

Arbeitsbericht NAB 21-12 Rev.1

**Verschlusskonzept für ein
geologisches Tiefenlager**

Dezember 2021

Arbeitsbericht NAB 21-12 Rev.1

**Verschlusskonzept für ein
geologisches Tiefenlager**

Dezember 2021

STICHWÖRTER

Verschluss, Versiegelung, Verfüllung

Nationale Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

Hardstrasse 73
Postfach
5430 Wettingen
Telefon +41 56 437 11 11
nagra.ch

Nagra Arbeitsberichte stellen Ergebnisse aus laufenden Aktivitäten dar, welche nicht zwingend einem vollumfänglichen Review unterzogen wurden. Diese Berichtsreihe dient dem Zweck der zügigen Verteilung aktueller Fachinformationen.

NAB 21-12, Mai 2025: Grund der Revision

Dieser Bericht wurde im Mai 2025 revidiert. Es wurden Bezeichnungen und ausgewählte Textpassagen, insbesondere in der Einleitung (Kap. 1), den Schlussfolgerungen (Kap. 8) und den Figuren 2-2, 3-1 und 3-2, mit den anderen Gesuchsunterlagen abgestimmt. Weiter wurde in den Kapiteln 2, 2.6 und 3.3 Bezug zum Art. 11 Abs. 2 der Kernenergieverordnung hergestellt.

Aus Gründen der Konsistenz mit den Unterlagen zum Rahmenbewilligungsgesuch wird das ursprüngliche Publikationsdatum beibehalten.

Copyright © 2025 by Nagra, Wettingen (Schweiz) / Alle Rechte vorbehalten.

Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Nagra unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Übersetzungen, Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen und Programmen, für Mikroverfilmungen, Vervielfältigungen usw.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Tabellenverzeichnis.....	III
Figurenverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Aufbau des Berichtes.....	2
2 Grundlagen.....	3
2.1 Gesetzliche und regulatorische Grundlagen	3
2.1.1 Vorgaben aus KEG, KEV und Richtlinie ENSI-G03	3
2.1.2 Temporärer Verschluss nach Richtlinie ENSI-G03.....	5
2.2 Das schweizerische Lager-, Sicherheits- und Barrierenkonzept.....	6
2.3 Das Wirtgestein Opalinuston.....	7
2.4 Abfälle	7
2.5 Lagerarchitektur des geologischen Tiefenlagers für die Entwicklung des Verschlusskonzepts	8
2.6 Wichtige Ziele des Verschlusskonzepts	10
2.7 Anforderungen an den Verschluss und das Verschlussystem.....	12
2.7.1 Anforderungen aus der Langzeitsicherheit.....	12
2.7.2 Anforderungen aus der Betriebssicherheit und dem Strahlenschutz	13
2.7.3 Anforderungen an die bauliche Umsetzung.....	14
3 Verschluss eines geologischen Tiefenlagers.....	15
3.1 Aufgaben und Sicherheitsfunktionen der Versiegelungen	17
3.1.1 V1-Versiegelungen.....	17
3.1.2 V2-Versiegelungen.....	18
3.1.3 V3-Versiegelungen.....	18
3.2 Aufgaben und Sicherheitsfunktionen der Verfüllungen	19
3.2.1 Verfüllungen der Bauwerke auf Lagerebene (VF1 und VF2)	19
3.3 Zeitlicher Ablauf des Verschlusses und mögliche Varianten.....	20
3.3.1 Zeitlicher Ablauf des Verschlusses gemäss Realisierungsplan	21
3.3.2 Mögliche Varianten des zeitlichen Ablaufs.....	22
4 Versiegelungsbauwerke.....	25
4.1 Auslegungsgrundsätze	25
4.2 Exemplarischer Aufbau der V1- und V2-Versiegelungsbauwerke	32
4.2.1 Versiegelungsbauwerke V1-HAA der Lagerstollen.....	34
4.2.2 Versiegelungsbauwerke V1-SMA der Lagerkavernen.....	36
4.2.3 Versiegelungsbauwerke V2-HAA und V2-SMA der Lagerfeldzugänge	37
4.3 Exemplarischer Aufbau der V3-Versiegelungsbauwerke.....	40

5	Bautechnische Auslegungsvarianten der Versiegelungsbauwerke	45
5.1	Bautechnische Gefährdungsbilder	45
5.2	Bautechnische Massnahmenpakete.....	49
5.3	Auslegungsvarianten.....	51
5.3.1	Varianten der Versiegelungen V1-HAA, V2-HAA und V2-SMA	51
5.3.2	Varianten der Versiegelung V1-SMA	53
5.3.3	Variante der V3-Versiegelung.....	55
6	Verfüllung der Resthohlräume.....	57
6.1	Arten von Verfüllungen.....	57
6.1.1	Verfüllung Lagerstollen.....	57
6.1.2	Verfüllung Lagerkavernen.....	57
6.1.3	VF1-Verfüllung der Lagerfeldzugänge	58
6.1.4	VF2-Verfüllung des Zentralen Bereichs und der Testbereiche	58
6.1.5	Schachtverfüllungen bis zur Tagesoberfläche	59
7	Temporärer Verschluss.....	61
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	63
9	Literaturverzeichnis	65
Anhang A: Auflage 5.4 Verschlussvarianten		A-1
Anhang B: Anforderungen und Planungsannahmen an die bauliche Umsetzung.....		B-1

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1:	Übersicht der beiden Verschlussvarianten gemäss heutigem Planungsstand	22
Tab. 5-1:	Übersicht bautechnischer Gefährdungsbilder entlang der Versiegelungsbauwerke beim Bau der Widerlager (W), des Dichtelements (D) und der Übergangsschichten (Ü).....	46
Tab. 5-2:	Übersicht Massnahmenpakete für den Bau der Dichtelemente	50
Tab. 5-3:	Exemplarische Varianten V1-HAA, V2-HAA und V2-SMA	52
Tab. 5-4:	Varianten für die Versiegelungen V1-SMA	54

Figurenverzeichnis

Fig. 2-1:	Mehrfachbarrierensystem	6
Fig. 2-2:	Systemskizze für die untertägigen Anlagenelemente und Bauten eines Kombilagers (Nagra 2021a)	10
Fig. 3-1:	Lage der Verschlussbauwerke in der Lagerarchitektur	16
Fig. 3-2:	Realisierungsplan für das geologische Tiefenlager	21
Fig. 4-1:	Prinzipieller, generischer Aufbau der Versiegelungsbauwerke (nicht massstäblich)	31
Fig. 4-2:	Exemplarischer Aufbau der Versiegelung V1-HAA eines HAA-Lagerstollens (Längsschnitt).....	35
Fig. 4-3:	Exemplarischer Aufbau der Versiegelung V1-SMA einer SMA-Lagerkaverne im Abzweiger (Längsschnitt).....	37
Fig. 4-4:	Exemplarischer Aufbau der Versiegelungen V2-HAA (oben) und V2-SMA (unten) der Lagerfeldzugänge (Längsschnitte)	40
Fig. 4-5:	Exemplarischer Aufbau der V3-Versiegelung eines vertikalen Zugangsbauwerks/Schachts (Längsschnitt).....	42

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
ATA	Alphatoxische Abfälle
BE	Abgebrannte Brennelemente
EDZ	Excavation Damaging Zone (Auflockerungszone)
ELB	Endlagerbehälter
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
EP	Entsorgungsprogramm
FE	FE-Experiment (<i>Full-Scale Emplacement Experiment</i>) im Felslabor Mont Terri
GOK	Geländeoberkante
gTL	Geologische(s) Tiefenlager
HAA	Hochaktive Abfälle (abgebrannte Brennelemente und hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung)
KEG	Kernenergiegesetz
KEV	Kernenergieverordnung
M1-Mörtel	Hochpermeabler Monokorn-Mörtel
MBS	Mehrfachbarrierensystem
BaBG	Baubewilligungsgesuch
BeBG	Betriebsbewilligungsgesuch
NZA	Nebenzugangsanlage
OFA	Oberflächenanlage
OFI	Oberflächeninfrastruktur
OPA	Opalinuston
RBG	Rahmenbewilligungsgesuch
SEFV	Stilllegungs- und Entsorgungsfondsverordnung
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle
Sx	Sicherheitsfunktion x
Vx	Versiegelungsbauwerk x
VFx	Verfüllung x
ZB	Zentraler Bereich

1 Einleitung

Der Bundesrat ordnet nach Ablauf der Beobachtungsphase den Verschluss des geologischen Tiefenlagers (gTL) an, wenn der dauerhafte Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet ist. Der Verschluss eines geologischen Tiefenlagers beinhaltet die Verfüllung und Versiegelung der untertägigen Anlagen und Zugänge und ist Teil eines gestaffelten Mehrfachbarrierensystems (MBS).

Die Nagra hat in der Vergangenheit verschiedene Verschlusskonzepte entwickelt. Für das Projekt «Opalinuston» wurde erstmals ein Verschlusskonzept im Wirtsgestein Opalinuston für hochaktive Abfälle (HAA) beschrieben (vgl. Nagra 2002). Für ein Tiefenlager für schwach- und mittelaktiven Abfälle (SMA) wurde das Konzept im Wesentlichen dahingehend modifiziert, dass es die Gasentwicklung der schwach- und mittelaktiven Abfälle berücksichtigt (vgl. Nagra 2008).

Das Projekt «Opalinuston» basierte auf einem Lagerkonzept mit durchgängigen Einlagerungstollen. Später wurde das Lagerlayout auf Einlagerungstollen in Form von Blindstollen (Dead-End-Konzept) angepasst. Der vorliegende Bericht zeigt eine exemplarische Umsetzung des Verschlusskonzeptes basierend auf einer Lagerarchitektur mit Dead-End-Konzept für ein Kombilager.

