen an das zu verwendende Verfüllmaterial. Um einerseits die Standsicherheit an der Tagesoberfläche langfristig zu garantieren und andererseits die natürlichen Grundwasserstockwerke dauerhaft zu trennen (Art. 43 Abs. 3 GSchG; „Grundwasservorkommen dürfen nicht dauernd miteinander verbunden werden, wenn dadurch Menge oder Qualität des Grundwassers beeinträchtigt werden können“), werden die Schächte gemäss dem heutigen Planungsansatz mit einem Mineralgemisch oder aufbereitetem Opalinuston (mit Sand und/oder Kies vermischt) mit einer entsprechenden niedrigen hydraulischen Durchlässigkeit verfüllt. Für die Schachtverfüllung wird als heutige Planungsannahme eine mittlere Wasser-Durchlässigkeit von 10^{-9} bis 10^{-8} m/s angesetzt.

Beurteilung der EGT

Für den Entwurf eines Verschlussystems sind die hydrogeologischen Randbedingungen im Bereich der Schächte im Hinblick auf die Zielstellung, den Zutritt von Lösungen zu den endgelagerten Abfällen über die Schächte zu vermeiden, von grundlegender Bedeutung (Müller-Hoeppe et al., 2012). Sind im Deckgebirge mehrere Grundwasserstockwerke vorhanden, in denen Grundwasserleiter hoher Lieferfähigkeit durch Grundwassergeringleiter getrennt sind, muss die Verfüllung der natürlichen Schichtfolge des Deckgebirges angepasst werden, um die Grundwasserstockwerke und die damit verbundenen hydraulischen Gradienten langfristig so wenig wie möglich zu verändern.

Die Ausbruch-Materialien (Opalinuston und Tonstein anderer Formationen) können nach Aufbereitung als Verfüllmaterial verwendet werden, was möglicherweise eine Schonung von Umwelt-Ressourcen darstellt. Eine klare Aussage über die Einsparung an Energie und Rohstoffen ist zum jetzigen Zeitpunkt schwer möglich, da die Dimensionierung bisher nicht klar festgeschrieben ist. Alleine der Transport von Dichtmaterialien wird durch die Verwendung der Aushubmaterialien, welche als Versatz vor Ort generiert werden, natürlich sehr stark minimiert.

In dem parallellaufenden Verbundvorhaben ELSA-Phase-II wurden Schachtverschlusskonzepte für Endlager in Tonsteinformationen in Deutschland entwickelt und im Sinne einer ingenieurtechnischen Vorbemessung exemplarisch ausgelegt (Herold et al. 2016).

5 Anforderungen aus wirtschaftlicher Sicht

Aussagen der Nagra

Wirtschaftliche Betrachtungen werden im NAB 21-12 als von untergeordneter Bedeutung beschrieben. Dabei werden 3 Aspekte genannt:

- Angemessener Zeitraum zu verhältnismässigen Kosten
- Ressourcenschonung durch Verwendung von Ausbruchsmaterial zur Hohlraumverfüllung
- Optimierte Arbeitsabläufe

Im NTB 21-02 ist mittelfristig (nächste 5 bis 10 Jahre) eine Sensitivitätsanalyse zu Kosten-relevanten Aspekten des Einschlusses geplant.

Beurteilung der EGT

An verschiedenen Stellen im NAB 21-12 sowie NTB 21-02 wird von Optimierung und der Offenheit bzgl. alternativer Lösungen gesprochen, ohne dabei die Wirtschaftlichkeit explizit zu benennen. Natürlich hat die Sicherheit oberste Priorität. Allerdings könnten alternative oder optimierte Lösungen wirtschaftliche Vorteile erbringen. Dieser Aspekt sollte nicht vergessen werden, insbesondere dann, wenn vergleichbare Sicherheitsniveaus erreicht werden können bzw. Grenzwerte auch mit wirtschaftlich günstigeren Lösungen nachweislich sicher eingehalten werden können. Im NTB 21-02 wird diesbezüglich angemerkt, dass der Stande von Wissenschaft und Technik fortlaufend analysiert wird und die bereits bestehenden Konzepte entsprechend angepasst werden. Diese sollten immer auch wirtschaftliche Aspekte berücksichtigen. Dabei müssen aber auch ökologische Anforderungen erfüllt werden, auch wenn sie sich monetär nicht direkt beziffern lassen oder erst langfristig wirken. Insbesondere kommt der Ressourcenschonung (Material, Energie, Flächeninanspruchnahme) eine grosse Bedeutung zu. Aus wirtschaftlicher Sicht dürften die unten aufgeführten Aspekte, die mittel- oder unmittelbar das Verfüll- und Verschlusskonzept beeinflussen können, von besonderer Bedeutung sein. Diese sollten bei den zukünftige Betrachtungen durch die Nagra berücksichtigt werden:

- Behältermaterial
- Material zur Hohlraumverfüllung
- Beton- bzw. Mörtelmaterialien zur Verfüllung bzw. als Widerlager
- Flächenoptimierung im Tiefenlager
- Optimierung des Ausbaus
- Neue gerätetechnische Entwicklungen für Verfüllmaschinen etc.

6 Anforderungen für die bautechnische Umsetzung

Aussagen der Nagra

Die bautechnische Umsetzung von Versiegelung und Verschluss des geologischen Tiefenlagers umfasst gemäss NTB 21-02 folgende Arbeiten:

- Verfüllung aller Hohlräume
- Erstellung der Verschlussbauwerke V1, V2 und V3

Der Aufbau aller im NAB 21-12 vorgestellten Verschlussbauwerke ist praktisch identisch; sie unterscheiden sich nur geringfügig in Form von Modifikationen für den Fall, dass das Rauben des Ausbaus nur teilweise oder gar nicht möglich ist. Bautechnische (geomechanische) Gefährdungsbilder inkl. der entsprechenden Massnahmen sind detailliert in Tab. 5.1 und 5.2 beschrieben. Es werden verschiedene Auslegungsvarianten für die Versiegelungsbauwerke V1 und V2 vorgestellt (V1-HAA, V2-HAA, V2-SMA, V1-SMA). Diese beziehen sich jeweils auf den Kontaktbereich Dichtelement – Gebirge bzw. auf den Ausbau und berücksichtigen die unterschiedlichen Gefährdungsbilder.

Bei der konkreten Positionierung der Verschlussbauwerke gibt es gewisse Spielräume, so dass auf geologische Besonderheiten Rücksicht genommen werden kann. Damit können die Verschlussbauwerke unter Berücksichtigung spezifischer in-situ Bedingungen optimal platziert werden.

Beurteilung der EGT

Die bautechnische Umsetzung der geplanten Massnahmen ist – wie im NAB 21-12 aufgezeigt - prinzipiell realisierbar. Dies zeigen die Demonstrationsbauwerke (siehe z.B. Projekte DOPAS, GAST, MUSTER, BIBGEN, RESEAL, Large-Scale Sandwich-Experiment, DOMPLU, POPLU, ESPN, CARLA, MgO-Seal, ELSA), die Erfahrungen aus dem Berg- und Tunnelbau, der Betrieb und Verschluss von Untertagedeponien bzw. Untertage-Versatzbergwerken sowie die Kopfdichtungen von Gas- und Druckluftspeichern. Auch die bereits realisierten Schachtverschlüsse sowie Hohlraumverfüllungen im Altbergbau liefern einschlägige Erfahrungen, siehe z.B. Kali- und Salzbergbau (TU BAF, 2009). Gas- und Druckluftspeicher liefern Erkenntnisse insbesondere zum Bau vertikaler Verschlussbauwerke bei unterschiedlichen, aber meist kleinen Durchmessern.

Die im Anhang B (NAB 21-12) formulierten Aussagen zu den bautechnischen Anforderungen und deren generelle Umsetzung sind nachvollziehbar. Die konkrete bautechnische Umsetzung wird aber entscheidend von den konkreten Anforderungen (Zielgrössen bzw. Parametern) bestimmt. Dazu zählen insbesondere: Geforderte integrale Permeabilität bzgl. Gas und Wasser; Geforderte Porosität (als Funktion zunehmender Menge an produziertem Gas sowie Zeitpunkt der Freisetzung); Steifigkeit (Deformationsbegrenzung); Lebensdauer (Zeitdauer des Funktionserhalts); Möglichkeiten fürs Monitoring und QS; Einhaltung der Vorschriften über Arbeits- und Gesundheitsschutz / Betriebssicherheit; Lebensdauer Behältermaterial (Gasproduktion, Nuklidfreisetzung).