Damit wird für das Rahmenbewilligungsgesuch ein Verschlusskonzept erstellt. Es zeigt auf, wie der Verschluss des gTL am Standort Haberstal (Gemeinde Stadel) in ca. 100 Jahren auf Grundlage heutiger Kenntnisse umgesetzt werden könnte. Der Bericht diene in seiner ursprünglichen Version als Hintergrundbericht für das Entsorgungsprogramm 2021 (Nagra 2021a) und beantwortete die Bundesratsaufgabe 5.4 zum Entsorgungsprogramm 2016 (Bundesrat 2018) (siehe Anhang A).

Mit dem Rahmenbewilligungsgesuch für ein gTL am Standort Haberstal wird der Sicherheitsnachweis für ein gTL im Opalinuston erneut erbracht (Kapitel 10, Nagra 2024a). Eine wesentliche Erkenntnis aus den umfangreichen Sicherheitsanalysen ist, dass das gTL über den gesamten Bewertungszeitraum hinweg für alle Abfallkategorien als sicher zu betrachten ist und über grosse Sicherheitsreserven verfügt. Die massgebende Barriere für die Langzeitsicherheit des Tiefenlagers ist die geologische Barriere, insbesondere der Opalinuston. Die Verschluss- und Versiegelungsbauwerke leisten einen zusätzlichen Beitrag zur Langzeitsicherheit. Die Analysen zeigen, dass insbesondere die Versiegelungsbauwerke in den Schachtzugängen die Langzeitsicherheit gewährleisten.

Im weiteren Verlauf des Bewilligungsverfahrens wird das derzeitige generische Verschlusskonzept standortspezifisch weiterentwickelt. Im Rahmen der kontinuierlichen Projektentwicklung wird ein kompakteres Lager im Sinne eines haushälterischen Umgangs mit dem Untergrund angestrebt, jedoch ohne Abstriche bei der Sicherheit. Ein integraler Aspekt dieser Entwicklung ist auch die Dimensionierung der Verschlussbauwerke, die die Sicherheit mit Reserven gewährleisten.

1.1 Aufbau des Berichtes

Im vorliegenden Bericht werden zunächst die Grundlagen für die Konzeptentwicklung aufgeführt (Kapitel 2). Diese umfassen die gesetzlichen Grundlagen (Abschnitt 2.1), eine Einführung zu den wesentlichen Bestandteilen des schweizerischen Lager-, Sicherheits- und Barrierenkonzepts (Abschnitt 2.2), die Eigenschaften des Wirtgesteins Opalinuston und seine Wirkung als geologische Barriere im System geologisches Tiefenlager (Abschnitt 2.3) sowie den Einschluss der Abfälle (Abschnitt 2.4). Des Weiteren wird die generische Lagerarchitektur eingeführt (Abschnitt 2.5), für welche das Verschlusskonzept entwickelt wird. Abschliessend werden übergeordnete Ziele (Abschnitt 2.6) und die Anforderungen aus Langzeitsicherheit, Betriebssicherheit und Strahlenschutz an den Verschluss, das Verschlussystem und die bauliche Umsetzung erläutert (Abschnitt 2.7).

Versiegelungen und Verfüllungen sind technische Barrieren und wesentliche Bestandteile des Mehrfachbarrierensystems (Kapitel 3). Im Kontext des Mehrfachbarrierensystems werden die Aufgaben und Sicherheitsfunktionen der Versiegelungen (Abschnitt 3.1) und Verfüllungen (Abschnitt 3.2) beschrieben, konkretisiert und diskutiert sowie deren Lage innerhalb der Lagerarchitektur veranschaulicht. Im Anschluss wird der zeitliche Ablauf des Verschlusses gemäss dem Realisierungsplan im Entsorgungsprogramm 2021 (Nagra 2021a) erörtert und mit möglichen alternativen Ablaufvarianten verglichen (Abschnitt 3.3).

Basierend auf den Sicherheitsfunktionen, werden die Versiegelungsbauwerke konzipiert und beschrieben (Kapitel 4). Dazu werden aus den Anforderungen (Abschnitt 2.7) Auslegungsgrundsätze abgeleitet (Abschnitt 4.1). Mit diesen wird zunächst ein prinzipieller Aufbau für Versiegelungsbauwerke erarbeitet, welcher dann hinsichtlich seiner Umsetzung in exemplarische geometrische Dimensionen für die jeweiligen Einsatzorte (Lagerkammer, Lagerfelder und Zugangsbauwerke) vertieft wird (Abschnitt 4.2 und 4.3).

Anschliessend werden verschiedene bautechnische Varianten der Versiegelungsbauwerke dargestellt (Kapitel 5). Hierzu werden zunächst Gefährdungsbilder (Abschnitt 5.1) und zugehörige Massnahmen (Abschnitt 5.2) beschrieben, die zu bautechnischen Auslegungsvarianten für die verschiedenen Versiegelungsbauwerke führen (Abschnitt 5.3).

Für die Verfüllungen der Resthohlräume (Kapitel 6) mit den möglichen Verfüllbaustoffen werden die Lagerkammern, Lagerfeldzugänge und Zugangsbauwerke (Schächte) betrachtet. Dazu wird beschrieben, wie die für die Verfüllung massgeblichen Sicherheitsfunktionen (Abschnitt 3.2) umgesetzt werden können.

Der Bericht schliesst mit Anmerkungen zum temporären Verschluss (Kapitel 7) und einer Zusammenfassung mit Ausblick (Kapitel 8).

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden wesentliche Informationen zusammenfassend wiedergegeben, um die Lesbarkeit auch als Einzelbericht zu gewährleisten. Für detailliertere Ausführungen wird auf das Entsorgungsprogramm EP21 (Nagra 2021a) und die dort genannten Quellen verwiesen.

2.1 Gesetzliche und regulatorische Grundlagen

2.1.1 Vorgaben aus KEG, KEV und Richtlinie ENSI-G03

Art. 3 Bst. c KEG definiert ein geologisches Tiefenlager für radioaktive Abfälle als eine Anlage, die sich im geologischen Untergrund befindet und verschlossen werden kann, sofern der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt durch passive Barrieren sichergestellt ist. 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. 39 Abs. 2 KEG hält zudem fest, dass der Bundesrat nach Ablauf der Beobachtungsphase die Verschlussarbeiten anordnet, wenn der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet ist.

Mit dem Rahmenbewilligungsgesuch ist gemäss Art. 13 Abs. 1 Bst. c KEG ein Konzept für den Verschluss einzureichen. Sowohl im geforderten Konzept als auch in der Dokumentation für das Baubewilligungsgesuch respektive im Projekt für den Verschluss (welches am Ende des Einlagerungsbetriebs einzureichen ist) werden die gemäss Art. 69 KEV aufgeführten Aspekte stufengerecht dokumentiert.

Art. 11 Abs. 2 KEV hält für den Verschluss relevante Grundsätze für die Auslegung von geologischen Tiefenlagern fest, dass:

- b. die Langzeitsicherheit durch gestaffelte passive Sicherheitsbarrieren gewährleistet wird
- c. Vorkehrungen zur Erleichterung von Überwachung und Reparaturen des Lagers oder zur Rückholung der Abfälle die passiven Sicherheitsbarrieren nach dem Verschluss des Lagers nicht beeinträchtigen
- d. das Lager innert einiger Jahre verschlossen werden kann

Art. 69 Abs. 1 KEV schreibt vor, dass beim Verschluss eines geologischen Tiefenlagers der Eigentümer 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:

- das Verfüllen und Versiegeln der Zugänge zu den Einlagerungsbereichen
- die Überführung des Pilotlagers in einen langfristig sicheren Zustand
- das Verfüllen und Versiegeln der Zugänge zum Tiefenlager
- 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
- dass die vor der Errichtung des geologischen Tiefenlagers bestehende Trennung der wasserführenden Gesteinsschichten langfristig wiederhergestellt wird

Die Richtlinie ENSI-G03 (ENSI 2020b) stellt in Art. 7.3 "Verfüllung und Versiegelung" die folgenden vier Forderungen:

- a. 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.
- b. Die Verfüllung und Versiegelung der Lagerkavernen und -stollen ist auf die Erfordernisse der Langzeitsicherheit abzustimmen. Die Versiegelungen haben eine ausreichende mechanische Stabilität aufzuweisen, um die verfüllten Lagerstollen zu schützen und dem Quell- und Gasdruck in den Lagerstollen standzuhalten.
- c. Mit dem Baugesuch ist ein Versiegelungskonzept einzureichen, das zumindest die Anforderungen gemäss Buchstabe b umfasst.
- d. Vor der Durchführung der Versiegelungsarbeiten ist nachzuweisen, dass die vorgesehene Versiegelung die gemäss Versiegelungskonzept an sie gestellten Anforderungen erfüllt.

Sie enthält weiter die folgenden Definitionen und Anforderungen:

- Verfüllung: Verschliessen von Hohlräumen mittels Einbringung von festen Materialien. Die Verfüllung kann der mechanischen Stabilisierung, der räumlichen Trennung oder der Gewährleistung der Sicherheitsfunktionen der natürlichen und technischen Barrieren dienen.
- Versiegelungsbauwerk: geotechnische Barriere mit gebirgsstützender Funktion, die auch dem Schutz der Verfüllung dient
- Vor Beginn der Verschlussarbeiten muss der Nachweis erbracht werden, dass die geplanten Versiegelungsbauwerke die an sie gestellten Anforderungen erfüllen.
- Die Erfüllung aller Anforderungen an den endgültigen Verschluss muss durch eine Sicherheitsanalyse, welche die wirksame Durchführung der Verschlussarbeiten berücksichtigt, qualitativ überprüft und bestätigt werden.

Die Beendigung der Verschlussstätigkeiten wird in der Richtlinie ENSI-G03 (ENSI 2020b) als Bestätigung des ordnungsgemässen Verschlusses bezeichnet.

Die bautechnische Machbarkeit der Versiegelungen muss während des Betriebs des Tiefenlagers nachgewiesen werden (Nagra 2021b).

Zudem verlangt der Gesetzgeber weitere formale Schritte auf dem Weg zur Genehmigung und darüber hinaus:

- Die Baubewilligung wird erteilt, wenn [...] "ein Projekt für die Beobachtungsphase und ein Plan für den Verschluss der Anlage vorliegt " (Art. 16 Abs. 1 Bst. e KEG, Art. 24 KEV).
- Der Inhaber einer Betriebsbewilligung, der für die Sicherheit der Anlage und des Betriebs verantwortlich ist, ist verpflichtet, [...] "das Projekt für die Beobachtungsphase und den Plan für die Verschluss der Anlage nachzuführen" bzw. auf dem neuesten Stand zu halten. Art. 22 Abs. 2 Bst. k KEG und Art. 42 Abs. 1 KEV schreiben vor, dass der Inhaber einer Betriebsbewilligung alle zehn Jahre [...] das Projekt für die Beobachtungsphase und den Stilllegungsplan überprüfen und aktualisieren muss.
- Der Eigentümer des geologischen Tiefenlagers muss ein aktualisiertes Projekt für die Beobachtungsphase und ein Projekt für den allfälligen Verschluss vorlegen, wenn (Art. 39 Abs. 1 KEG):
 - die Einlagerung der radioaktiven Abfälle abgeschlossen ist oder
 - die Betriebsbewilligung entzogen wurde oder nach Art. 68 Abs. 1a oder b KEG erloschen ist und das Departement angeordnet hat, dass ein Projekt vorgelegt werden muss.
- Gemäss Art. 42 Abs. 2 KEV ist eine Aktualisierung/Nachführung des Plans oder des Projekts für die Stilllegung und den Verschluss auch erforderlich, wenn:
 - wesentliche Änderungen an der Anlage vorgenommen worden sind,
 - wesentliche Anforderungen geändert wurden, die sich auf [...] die Beobachtungsphase und den Verschluss beziehen, oder
 - die wesentliche Entwicklung der Technik dies verlangt.

2.1.2 Temporärer Verschluss nach Richtlinie ENSI-G03

ENSI-G03 Art. 7.5 (ENSI 2020b) verlangt zusätzlich Vorkehrungen für einen temporären Verschluss zu treffen, der sich vom ordnungsgemässen Verschluss (Art. 39 Abs. 3&4 KEG) durch das schnellere Handeln (gemäss Erläuterungsbericht ENSI-G03 (ENSI 2020a) "einige Wochen bis Monate" entsprechend einer vereinfachten (Teil-)Versiegelung der Anlage) und die Möglichkeit zur Reversibilität der getroffenen Massnahmen unterscheidet. Ziel ist es, dass im Fall einer ungünstigen Entwicklung der Rahmenbedingungen, welche die Sicherheit des Lagers oder eines ordnungsgemässen Verschlusses in Frage stellen, die Einlagerungsbereiche für "einige Jahrzehnte bis Jahrhunderte" in einen passiv sicheren Zustand überführt werden können. Gründe für einen temporären Verschluss können gemäss Erläuterungsbericht ENSI-G03 (ENSI 2020a) beispielsweise eine sich abzeichnende gesellschaftliche Instabilität, ein unmittelbar drohender Kriegszustand, Epidemien oder ein ökonomischer Zusammenbruch sein.

Der temporäre Verschluss ist gemäss Art. 7.5 Bst. d ENSI-G03 (ENSI 2020b) in einem Konzept darzulegen, das mit dem Baugesuch einzureichen und mit dem Betriebsbewilligungsgesuch zu aktualisieren ist. Daher wird der temporäre Verschluss hier nur kurz beschrieben (Kapitel 7) und im Baugesuch detailliert betrachtet.

2.2 Das schweizerische Lager-, Sicherheits- und Barrierenkonzept

Grundlage für die Auslegung des geologischen Tiefenlagers ist das Vorliegen eines sicherheitstechnisch geeigneten Lagerkonzepts. Das Lagerkonzept gibt Aufschluss darüber, wie das geologische Tiefenlager in seinen Grundzügen gestaltet wird. Es ist die Umsetzung des Entsorgungskonzepts unter Berücksichtigung des Sicherheitskonzepts für die Nachverschlussphase.

Das Sicherheitskonzept für die Nachverschlussphase eines geologischen Tiefenlagers stellt sicher, dass der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet ist. In der Schweiz beruht das Sicherheitskonzept auf einem bezüglich Langzeitsicherheit optimierten Mehrfachbarrierensystem, bestehend aus gestaffelten, passiv wirkenden technischen und geologischen Barrieren (siehe Fig. 2-1). Dies sind Abfallmatrix, Endlagerbehälter, Verfüllung und Versiegelung als technische Barrieren sowie das Wirtgestein als geologische Barriere. Dieses Mehrfachbarrierensystem stellt sicher, dass das Tiefenlagersystem – unter Berücksichtigung seiner zeitlichen Entwicklung – die zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit notwendigen Sicherheitsfunktionen (siehe Nagra 2021a und Abschnitt 2.7) erfüllt.

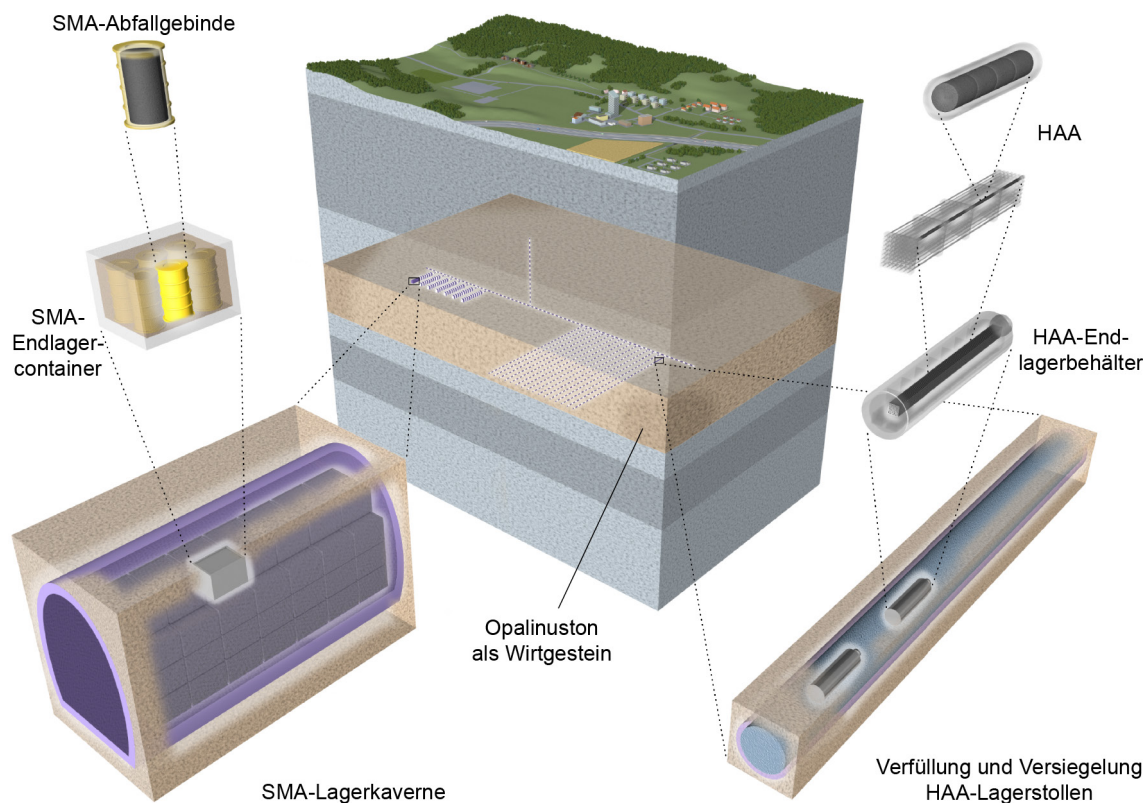


Fig. 2-1: Mehrfachbarrierensystem

Gemäss Nagra (2021a)

Dargestellt für HAA (rechts) am Beispiel von abgebrannten Brennelementen (BE) mit Brennstäben (UO₂-Pellets mit Hüllrohren), welche in HAA-Endlagerbehälter aus Stahl verpackt werden. Die HAA-Endlagerbehälter werden in einen HAA-Lagerstollen eingelagert, und dieser wird anschliessend verfüllt (beispielhaft mit Bentonit) und versiegelt.

Dargestellt für SMA (links) am Beispiel eines typischen SMA-Abfallgebindetyps (200-l-Fass), welcher in SMA-Endlagercontainer verpackt und in eine beispielhaft mit zementbasiertem Referenzmörtel hinterfüllte SMA-Lagerkaverne eingelagert wird.

Sowohl für HAA als auch SMA stellt Opalinuston als Wirtgestein die natürliche Barriere dar.

2.3 Das Wirtgestein Opalinuston

Opalinuston ist ein Tongestein. Tongesteine kommen in der Natur in den unterschiedlichsten Ausprägungen vor. Eine Übersicht über die Vorkommen in der Schweiz und speziell den Opalinuston findet sich in Nagra (2002, 2005, 2008). Eine Zusammenfassung der wesentlichen Eigenschaften des Opalinuston als Wirtgestein enthält Nagra (2014).