Beim SMA-Lager kann ein temporärer Verschluss V1 nur im Streckenbereich am Kammereingang platziert werden (möglicherweise ist dabei die Kammer nur partiell mit Behältern belegt). Dies bedingt zuvor die Restverfüllung der Kammer. Damit entstehen ein zeitlicher Verzug und ein veränderter technologischer Ablauf, der zu beachten ist. Diesbezüglich sind im NAB 21-12 noch keine Angaben zu finden.

Idealerweise sollte die integrale Permeabilität eines Verschlussbauwerkes in der Grössenordnung der ungestörten Permeabilität der geologischen Barriere liegen. Zumindest sollte sie aber so gering sein, dass die Grenzwerte, welche für die Biosphäre relevant sind, mit Sicherheit auch langfristig nicht

überschritten werden. Dabei müssten auch noch die Gasdurchlässigkeit der Bauwerke sowie das Speichervermögen und die Permeabilität der Verfüllungen beachtet werden. Je nach konkreter quantitativer Spezifizierung der Anforderungen wird die bautechnische Umsetzung anspruchsvoll bis sehr kompliziert (aufwändig und teuer) – aber realisierbar.

Im Anhang B des NAB 21-12 wird davon gesprochen, dass die vorgestellten Verschlusskonzepte grob vordimensioniert wurden. Diese Vordimensionierung ist allerdings nicht dokumentiert und kann daher nicht bewertet werden. Allerdings entsprechen die publizierten Angaben durchaus den allgemeinen Erfahrungswerten.

Das Design (Dimensionierung) der Verschlüsse soll gemäss NAB 21-02 Bestandteil des Betriebsbewilligungsgesuches (Operational License Applications) sein (siehe auch Tier 3 Roadmap Backfilling, Sealing and Closure im NTB 21-02). Aus der Roadmap wird aber auch ersichtlich, dass bereits zum Baubewilligungsgesuch zumindest ein detailliertes Konzept eingereicht wird. Man sollte zu diesem Zeitpunkt auch eine detaillierte Vordimensionierung erwarten.

Die Verschlussbauwerke V1, V2 und V3 müssen baustatisch gemäss einschlägiger Normen (EURO-CODE, SIA-Normen etc.) dimensioniert werden. Allerdings muss auch der dynamische Lastfall (Erdbeben), insbesondere während der Bauphase, betrachtet werden. Dabei müssen die Annahmen zur Last (Wasserdruck (Gasdruck), Gebirgsdruck, Eigengewicht, Quelldrücke des Verfüll- und Dichtungsmaterials sowie dynamischen Lastannahmen) konservativ sein.

Der Einsatz von Schild-TBM's für die HAA-Lagerstollen garantiert bautechnisch eine generell sehr sichere und hinreichend erprobte Hohlraumherstellung, wobei durch den unmittelbar folgenden Einbau der Tübbinge (evtl. mit Ringspaltverpressung) die Gebirgsauflockerung minimiert wird. Damit sind auch grössere Teufen beherrschbar, obwohl unweigerlich mit einer gewissen Vergrösserung der EDZ gerechnet werden muss. Am kritischsten werde die Streckenkreuze sein wegen der grösseren Spannweite und der anderen Auffahrungstechnologie. Dieser Aspekt wird bisher nicht betrachtet.

Es fehlen bis dato detaillierte Angaben zum unbedingt notwendigen QS-Management inkl. Monitoring zum Nachweis des Erreichens bzw. Einhaltens der definierten Kenn- bzw. Grenzwerte (lediglich für die Versiegelungsbereiche wird von Massen- bzw. Volumenbilanzen als QS-Massnahme gesprochen). Im NTB 21-02 gibt es zwar eine Roadmap zum Thema Monitoring (Tier 3 Roadmap Monitoring), allerdings ist das Monitoring zu Verschluss und Versiegelung nicht explizit aufgeführt (möglicherweise aber ist QS subsummiert unter „underground geotechnical monitoring ...“).

7 Anforderungen hinsichtlich der Rückholbarkeit der Abfälle

Aussagen der NAGRA

Im NAB 21-12 wird die Rückholbarkeit der Abfälle weder in den Anforderungen noch den Zielen oder der bautechnischen Umsetzung thematisiert. Im NTB 21-02 wird gemäss KEG gefordert, dass eine Rückholbarkeit ohne grossen Aufwand gewährleistet sein muss. Ausserdem wird gefordert, dass Einlagerung und mögliche Rückholung in allen Phasen des Projektes parallel betrachtet werden sollen. Das Konzept der Rückholbarkeit wird im NAB 21-13 in groben Umrissen dargestellt.