Das Wirtgestein als geologische Barriere bildet die Hauptbarriere des Mehrfachbarrierensystems und schliesst die eingelagerten Abfälle ein. Als Wirtgestein für ein geologisches Tiefenlager eignet sich der Opalinuston insbesondere aus folgenden Gründen:

- besonders geringe hydraulische Leitfähigkeit
- geringe Diffusionskoeffizienten für den Transport gelöster Radionuklide durch das Gestein
- effiziente Selbstabdichtung bei mechanischer Deformation mit Bruchbildung
- Sorptionsfähigkeit eines Grossteils der Radionuklide aus den Abfällen
- stabile reduzierende geochemische Bedingungen

Aufgrund der günstigen Eigenschaften und seiner Mächtigkeit lässt sich festhalten, dass der Opalinuston, der in den Standortregionen vorliegt, eine sehr hohe Wirksamkeit als geologische Barriere aufweist (Nagra 2014). Der geologischen Barriere kommt im Konzept eine grosse sicherheitstechnische Bedeutung zu, und ihre Integrität ist zentral. Die technischen Massnahmen des Verschlusses (siehe Abschnitt 2.6) zielen im Einklang mit der Arbeitssicherheit und dem Strahlenschutz während des Verschlusses ausnahmslos darauf ab, den Opalinuston in seiner Funktion zu unterstützen. Um die Barrierenintegrität des Wirtgesteins über den gesamten Betrachtungszeitraum zu erhalten, ist der Verschluss des Lagers so konzipiert, dass lagerbedingte Einflüsse (Leupin et al. 2016a, 2016b) keine für die Sicherheit relevanten irreversiblen Schäden an der geologischen Barriere herbeiführen können.

2.4 Abfälle

Generell wird zwischen hochaktiven Abfällen (HAA), alphanuklearen (ATA)¹ und schwach- und mittelaktiven Abfällen (SMA) unterschieden. Eine detailliertere Zusammenstellung findet sich im Kapitel 2 des Entsorgungsprogramms 2021 (Nagra 2021a).

Die HAA aus den Kernkraftwerken bestehen aus abgebrannten Brennelementen sowie verglasten Abfällen aus der Wiederaufbereitung. Die HAA werden für die geologische Tiefenlagerung in Endlagerbehälter (ELB) verpackt, welche anschliessend verschweisst werden. Die Einlagerung der ELB führt aufgrund der zerfallsbedingten Wärmeleistung zu einer gewissen Erwärmung der HAA-Lagerstollen. Gasbildung durch Korrosion der ELB findet zwar statt, aber das Potenzial ist nicht gross genug, um in Anforderungen an das Verschlusssystem zu resultieren.

Die SMA umfassen Betriebsabfälle aus den Kernkraftwerken (z. B. kontaminierte Schutzanzüge, Putzmaterial, Werkzeuge, Maschinenteile, konzentrierte Abwässer, Ionentauscherharze, Filter aus Reinigungssystemen etc.) sowie Rohabfälle aus Medizin, Industrie und Forschung. Zusätzlich fallen Abfälle aus dem Rückbau der Kernkraftwerke an. Aufgrund des grossen Metallanteils und

¹ Die ATA-Abfälle werden in der exemplarischen Umsetzung, die dem RBG zugrunde liegt, zusammen mit den SMA-Abfällen in das SMA-Lager bzw. in den SMA-Lagerteil des Kombilagers überführt und sind daher in diesem Bericht auch unter "SMA-Abfälle" erfasst.

der organischen Anteile entstehen beträchtliche Mengen an Gasen. Diese Gase müssen zum Druckabbau durch Verschlussbauwerke geführt werden, um grössere Volumina zur Gasspeicherung zu erschliessen. Thermische Effekte sind im SMA-Lager von untergeordneter Bedeutung.

2.5 Lagerarchitektur des geologischen Tiefenlagers für die Entwicklung des Verschlusskonzepts

Die generische Lagerarchitektur stellt eine exemplarische Umsetzung der konzeptuellen Vorgaben dar und ist als Systemskizze für ein generisches Kombilager in Fig. 2-2 dargestellt. Das Kombilager dient der Lagerung von HAA- und SMA-Abfällen am gleichen Standort. Das Konzept ist für das im Rahmenbewilligungsgesuch beantragte Kombilager mit Oberflächenanlage am Standort Haberstal anwendbar.

Im Folgenden werden die einzelnen Anlagenelemente und Bauten der Lagerarchitektur zusammen mit der entsprechenden Nummerierung aus Fig. 2-2 kurz beschrieben. Eine ausführliche Beschreibung der Elemente ist im Bericht «Anlagen- und Betriebskonzept für das geologische Tiefenlager» (Nagra 2024b) zu finden.

An der Erdoberfläche steht die Oberflächeninfrastruktur (OFI), welche aus der Oberflächenanlage (OFA, 14) und den Schachtzugängen (7,14) besteht.

Die Erschliessung des geologischen Tiefenlagers erfolgt in der Darstellung durch drei Schachtbauwerke:

- den Einlagerungsschacht (8), dessen Schachtkopf sich im Areal der OFA (14) befindet
- den Bau- und Betriebsschacht (1) und
- den Lüftungsschacht (2)

Die Schachtköpfe des Einlagerungs-, Bau- und Betriebs- und des Lüftungsschachts befinden sich hier auf zwei schematisch nebeneinander angeordneten Zugängen. Diese drei Schächte bilden die Verbindung von der Oberfläche zum zentralen Bereich (ZB, 3) auf Lagerebene, von wo aus jeweils der HAA-Lagerteil und der SMA-Lagerteil aufgefahren und erschlossen werden. Ebenfalls dem ZB angeschlossen, sind die Testbereiche² (4,5,6).

Der Zugang auf Lagerebene zum HAA-Lagerteil erfolgt über drei Lagerfeldzugänge: den Betriebs- (15), den Lüftungs- (16) und den Bautunnel HAA (17). Separate Bau- und Betriebs-tunnel sind für den vorgesehenen Betriebsablauf notwendig, da parallel zum sukzessiven Auf-fahren der einzelnen Lagerstollen (20) in den bereits fertiggestellten Lagerstollen ELB mit HAA eingelagert werden (siehe z. B. Nagra 2020). Weiterhin wird im geplanten Ablauf auch die Auflage zur "schnellstmöglichen Herstellung passiver Sicherheitsbarrieren" (ENSI 2020b) umgesetzt, indem die Lagerstollen fortlaufend verfüllt werden und jeder Lagerstollen unmittelbar nach der vollständigen Einlagerung versiegelt wird.

² «Testbereiche» ersetzen im RBG «EUU» (Erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag)

Für die Erschliessung des SMA-Lagerteils sind zwei Lagerfeldzugänge vorgesehen: der Betriebs- (9) und der Lüftungstunnel SMA (10). Der Betriebstunnel hat zwei Funktionen: In der Phase des Baus der Lagerkavernen stellt er den "Bautunnel" und während der späteren Einlagerungsphase den Betriebstunnel dar. Ein paralleler Bau- und Einlagerungsbetrieb wie im HAA-Lagerteil ist bei der Einlagerung in die Lagerkavernen für SMA (13) derzeit nicht vorgesehen. Die SMA-Behälter werden ebenfalls abschnittsweise eingelagert, die Lagerkavernen fortlaufend verfüllt und nach vollständiger Einlagerung und Verfüllung unmittelbar versiegelt.

Neben den Hauptlagern für HAA und SMA existiert jeweils ein Pilotlager HAA (18) und ein solches für SMA (12) mit zugehörigen Kontrollstollen (19 und 11). Ihr Zugang erfolgt auf Lagerebene über von den Lagerfeldzugängen abzweigende kurze Tunnel. Es handelt sich dabei um jeweils eigenständige, vom Hauptlager abgetrennte Teile des geologischen Tiefenlagers, in welchen das Verhalten der Abfälle, der Verfüllungen, der Versiegelungen und des Wirtgesteins bedarfsgerecht bis zum Ablauf der Beobachtungsphase überwacht werden kann (ENSI 2020b).

Die Einlagerungskammern, d. h., die Lagerstollen und -kavernen in Haupt- und Pilotlager HAA und SMA sind nur von einer Seite stirnseitig über Abzweigerbauwerke erschlossen und stellen somit Blindstollen/-kavernen dar. Die Gesamtheit der Lagerstollen HAA und der Lagerkavernen SMA wird als Lagerfeld HAA bzw. SMA bezeichnet.

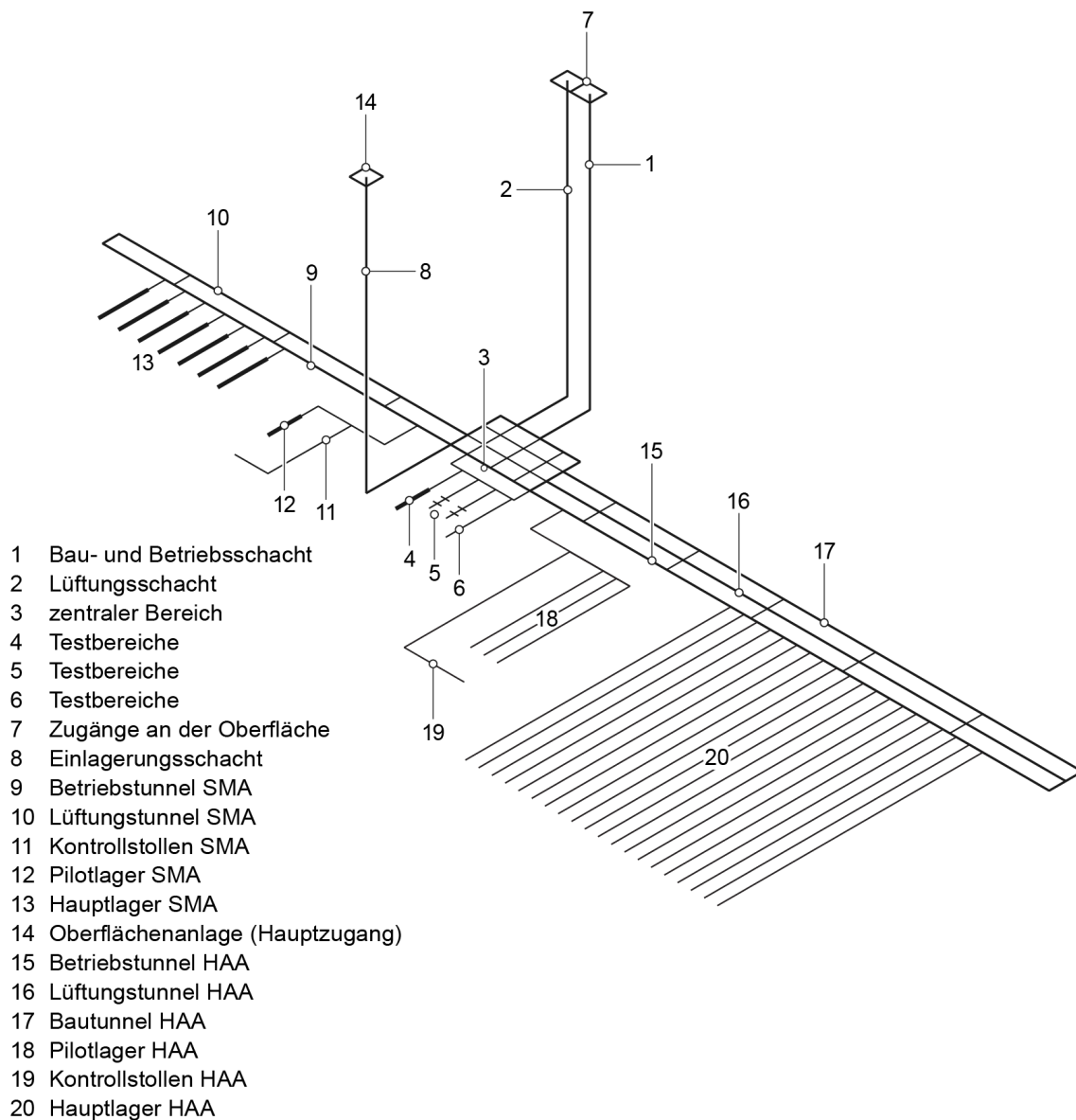


Fig. 2-2: Systemskizze für die untertägigen Anlagenelemente und Bauten eines Kombilagers (Nagra 2021a)

2.6 Wichtige Ziele des Verschlusskonzepts

Das Verschlusskonzept ist so zu gestalten, dass das Wirtgestein Opalinuston als natürliche Barriere in seiner Funktion unterstützt und möglichst wenig geschädigt wird. Die Verschlussmassnahmen sollen die für die Radionuklidrückhaltung massgeblichen Prozesse und Zustände im intakten Wirtgestein nicht gefährden und die vor dem Erschliessen vorhandenen Ursprungszustände in den mit dem Verschluss wieder verfüllten untertägigen Bauwerken, soweit möglich und sinnvoll, wieder her- bzw. sicherstellen (siehe auch Abschnitt 2.3). Dabei dürfen Vorkehrungen zur Erleichterung von Überwachung und Reparaturen des Lagers oder zur Rückholung der Abfälle nur so vorgenommen werden, dass sie die Sicherheitsbarrieren nach dem Verschluss nicht beeinträchtigen (siehe Abschnitt 2.1). Mit dem Rückholungskonzept (Nagra 2022) wurde gezeigt, dass keine solche Massnahmen nötig sind.

Im Folgenden sind die wichtigsten Ziele der Verfüllung, Versiegelung und der zugehörigen Materialisierung aufgelistet:

- Verfüllung sämtlicher aufgefahrener Hohlräume mit den Zielen (siehe auch gesetzliche Vorgaben im Abschnitt 2.1):
 - Stabilisierung der aufgefahrenen Tunnel und Lagerkammern durch eine sich ausbildende Stützwirkung
 - räumliche Trennung von Abfällen vom übrigen gTL bereits während der Einlagerung
 - Gewährleistung / Unterstützung der Sicherheitsfunktionen natürlicher oder technischer Barrieren
 - Sicherung der Tagesoberfläche im Hinblick auf Folgenutzungen durch Vermeiden von unzulässigen Oberflächensetzungen und Setzungsdifferenzen
 - dauerhafte Sicherstellung der Grundwasserstockwerkstrennung, um die natürliche hydrogeologische Situation zu erhalten
- Errichtung von Versiegelungsbauwerken mit den Zielen:
 - abschliessende räumliche Trennung der radioaktiven Abfälle nach ihrer Einlagerung
 - hinsichtlich der Langzeitsicherheit unmittelbare Isolation der radioaktiven Abfälle mittels Versiegelung von Lagerkammern (auch nützlich für den Fall eines "temporären Verschlusses")
 - weitgehendes Unterbinden advektiver Transportprozesse entlang von untertägigen Zugängen des verfüllten Tiefenlagers mittels Versiegelungen
- soweit möglich, Wahl von dem Wirtgestein charakteristisch gleichen bzw. ähnlichen Material auf Basis von Bentonit und/oder aufbereitetem Opalinuston mit den Zielen:
 - Quelldruckentwicklung (insbesondere bei reinem Bentonit) und Selbstabdichtung beim Zutritt von Wasser
 - Erhaltung des natürlichen, vorteilhaften geochemischen Milieus, soweit möglich
 - Modifikation der Basisbaustoffe Bentonit und Opalinuston nur mit langzeitbeständigen, unter den gegebenen Bedingungen chemisch stabilen Füllerstoffen wie Sande und Kiese, die das chemische Milieu nur wenig verändern
 - Bei der Wahl von Baustoffen auf Zementbasis (insbesondere Beton oder Injektionsmörtel) sollen solche mit einem tiefem pH-Wert³ gewählt werden, mit dem Ziel, eine möglichst geringe oder nur vorteilhafte Veränderung des geochemischen Milieus sicherzustellen.

³ Tiefer pH-Wert gilt für die HAA-Lagerstollen und alle untertägigen Zugänge. Ausnahme sind die SMA-Lagerkavernen: Dort wird ein Hoch-pH-Zement eingesetzt.

2.7 Anforderungen an den Verschluss und das Verschlussssystem

Als integraler Bestandteil der Projektentwicklung hat die Nagra eine Methodik zur Ableitung von Anforderungen an die Lagerauslegung über fünf Stufen entwickelt und aus Sicht der Langzeitsicherheit solche im Hinblick auf das RBG abgeleitet (Nagra 2024c).

Die nachstehende Auflistung zählt die vier Ziele und Prinzipien der obersten Stufe (Stufe 1) der Anforderungsstruktur (Nagra 2024c) auf und gibt Beispiele an, wie diese in einem Verschlusskonzept berücksichtigt werden können.

- **Langzeitsicherheit** (siehe Abschnitt 2.7.1)
- **Arbeits-, Betriebssicherheit und Machbarkeit** (siehe Abschnitt 2.7.2)
- **Umwelt, Raumplanung und Gesellschaft**
 - z. B. Trennung von Grundwasserstockwerken
- **Ressourcen und Wirtschaftlichkeit**
 - z. B. zuverlässiger Verschluss des geologischen Tiefenlagers innerhalb eines angemessenen Zeitraums zu verhältnismässigen Kosten
 - z. B. Ressourcenschonung durch Verwendung von ausgebrochenem Material bei der Resthohlraumverfüllung ausserhalb der Lagerkammern
 - z. B. Optimierung der Abläufe bei der Errichtung von Verschlussbauwerken

Von den vier Zielen und Prinzipien der obersten Stufe sind vor allem die ersten drei relevant für das Verschlusskonzept. Die Kategorie "Ressourcen und Wirtschaftlichkeit" hat lediglich im Hinblick auf die Kosten und Ressourcenschonung einen Einfluss auf das Verschlusskonzept.

2.7.1 Anforderungen aus der Langzeitsicherheit

Die übergeordneten Anforderungen aus der obersten Stufe der Anforderungsstruktur münden für die Langzeitsicherheit in fünf Sicherheitsfunktionen, die das Tiefenlagersystem als Ganzes erfüllen muss. Sie werden der Stufe 2 der Anforderungsstruktur zugeordnet und sind:

- **S1: Isolation** der radioaktiven Abfälle von der Erdoberfläche
- **S2: Vollständiger Einschluss** der Radionuklide für eine gewisse Zeit
- **S3: Immobilisierung, Rückhaltung und langsame Freisetzung** der Radionuklide
- **S4: Kompatibilität** der Elemente des Mehrfachbarrierensystems und der radioaktiven Abfälle untereinander und mit anderen Materialien⁴
- **S5: Langzeitstabilität** des Mehrfachbarrierensystems bezüglich geologischer und klimatischer Langzeitentwicklungen

Für das Verschlusskonzept sind die Sicherheitsfunktionen S2 und S5 höchstens indirekt relevant. S2 wird durch eine entsprechende Auslegung der ELB und S5 durch eine geeignete Standortwahl und eine ausreichende Tiefenlage gewährleistet. Demgegenüber fliessen die Sicherheitsfunktionen S1, S3 und S4 direkt in das Verschlusskonzept mit ein.

⁴ Dies schliesst auch die Aufrechterhaltung günstiger Prozesse und Eigenschaften des Mehrfachbarrierensystems mit ein (Aspekt der Schutzfunktion).