Beurteilung der EGT

Aus den verfügbaren Dokumenten der Nagra wird nicht ersichtlich, ob und wie Verfüllung / Verschluss einerseits und Rückholbarkeit andererseits wechselseitig berücksichtigt bzw. durchdacht wurden.

Der tatsächliche Aufwand einer Rückholung hängt stark vom Zeitpunkt des Einlagerungsprozesses ab und kann durchaus erheblich werden, wenn dieser schon weiter fortgeschritten ist und eine Reihe von Verschlussbauwerken bereits gebaut wurden. Die EGT hält es für wünschenswert, wenn die Nagra in Projektphasen nach dem RGB eine Methode entwickelt, die die Kosten der Rückholung und den Einfluss der Verschlussbauwerke quantifizieren.

Eine detailliertere Behandlung des Themas Rückholung durch die EGT erfolgt später im Rahmen der Beurteilung des RBG.

8 Offene Fragen und Empfehlungen

Mit dem NAB 21-12 legt die Nagra ihr Verschlusskonzept für ein geologisches Tiefenlager vor. Dabei geht es in erster Linie um die Darstellung des Gesamtkonzepts (Lagerarchitektur), der verschiedenen Typen von Versiegelungen und Verfüllungen und ihrer ersten Materialisierung und Dimensionierung. Eine exakte Auslegung der Elemente des Verschlusskonzepts liegt noch nicht vor und wird auch nicht gefordert. In der zusammenfassenden Bewertung werden mögliche Schwachstellen und wichtige offenen Punkte des Verschlusskonzepts hinsichtlich der RBG-Dokumentation angesprochen und Vorschläge für alternative Varianten gemacht.

8.1 Versiegelungskonzept, Nachweise und alternative Varianten

Wie in Kapitel 1.3 ausgeführt, muss die Nagra einen robusten Nachweis aller Sicherheitsfunktionen des Versiegelungs- und Verschlusskonzeptes für das RBG vorlegen. Dieser Nachweis kann nicht auf idealisierten Modellvorstellungen beruhen, sondern muss alle vorliegenden experimentellen Befunde berücksichtigen. Dabei müssen auch die Ergebnisse von Experimenten einbezogen werden, die auf der Projektskala (sog. Demonstrationsexperimente) durchgeführt wurden. Bezüglich der V1- und V2-Siegel für das SMA-Lager stellt die EGT in Frage, ob die bestehenden und allenfalls sogar zukünftige Demonstrationsexperimente zu einem sicheren Nachweis der Funktionsfähigkeit der S/B-Siegel und zu einem belastbaren Nachweis des langfristigen Gastransports und Gasdruckabbaus in den SMA-Kavernen führen werden². Gasflüsse durch Versiegelungsbauwerke folgen immer Systemheterogenitäten (z.B. Materialgrenzen) und verändern sich auch aufgrund variabler Sättigungsverhältnisse, welche kaum prognostizierbar sind. Die EGT empfiehlt darum, für das RBG auch alternative, insbesondere einfachere Verschlusskonzepte für die V1- und V2-Siegel zu prüfen und allenfalls dem Sicherheitsnachweis zugrunde zu legen. Zudem sollten auch die multiplen Anforderungen an die S/B-Siegel (Kapitel 1.2) hinterfragt werden, da diese zu einem Konzept mit komplexen S/B-Versiegelungsbauwerken geführt haben, deren Funktion heute nur schwer nachgewiesen werden kann. Auch im Sinne einer diversen Auslegung der Verschlussbauwerke empfiehlt die EGT, Verschlussvarianten mit einfacheren V1- und V2-Siegeln zu prüfen. Es ist für die EGT zum Beispiel denkbar, die V1- und allenfalls V2-Siegel des SMA-Lagers durch einfache Absperrbauwerke (dazu gibt es bereits eine grosse Erfahrung aus dem Kraftwerksbau) zu ersetzen, welche, falls notwendig, den Wasserzutritt (z.B. im Falle eines Wassereintruchs) während der Betriebs-/Beobachtungsphase verhindern. Das Gas aus den SMA-Lagerkavernen könnte sich dadurch frei bis zu den V3-Versiegelungen ausbreiten, was die Gasdrucke in einer einfach und robust nachweisbaren Art reduzieren würde.

Extrem sicherheitsrelevante Systeme werden typischerweise redundant (mehrfach gleiches System) sowie divers (verschiedene Systeme bzw. Wirkmechanismen) ausgeführt, um beim Ausfall einer Systemkomponente bzw. Wirkmechanismus die Funktionalität des Gesamtsystems immer noch zu gewährleisten. Im NAB 21-12 wird in den Auslegungsgrundsätzen für die Versiegelungsbauwerke ebenfalls Diversität (soweit möglich) gefordert. Eine Diversität der Materialien bzw. Dichtungsprinzipien für die Dichtelemente ist prinzipiell möglich (siehe z.B. TU BAF (2009, 2010), GRS (2020), DBE (2016), BfS (2004), Glaubach (2017), BGE-TEC (2022)). Ob dies im Einzelfall notwendig, umsetzbar bzw. sinnvoll ist, sollte gründlich untersucht und gut begründet werden. Überlegenswert erscheint der Einsatz von diversitären Materialien vor allem im Schachtverschluss (Versiegelungen V3), damit sowohl die Grundwasserstockwerke als auch der Schacht gegen Wasser, welches von oben Zutritt, effizient abgedichtet werden.

² Die EGT hat diese Thematik schon in ihrer Stellungnahme zu Etappe 2 SGT intensiv diskutiert und auf einen fehlenden Nachweis der Funktionsfähigkeit des EGTS hingewiesen.

Im NAB 21-12 werden alle 3 Verschlüsse V1, V2 und V3 gleichrangig behandelt (keine Hierarchisierung bezüglich Relevanz). Die grössten potentiellen Schwachstellen bilden allerdings die Schächte, da sie die Barriere massiv verletzt werden. D.h. die Wiederherstellung einer Barriere-ähnlichen Dichtigkeit im Schachtbereich ist das wirksamste und ein global für das gesamte Tiefenlager wirkendes Mittel, um einen Kontakt mit der Biosphäre zu verhindern. Dem V3 kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Zu beachten ist auch, dass (a) dieses Verschlussbauwerk senkrecht (im Gegensatz dazu V1 und V2: waagrecht) eingebaut wird, was eine bessere Wirksamkeit bzw. Zuverlässigkeit bzgl. der Dichtwirkung erwarten lässt (dies wird auch im NAB 21-12 richtigerweise betont), (b) die Aufsättigung des Bentonits auch über den Schacht selbst von oben erfolgt, und (c) V3 auch einen potentiellen Weg für von aussen zutretende Fluide darstellen könnte. Im NAB 21-12 wird für V1 und V2 im Gegensatz zu V3 auch eine geringere Anforderung an die Permeabilität gestellt ($< 10^{-17} \text{ m}^2$ versus $< 10^{-18} \text{ m}^2$). Ausserdem ist V3 selbst redundant ausgeführt und besteht aus 3 Dichtsegmenten in Reihe, während V1 und V2 jeweils nur 1 Dichtelement enthalten.

8.2 Spezifische Anforderungen an die Versiegelungen und Verfüllungen

Im Forschungs- und Entwicklungsplan der Nagra (NTB 21-02) wird bereits für den Zeitraum 2021-2024 davon ausgegangen, dass für die Aktivitäten „sealing, backfilling & closure“ entsprechende „safety criteria and requirements“ bzw. „performance criteria“ vorliegen. Einzelne quantitative Aussagen für Teilelemente sind im NAB 21-12 zu finden (z.B. Festigkeit der Widerlager mit $\text{UCS} \geq 25 \text{ MPa}$, intrinsische Permeabilität der Dichtelemente von 10^{-19} und 10^{-17} m^2 mit Durchlässigkeit für Gas bis 6 Größenordnungen höher als für Wasser, Porosität von 20% und Gaspermeabilität $> 10^{-10} \text{ m}^2$ des Verfüllmörtels der SMA-Lagerkavernen, Verformungsmodul Schotter 200 – 300 MPa, Stabilität der V1-Widerlager gegen eine Wassersäule von 100 bar). Integral zu erreichende Mindestwerte für die Versiegelungsbauwerke bzw. die Verfüllung insgesamt („safety criteria and requirements“ bzw. „performance criteria“) – das schliesst auch Widerlager, EDZ, Ausbau und die entsprechenden Grenzflächen ein – sind für die EGT wichtige Zielgrössen, wurden bisher aber noch nicht klar definiert.