Für die Komponenten des Verschlussystems wird eine erste Umsetzung der relevanten Sicherheitsfunktionen aus der Langzeitsicherheit im Kapitel 3 gezeigt bzw., basierend auf den Resultaten in Nagra (2024c), zusammengefasst.

2.7.2 Anforderungen aus der Betriebssicherheit und dem Strahlenschutz

Anforderungen aus der Betriebssicherheit und dem betrieblichen Strahlenschutz und damit aus dem einschlägigen gesetzlichen und behördlichen Regelwerk wirken sich vor allem auf die Lagerauslegung und die Organisation von untertägigen Arbeitsabläufen aus. Aus dem Gewinnungsbergbau, konventionellen Untertagedeponien und dem Tunnelbau einerseits sowie dem Betreiben kerntechnischer Anlagen andererseits liegt hierzu ein reichhaltiger Erfahrungsschatz vor.

Zur Einhaltung der nuklearen Sicherheit müssen die im geologischen Tiefenlager gehandhabten und gelagerten radioaktiven Materialien jederzeit wirksam eingeschlossen oder abgeschirmt sein. Für das Verschlusskonzept wird vorausgesetzt, dass wegen der wirksamen technischen Nahfeldbarrieren, bestehend aus einem Verfüllbaustoff mit einer ausreichenden Pufferstrecke zwischen dem zuletzt eingelagerten Endlagerbehälter resp. -container und dem Erstellungsort der Lagerkammerversiegelungen, keine erhöhten Anforderungen im Sinne der nuklearen Betriebssicherheit resp. des Strahlenschutzes erforderlich sein werden. Lediglich während des Baus der Lagerkammerversiegelungen sind aufgrund der relativen Nähe zu den Abfällen weiterhin Überwachungsmassnahmen (z. B. Messungen und Personendosimetrie) geplant.

Die Lagerkammerversiegelungen übernehmen bei einem Zwischenfall, beispielsweise bei einem Zutritt von Wasser oder einem unbefugten Eindringen in das geologische Tiefenlager, den Schutz der jeweiligen Endlagerbehälter/-container in den HAA-Lagerstollen und SMA-Lagerkavernen. Um dies zu gewährleisten, werden die Lagerstollen in Übereinstimmung mit Art. 7.3 Bst. a ENSI-G03 (ENSI 2020b) und auch die Lagerkavernen unmittelbar nach Beendigung der Einlagerung versiegelt, was auch der nuklearen Betriebssicherheit und dem Strahlenschutz dient.

Die konventionelle Sicherheit umfasst die Arbeitssicherheit, den Gesundheitsschutz, den Brand- und Explosionsschutz sowie Flucht, Rettung und Intervention. Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz gewährleisten dabei zulässige gesundheitsrelevante Bedingungen für Personal und Besucher (z. B. zulässige Arbeits- oder Aufenthaltszeiten, Lärm, Temperatur, Feuchtigkeit, Staubentwicklung) sowie den Schutz vor gesundheitsgefährdenden Einwirkungen beim Auftreten von Abweichungen vom Regelbetrieb. Regelmässige Gefährdungsermittlungen dienen der Erkennung solcher potenziellen Abweichungen. Die aus der entsprechenden Risikobeurteilung abgeleiteten Sicherheitssysteme und die dazugehörigen administrativen Massnahmen (inklusive Kontrollen) werden bei der Anlagenauslegung und in den administrativen Festlegungen berücksichtigt (Art. 110 & 117 BV, Art. 6 ArG, Art. 82 UVG). Beispielhaft wird hierbei auf die Punkte Wegführung, Zugänglichkeiten, Beleuchtung, Lüftung, Kühlung, Alarmierung, Kommunikation, Medienleitungen, Arbeitszeiten, persönliche Schutzausrüstung sowie Schulungen im Sinne der Prävention verwiesen. Aufgrund des aktuellen Planungs- und Detaillierungsstands thematisiert der vorliegende Bericht diese Punkte und ihre Anforderungen an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber.

Anforderungen an das Verschlusskonzept ergeben sich somit vor allem hinsichtlich der konventionellen Betriebssicherheit, d. h. der einzusetzenden Verfahrens- und Bautechnik beim Verfüllen und Verschiessen von Schächten, Tunneln und Lagerkammern und dem allfälligen lokalen Rauben des gebirgssichernden Ausbaus im Bereich von Versiegelungen.

2.7.3 Anforderungen an die bauliche Umsetzung

Die bauliche Umsetzung soll die Anforderungen aus der Langzeitsicherheit, der Betriebssicherheit, dem Strahlenschutz sowie die umweltrechtlichen Vorschriften erfüllen und mit verhältnismässigem Aufwand erfolgen.

Mit geeigneten Anforderungen an die bauliche Umsetzung soll daher sichergestellt werden, dass die Verschlusskomponenten aus ingenieurtechnischer und wissenschaftlicher Sicht, in der für die Erfüllung der Funktion erforderlichen Qualität erstellt werden. Dabei spielen auch die geomechanischen Randbedingungen eine wichtige Rolle.

Eine Auflistung der Anforderungen befindet sich im Anhang B.

3 Verschluss eines geologischen Tiefenlagers

Dieses Kapitel beschreibt die Anordnung der Verschlussbauwerke in der Lagerarchitektur (Abschnitt 2.5). Dies erfolgt im Kontext des Mehrfachbarrierensystems (Abschnitt 2.2). Dabei wird ein Bezug zu den Sicherheitsfunktionen gemäss Abschnitt 2.7.1 hergestellt und die Aufgaben der einzelnen Systemkomponenten erklärt. Alle folgenden Angaben sind als exemplarische Umsetzungsvorschläge zu verstehen, die basierend auf abdeckenden Planungsannahmen zeigen, wie ein Verschluss umgesetzt werden könnte.

Das Konzept im hier vorliegenden Bericht sieht für Planungszwecke fünf Typen von Versiegelungen und fünf Arten von Verfüllungen vor (siehe Fig. 3-1):

- **Versiegelungen V1-HAA und V1-SMA (Lagerkammer)**, welche sich als Abschluss innerhalb der HAA-Lagerstollen bzw. unmittelbar vor den SMA-Lagerkavernen befinden. Sie werden unmittelbar nach Einlagerung der Abfälle und vollständiger Verfüllung der Lagerkammern errichtet.
- **Versiegelungen V2-HAA und V2-SMA (Lagerfeldzugänge)**, welche sich am Beginn der Lagerfeldzugänge des HAA-Lagerteils (im Bau, Betriebs- und Lüftungstunnel) bzw. des SMA-Lagerteils (im Lüftungs- und Betriebstunnel) befinden.
- **V3-Versiegelungen (Zugangsbauwerke)**, welche sich in den Zugangsbauwerken (Schächten) bis zur Obergrenze des Wirtgesteins Opalinuston befinden. V3-Versiegelungen sind die letzten Versiegelungen mit langzeitsicherheitsrelevanten Funktionen.
- **Die Verfüllungen von HAA-Lagerstollen** sind nicht Teil des Verschlusses, sondern Teil der Nahfeldbarriere. Sie bestehen aus Bentonit.
- **Die Verfüllungen von SMA-Lagerkavernen** sind ebenfalls nicht Teil des Verschlusses, sondern ebenfalls Teil der Nahfeldbarriere. Sie bestehen aus einem permeablen Verfüllmörtel, dem sogenannten M1-Mörtel.
- **Die VF1- und VF2-Verfüllungen der untertägigen Bauwerke** dienen der Verfüllung der Resthohlräume und bestehen z. B. aus aufbereitetem Opalinuston oder Sand-Bentonit-Gemischen.
- **Die Verfüllungen der Zugangsbauwerke (Schachtverfüllungen)** befinden sich oberhalb der V3-Versiegelungen und werden durch einen Schachtabschluss an der Geländeoberkante abgeschlossen. Diese Verfüllung besteht aus einem Mineralgemisch aus tonreichen Materialien (z. B. aufbereiteter Opalinuston) mit Sand und Kies.

Daneben verhindern Schachtabschlüsse (Schachtköpfe), welche als Abschluss an der Erdoberfläche positioniert sind, zusammen mit den Schachtverfüllungen Setzungen oder Tagbrüche an der Erdoberfläche in unmittelbarer Umgebung der Schachtköpfe.

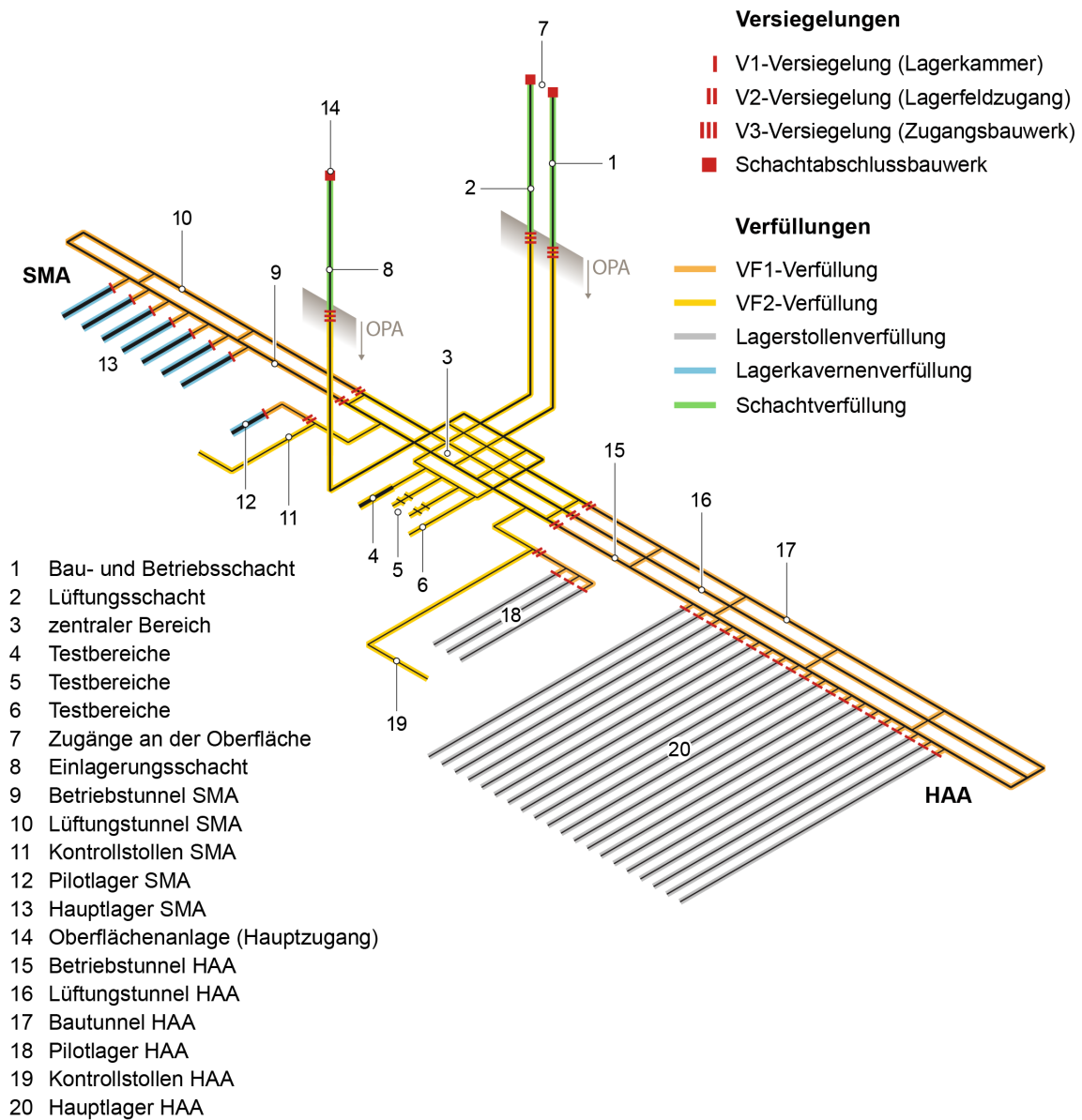


Fig. 3-1: Lage der Verschlussbauwerke in der Lagerarchitektur⁵
(aus Abschnitt 2.5)

⁵ Alte Terminologie «Zugangsschacht» durch Einlagerungsschacht ersetzt.

3.1 Aufgaben und Sicherheitsfunktionen der Versiegelungen

Im Folgenden werden die Aufgaben der Versiegelungen anhand der im Abschnitt 2.7.1 gezeigten Sicherheitsfunktionen konkretisiert und diskutiert.

Neben den nachfolgend aufgeführten Aufgaben bewirken alle Versiegelungen eine mechanische Stabilisierung innerhalb der Versiegelungsbauwerke selbst und verhindern somit Konvergenzen, welche zu einer Beeinträchtigung der geologischen Barriere führen können (Beitrag zur Sicherheitsfunktion S4).

3.1.1 V1-Versiegelungen

Die V1-Versiegelungen (Fig. 3-1) werden in jedem Zugang zu einem HAA-Lagerstollen und zu einer SMA-Lagerkaverne errichtet. Dies gilt sowohl für das Hauptlager als auch für das Pilotlager. Die V1-Versiegelungen trennen die jeweilige Lagerkammer vom Betriebstunnel ab. Die Errichtung erfolgt unmittelbar nach der vollständigen Einlagerung und Verfüllung der zugehörigen Lagerkammer. So stellt die V1-Versiegelung schon während des Einlagerungsbetriebs des geologischen Tiefenlagers die passive Sicherheit her. Darüber hinaus nutzt sie dem Strahlenschutz, da sie die Zugänglichkeit zu bereits beschickten und verfüllten Lagerkammern verhindert und – neben der Lagerkammerverrückung – eine zusätzliche Barriere zwischen dem tätigen Personal und den eingelagerten Abfällen darstellt.

Bezüglich der Langzeitsicherheit nehmen die V1-Versiegelungen folgende Aufgaben wahr:

- Kompartimentalisierung (d. h. räumliche Trennung der radioaktiven Abfälle in den verschiedenen Lagerkammern)
- Limitierung des Wasserflusses entlang der untertägigen Zugänge aufgrund geringer Durchlässigkeit:
 - Verhinderung eines dominanten Transportpfades von Radionukliden entlang untertägiger Zugänge (Beitrag zur Sicherheitsfunktion S3)
 - Verhinderung einer schnellen Aufsättigung der Lagerkammern über die untertägigen Zugänge und dadurch Begrenzung von Prozessen wie Gasbildung, Radionuklidfreisetzung etc. (Beitrag zur Sicherheitsfunktion S4)
- Beitrag zur Beherrschung von ungünstigen Gasdrücken (insbesondere im SMA-Lager) und somit Beitrag zur Sicherheitsfunktion S4:
 - Die V1-Versiegelung wird so gebaut, dass keine ungünstigen Gasdrücke in den Lagerstollen und/oder -kavernen (resp. Pilotstollen/-kavernen) entstehen, die zu irreversiblen Schäden der geologischen (oder technischen) Barrieren führen könnten.
- Durch eine geeignete Materialisierung kann die V1-Versiegelung zusätzlich zur Rückhaltung von Radionukliden (Sicherheitsfunktion S3) auf dem Transportpfad entlang der untertägigen Zugänge beitragen (z. B. durch die Sorptionskapazität des Bentonits im Dichtelement).

3.1.2 V2-Versiegelungen

Die V2-Versiegelungen (Fig. 3-1) in den Lagerfeldzugängen bzw. Pilotlagerzugängen trennen die Lagerfelder bzw. die Pilotlager vom übrigen Tiefenlager, d. h. dem zentralen Bereich und allen Infrastruktureinrichtungen. Ihre Errichtung findet unmittelbar nach der vollständigen Verfüllung der zugehörigen Lagerfeldzugänge, resp. der Zugänge der Pilotlager, statt. Die V2-Versiegelungen wirken somit bereits während der Beobachtungsphase und noch vor dem endgültigen Verschluss des geologischen Tiefenlagers. Ihr Herstellungszeitpunkt ist ein wesentlicher Meilenstein beim sukzessiven Verschluss des geologischen Tiefenlagers.

Bezüglich der Langzeitsicherheit nehmen die V2-Versiegelungen folgende Aufgaben wahr:

- Kompartimentalisierung:
 - als eine weitere räumliche Trennung der radioaktiven Abfälle zusätzlich zu den V1-Versiegelungen
- Limitierung des Wasserflusses entlang der untertägigen Zugangsbauwerke aufgrund geringer Durchlässigkeit:
 - Unterstützung, mit gewissen Redundanzen zu den V1-Versiegelungen (siehe oben), hinsichtlich einer Begrenzung des Austrags von Radionukliden entlang untertägiger Zugänge (Beitrag zur Sicherheitsfunktion S3)
 - Unterstützung, mit gewissen Redundanzen zu den V3-Versiegelungen (siehe unten), hinsichtlich der Limitierung des Wasserzuflusses entlang der Bau- und Betriebstunnel (Beitrag zur Sicherheitsfunktion S4)
- Beitrag zur Beherrschung von ungünstigen Gasdrücken (insbesondere im SMA-Lager) und somit Beitrag zur Sicherheitsfunktion S4:
 - Die V2-Versiegelung wird so gebaut, dass keine ungünstigen Gasdrücke in den Lagerfeldzugängen (resp. den Zugängen zum Pilotlager) entstehen, die zu irreversiblen Schäden der geologischen (oder technischen) Barrieren führen.
- Durch eine geeignete Materialisierung können die V2-Versiegelungen zusätzlich zur Rückhaltung von Radionukliden (Sicherheitsfunktion S3) auf dem Transportpfad entlang der untertägigen Zugänge beitragen (z. B. aufgrund der Sorptionskapazität des Bentonits im Dichtelement).

3.1.3 V3-Versiegelungen

Die V3-Versiegelungen (Fig. 3-1) verschliessen das geologische Tiefenlager nach aussen und schützen es vor äusseren Einwirkungen. Sie werden daher in allen Zugangsbauwerken bis zur Oberkante des Opalinustons errichtet. Ihre Errichtung in einem der drei Zugänge erfolgt mit dem Verschluss des Hauptlagers unmittelbar nach dem Bau der V2-Versiegelungen. In den übrigen zwei Zugängen erfolgt die Errichtung mit dem Gesamtverschluss, also nach Abschluss der Beobachtungsphase. Damit ist der Verschluss des geologischen Tiefenlagers praktisch abgeschlossen.