Die für die V1- und V2-Versiegelungen des SMA-Lagers geforderten Gasdurchlässigkeiten basieren auf einem Grenzwert für Gasdrücke im Lagersystem, welcher von den minimalen in-situ Spannungen für ein intaktes Gebirge abgeleitet wurde. Bei einer im Spannungsfeld ‚günstig‘ gelegenen Störung reichen vermutlich aber schon geringere Gasdrücke aus, um eine Reaktivierung von Störungen zu erzeugen. Das damit einhergehende Gefährdungspotential sollte vertieft untersucht werden.

Die Nagra geht im NAB 21-12 davon aus, dass die Widerlager aus hochwertigem Konstruktionsbeton initial (vermutlich während der Betriebs- und Beobachtungsphase) sehr hohen hydraulischen Belastungen von 100 bar standhalten können und gleichzeitig eine wichtige Funktion beim Aufbau der Quelldrücke der Dichtelemente ausüben. Des weiteren wird von der Nagra angenommen, dass diese Widerlager schon nach relativ kurzer Zeit während der Wiederaufsättigung und Gasproduktion die für das Gesamtsystem geforderte hohe Gasdurchlässigkeit aufweisen. Die Gaspermeabilitäten von Betonen können sich bei Wassersättigung deutlich erniedrigen, siehe z.B. Herrmann (2000). Zudem sollten neuere Entwicklungen in der Zementproduktion („Grüner Zement“) unter Beachtung niedrigerer pH-Werte (möglicherweise mittelfristiges Auslaufen der Produktion von Portland-Zementen) berücksichtigt werden.

8.3 Langfristigen Funktionsfähigkeit der Versiegelungskomponenten

Die physikalisch und chemisch (THMC) gekoppelten Prozesse im Lagernahfeld sind während der ersten Zehntausend Jahren sehr komplex. Die Anforderungen an die Versiegelungen sollten auf einem Drehbuch basieren, welches die Lagerentwicklung in Bezug auf die Wasser- und Gasflüsse,

Gebirgsspannungen, Belastungen und hydraulischen Drucke vor und nach dem Einbau der Versiegelungen und Verfüllungen für verschiedene mögliche Szenarien beschreibt. Diese Szenarien sollten auch die sehr langen Betrachtungszeiträume und geologische/klimatische Ereignisse berücksichtigen.

Eine zentrale Frage der EGT, welche im NTB 21-12 nicht diskutiert wird, lautet: Wie dauerhaft sind die angenommenen Transporteigenschaften der Verfüllung bzw. Versiegelung (Permeabilitäten, Porositäten, Gasdurchlässigkeiten) im Verhältnis zu den geochemischen, mechanischen und geologischen Prozessen im Lager? Die EGT erwartet eine entsprechende Darstellung des Kenntnisstandes (Experimente und Modellierungen) zum Zeitpunkt des RBG. Der langfristigen geochemischen Entwicklung der einzelnen Versiegelungskomponenten kommt in diesem Zusammenhang eine wichtige, wenn nicht sogar zentrale Bedeutung zu. Dabei ist besonderes Augenmerk auf die Funktionalität der Filter- und Übergangselemente und die Zeiträume der Korrosion der Widerlager zu legen.

Die gasdurchlässigen V1- und V2-Dichtelemente des SMA-Lagers übernehmen im Konzept der Nagra eine Schlüsselfunktion für die Langzeitsicherheit während einem Betrachtungszeitraum von mehreren Tausend Jahren, der Periode grosser Gasproduktionsraten gemäss NTB 16-03. Gleichzeitig wurde die kurzfristige Funktionsfähigkeit dieser Dichtelemente aber noch nicht in einem Demonstrationsversuch nachgewiesen. Zudem fehlt eine Diskussion (mit rechnerischen Nachweisen) über die langfristige Entwicklung der Zielgrössen (insb. grossräumige Permeabilitäten und Porositäten) unter Berücksichtigung der am Standort erwarteten geomechanischen Spannungen, Hohlraumverformungen und hydraulischen Potenziale. Vor diesem Hintergrund ist, wie schon in Kapitel 8.1 erwähnt, ein robuster Nachweis der Funktionsfähigkeit der Sicherheitsfunktionen des heutigen Versiegelungs- und Verschlusskonzeptes sehr fraglich. Die EGT empfiehlt deshalb die Evaluation einfacherer Konzepte mit sicherer Nachweisführung bezüglich der Erfüllung von Anforderungen aus der Langzeitsicherheit.

9 Referenzen

AG Morsleben (2010): Prüfbericht im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens zur Stilllegung des ERA Morsleben, Prüfkomples „Verfüllen und Verschliessen von Strecken“, IHU, 26.04.2010

BFS (2004): Konzeptplanung der Schachtverschlüsse Bartensleben und Marie des ERA Morsleben, Bundesamt für Strahlenschutz

BGETec (2022): Geschäftsbericht für das Jahr 2021 Claret, F., Bauer, A., Schäfer, T., Griffault, L., and Lanson, B. (2002). Experimental investigation of the interaction of clays with high-pH solutions: A case study from the Callovo-Oxfordian formation, Meuse-Haute Marne underground laboratory (France). *Clays and Clay Minerals* 50, 633-646.

DBE (2016): Site-specific evaluation of safety issues for high-level waste disposal in crystalline rocks, DBE, 31.03.2016

Diomidis, N., Cloet, V., Leupin, O.X., Marschall, P., Poller, A. & Stein, M. (2016): Production consumption and transport of gases in deep geological repositories according to the Swiss disposal concept. Nagra Technical Report NTB 16-03.

Djerbi Tegger, A., Bonnet, S., Khelidj, A., and Baroghel-Bouny, V. (2013). Effect of uniaxial compressive loading on gas permeability and chloride diffusion coefficient of concrete and their relationship. *Cement and Concrete Research* 52, 131-139.

Duro, L., Altmaier, M., Holt, E., Mäder, U., Claret, F., Grambow, B., Idiart, A., Valls, A., and Montoya, V. (2020). Contribution of the results of the CEBAMA project to decrease uncertainties in the Safety Case and Performance Assessment of radioactive waste repositories. *Applied Geochemistry* 112, 104479.

EGT (2020): Sachplan Geologische Tiefenlager, Etappe 3 – Recommendations for Supplementary Investigations related to Repository Gas Transport in the Opalinus Clay, Expertenbericht, 17. November 2021, zuhanden des ENSI, Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung, Brugg.

Gimmi, T., and Alt-Epping, P. (2018). Simulating Donnan equilibria based on the Nernst-Planck equation. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 232, 1-13.

Glaubach, U. (2017): Beitrag zur Anwendung von Bitumen und Asphalt in untertägigen Abdichtungen, Dissertation, TU Bergakademie Freiberg

GRS (2020): Beschreibung der generischen Endlagersysteme für das Vorhaben BASEL, GRS-618, 09/2020

Herold, P., Gruner, M., Jobmann, M. & Kudla, W. (2016). Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse im Ton- und Salzgestein. FuE-Vorhaben ELSA-Phase-II, Teilbericht zum Arbeitspaket 1, TU Bergakademie Freiberg, DBE TECHNOLOGY GmbH, Freiberg, Peine.

Herrmann, K. (2000): Gaspermeabilität von Beton, *Cementbulletin*, 68(11): 3-7

Johnson, L.H., Niemeyer, M., Klubertanz, G., Siegel, P. & Gribi, P. (2002): Calculations of the Temperature Evolution of a Repository for Spent Fuel, Vitrified High-Level Waste and Intermediate Level Waste in Opalinus Clay. Nagra Technical Report NTB 01-04.

Kameche, Z.A., Ghomari, F., Choinska, M., and Khelidj, A. (2014). Assessment of liquid water and gas permeabilities of partially saturated ordinary concrete. *Construction and Building Materials* 65, 551-565.

KEV (2004): Kernenergieverordnung (KEV, SR 732.11) vom 10. Dezember 2004 (Stand am 1. Februar 2019). Der Schweizerische Bundesrat, Bern, Schweiz.

Kim, J., Kim, J., Jung, H., and Ha, J.C. (2013). Experiment on gas entry pressure and gas permeability of concrete silo for a low- and intermediate-level waste disposal facility in Korea. *Nuclear Engineering and Design* 265, 841-845.

Koller, G. (2003): Projekt Opalinuston – Gutachten zur Erdbbensicherheit, 19.08.2003

Kosakowski, G., Huang, Y. & Wieland, E. (2020): Influence of Material Heterogeneities, Process Coupling and Aggregate Reactivity on the Geochemical Evolution of the L/ILW Repository. *Nagra Arbeitsbericht NAB 20-11*.

Lanyon, G.W. (2019): Update of synopsis regarding EDZ development and evolution at the Mont Terri Rock Laboratory. *Nagra Arbeitsbericht NAB 18-45*.

Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.J., Herbert, H.J., Lerch, C., Linkamp, M., Wiczorek, K., and Xie, M. (2012). "Integrität geotechnischer Barrieren Teil 1 Vorbemessung Bericht zum Arbeitspaket 9.2 Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben". (Braunschweig: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH).

Nakarai, K., Shibata, M., Sakamoto, H., Owada, H., and Kosakowski, G. (2021). Calcite Precipitation at Cement–Bentonite Interface. Part 1: Effect of Carbonate Admixture in Bentonite. *Journal of Advanced Concrete Technology* 19, 433-446.

NAB 18-05 (2018): Wieland, E., Kosakowski, G., Lothenbach, B., Kulik, D.A. & Cloet, V.: Preliminary assessment of the temporal evolution of waste packages in the near field of the L/ILW repository. *Nagra Arbeitsbericht*.

NAB 20-12 (2021): Wieland, E. & Kosakowski, G.: Review of the Compositions of Hydrated Cement and Cement-type Pore Water at Different Stages of the Cement Degradation. *Nagra Arbeitsbericht*.

NAB 20-44 (2000): Finsterle, S., Lanyon G.W., Reinicke A., Spillmann, T., Vomvoris, S., Giroud, N. & Kowalsky, M.B. (2021): GAST – Numerical Studies for the Design and Analysis of the GAST In-situ Property Test. *Nagra Arbeitsbericht*.

NAB 21-17 (2021): Lanyon, G.W., Herbert, A.W., Reinecke, A.: GAST Status Report. *Nagra Arbeitsbericht*.

NAB 21-29 (2021): Grundlagen des schweizerischen Lagerkonzeptes für die geologische Tiefenlagerung aus Sicht Langzeitsicherheit. *Nagra Arbeitsbericht*.

NAB 21-02 (2022, Rev. 1): Ableitung Anforderungen an Lagerauslegung aus Sicht Langzeitsicherheit. *Nagra Arbeitsbericht*.

NAB 21-12 (2021): Verschlusskonzept für ein geologisches Tiefenlager

NTB 02-05 (2002): Project Opalinus Clay – Safety Report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). *Nagra Technical Report*.

NTB 08-07 (2008): Effects of post-disposal gas generation in a repository for low- and intermediate-level waste sited in the Opalinus Clay of Northern Switzerland. Nagra Technical Report.

NTB 14-10 (2014): Poller, A., Smith, P., Mayer, G. & Hayek, M.: Modelling of Radionuclide Transport along the Underground Access Structures of Deep Geological Repositories.

NTB 16-07 (2016): D. Manca: Gas Transport and related Chemo-Hydro-Mechanical Response of Sand Bentonite Mixture. Nagra Technical Report.

NTB 19-03 (2019): Jenni Andreas, Wersin Paul, Thoenen Tres, Baeyens Bart, Ferrari Alessio, Gimmi Thomas, Mäder Urs, Marschall Paul, Hummel Wolfgang, Leupin Olivier (2019): Bentonite backfill performance in a high-level waste repository: a geochemical perspective. Nagra Technical Report.

NTB 20-01 (2022): Development of copper coated canisters for the disposal of SF and HLW in Switzerland. Nagra Technical Report.

NTB 21-01 (2021): Entsorgungsprogramm 2021 der Entsorgungspflichtigen. Nagra Technical Report.

NTB 21-02 (2021): The NAGRA research, development and demonstration plan for the disposal of radioactive waste in Switzerland. Nagra Technical Report.

Spillmann, T., Senger, R., Lanyon, G.W., Giroud, N. & Marschall, P. (2015): Preliminary analyses and numerical modeling of the gas permeable seal test (GAST) at the Grimsel Test Site, Switzerland. Proceedings TOUGH Symposium 2015, Berkeley, September 28-30, 2015, p. 8.

TU BAF (2009): Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke, TU BAF, 31.07.2009

TU BAF (2010): Untersuchungen und modelltechnische Beschreibung heterogener Strukturen aus Bindemittel und Zuschlag, TU BAF, 30.11.2010