Bezüglich der Langzeitsicherheit nehmen die V3-Versiegelungen folgende Aufgaben wahr:

- hydraulische Trennung des geologischen Tiefenlagers und des umgebenden Wirtgesteins von wasserführenden Schichten des Deckgebirges bzw. der oberen Rahmengesteine sowie Beitrag zur Isolation der Abfälle von der Oberfläche (Beitrag zur Sicherheitsfunktion S1)

- Limitierung des Wasserflusses entlang der untertägigen Zugangsbauwerke aufgrund der geringen Durchlässigkeit:
 - Limitierung des Wasserflusses entlang der untertägigen Zugangsbauwerke zum Lagerfeld und somit Beitrag zur Sicherheitsfunktion S4
 - Unterstützung der V1- und V2-Versiegelungen hinsichtlich einer Begrenzung des Austrags von Radionukliden entlang untertägiger Zugänge (Beitrag zur Sicherheitsfunktion S3)

3.2 Aufgaben und Sicherheitsfunktionen der Verfüllungen

Analog zum vorangehenden Kapitel werden anhand der im Abschnitt 2.7.1 gezeigten Anforderungen die Sicherheitsfunktionen für die Verfüllungen konkretisiert und diskutiert. Dabei realisieren die VF1-Verfüllungen (Fig. 3-1) die vollständige Resthohlraumverfüllung der Lagerfeldzugänge (inkl. Zugänge zu den Pilotlagern). Sie befinden sich zwischen den V1- und V2-Versiegelungen. Die VF2-Verfüllungen (Fig. 3-1) dienen hingegen der vollständigen Verfüllung der Bauwerke auf Lagerebene, also insbesondere des zentralen Bereichs, der Testbereiche, Teile der übrigen Lagerfeldzugänge (bis zu den V2-Versiegelungen) und der Kontrollstollen (HAA und SMA). Sie befinden sich somit zwischen den V2- und V3-Versiegelungen.

Auf die Verfüllungen der HAA-Lagerstollen resp. SMA-Lagerkavernen wird hier nicht weiter eingegangen, da sie nicht Teil des Verschlusses, sondern der Nahfeldbarriere darstellen. Die Schachtverfüllungen oberhalb der V3-Versiegelungen besitzen keine direkten langzeitsicherheitsrelevanten Funktionen, da sie sich ausserhalb dem Wirtgestein befinden und werden daher im Rahmen dieses Abschnitts ebenfalls nicht behandelt.

3.2.1 Verfüllungen der Bauwerke auf Lagerebene (VF1 und VF2)

Die VF1- und VF2-Verfüllungen bestehen, gemäss des heutigen Planungsstandes, aus sandhaltigen Baustoffen, die mit Ton angereichert werden können. Als Materialisierungsbeispiele hierzu zählen: Sand-Bentonit-Gemische oder aufbereiteter Opalinuston (ebenfalls mit Sand vermischt). Beim Zutritt von Wasser beginnen diese Baustoffe aufgrund ihres Tonanteils zu quellen. Dadurch verändert sich der Porenraum so, dass eine Gaspermeabilität bei gleichzeitig geringer hydraulischer Leitfähigkeit erhalten bleibt. Auch Sand-Kies Mischungen ohne Ton sind denkbar.

Teilvolumina der Verfüllungen werden eingebracht, sobald der Betrieb des geologischen Tiefenlagers entsprechende Hohlräume nicht mehr benötigt. Dies ist nach Abschluss der Einlagerung für die jeweiligen Lagerfeldzugänge (resp. für die Zugänge der Pilotlager) der Fall wo die VF1-Verfüllung eingebracht wird, bevor die V2-Versiegelungen errichtet werden. Die VF2-Verfüllung wird hingegen abschnittsweise eingebracht und kann erst mit Abschluss der Beobachtungsphase, wenn auch die Kontrollstollen, die Testbereiche und deren Zugänge verfüllt worden sind, vollständig eingebracht werden. Die Massnahme der vorzeitigen Verfüllung nicht mehr notwendiger Bereiche unterstützt die Betriebssicherheit, indem die untertägigen Bauwerke in einen langfristigen passiven Zustand überführt werden und daher die Notwendigkeit eines regelmässigen Unterhalts entfällt.

Aus felsmechanischer Sicht dienen die eingebrachten Verfüllungen als langfristige Gebirgsstützung, weil sie grossräumige Konvergenzen und dadurch auch die Vergrösserung der Auflockerungszone verhindern. Die Wirkung wird mit der Aufsättigung durch den Aufbau eines Quelldrucks verstärkt.

Bezüglich der Langzeitsicherheit nehmen die Verfüllungen VF1 und VF2 folgende Aufgaben wahr:

- Gewährleistung einer mechanischen Stabilisierung der untertägigen Zugangsbauwerke durch vollständige Verfüllung:
 - verhindern von Konvergenz und somit verhindern von Schädigung der geologischen Barriere (Beitrag zur Sicherheitsfunktion S4)
- Bereitstellung von genügend Gasspeichervolumen (v.a. SMA-Lagerteil) durch ausreichende Porosität des Verfüllmaterials⁶:
 - zur Beschränkung eines ungünstigen Gasdruckaufbaus, der sich nach dem Zutritt von Gebirgswasser⁷ infolge anaerober Metallkorrosion und mikrobieller Degradation von Organika bildet (Beitrag zur Sicherheitsfunktion S4)
 - als Speichervolumen für volatile Radionuklide (z. B.: ¹⁴C) und somit Beitrag zur Sicherheitsfunktion S3
- zusätzliche, untergeordnete Aufgaben bzw. weitere erwünschte Wirksamkeiten⁸:
 - Unterstützung bei der Limitierung des Wasserflusses entlang der untertägigen Zugangsbauwerke zum Lagerfeld (Beitrag zur Sicherheitsfunktion S4)
 - Unterstützung hinsichtlich einer Begrenzung des Austrags von gelösten Radionukliden entlang untertägiger Zugänge (Beitrag zur Sicherheitsfunktion S3)

3.3 Zeitlicher Ablauf des Verschlusses und mögliche Varianten

Die Planung des zeitlichen Ablaufs des Verschlusses muss sich in den Realisierungsplan des geologischen Tiefenlagers (Fig. 3-2) einfügen und den Anforderungen der Langzeitsicherheit, der Betriebssicherheit und des Strahlenschutzes Rechnung tragen (Abschnitt 2.7). Weiterhin ist nach KEG (KEG 2003) eine Beobachtungsphase zwischen Einlagerungsende und Verschluss vorzusehen. Im Hinblick auf eine mögliche Rückholung ist der Aufwand zur Entfernung gegebenenfalls frühzeitig eingebauter Verschlussbauwerke, wie sie in diesem Bericht vorgestellt werden, im Verhältnis zum Gesamtaufwand für eine Rückholung als sehr klein zu bewerten. Die Vorgabe der ENSI-G03 (ENSI 2020b) zur Sicherstellung einer Rückholung ohne grösseren Aufwand kann, unabhängig vom Einbauzeitpunkt der Verschlussbauwerke, als gegeben beurteilt werden.

Für die Langzeitsicherheit ist es erstrebenswert, zeitnah eine passive Sicherheit herzustellen, d. h. Verfüllungen einzubringen und Versiegelungsbauwerke zu errichten. Für den Strahlenschutz und die Betriebssicherheit ist dies, wie gezeigt, ebenfalls vorteilhaft. Dem wird mit dem vorgesehenen und von dem in Art. 7.3a ENSI-G03 (ENSI 2020b) vorgeschriebenen Einbau der V1-Versiegelungen unmittelbar nach Einlagerungsende Rechnung getragen (Abschnitt 2.7.2). Dieses Vorgehen setzt auch die Anforderung des Verschlusses innert Jahren (Art. 11 Ziff. 2. Bst. d KEV) und des «temporären Verschluss» nach ENSI-G03 Art. 7.5 um, indem systematisch alle nicht mehr notwendigen untertägigen Bauteile verfüllt werden und den Umfang des Restaufwandes damit eingrenzt.

⁶ Speichervolumen wird erhöht bei Verzicht von Tonmaterialien.

⁷ Bei Gebirgswasser handelt es sich um Wasserlösungen mit einer Mineralfracht.

⁸ Insbesondere bei Verfüllungen auf Tonbasis.

Flexibilität in der Ablaufplanung des Verschlusses besteht also nur hinsichtlich der Zeitpunkte für die Einbringung der Verfüllungen VF1 und VF2, der Errichtung der V2- und V3-Versiegelungen sowie der Verfüllung der drei Schächte. Weiterhin ist es sinnvoll, die Einbringung der Verfüllung und die Errichtung der Versiegelungen nur in Kombination zu betrachten. Für die Entwicklung von Varianten der Ablaufplanung ist zunächst der Realisierungsplan als Randbedingung näher zu betrachten.

3.3.1 Zeitlicher Ablauf des Verschlusses gemäss Realisierungsplan

Fig. 3-2 zeigt den Realisierungsplan eines Kombilagers gemäss EP21 (Nagra 2021a). Im EP21 findet sich eine detaillierte Beschreibung aller Realisierungsphasen. Im hier vorliegenden Bericht wird nur auf die für den Verschluss massgeblichen Phasen eingegangen: den Einlagerungsbetrieb SMA und HAA (4/6 in Fig. 3-2), die Beobachtungsphase (7), den Verschluss des Hauptlagers (8) und den Verschluss des Gesamtlagers (9).

Phasen	2035	2050	2060	2130	Dauer [a]	
Bau (1) & Betrieb (2) Zentraler Bereich und Testbereiche	1	2			5 & 15	
Bau (3) & Einlagerungsbetrieb (4) Lager SMA		3	4		5 & 15	
Bau (5) & Einlagerungsbetrieb (6) Lager HAA			5	6	5 & 15	
Beobachtungsphase SMA / HAA (7)				7	50 / 50	
Verschluss Hauptlager (8) / Gesamtlager (9)				8	9	6 / 2

Fig. 3-2: Realisierungsplan für das geologische Tiefenlager

Nach Nagra (2021a)

Nur für diesen Bericht relevante Phasen wurden übernommen und durchnummeriert⁹.

Unmittelbar nach Abschluss des SMA-Einlagerungsbetriebs (4) werden direkt vor den SMA-Lagerkavernen bzw. beim HAA-Einlagerungsbetrieb (6) im Anfangsbereich der HAA-Lagerstollen die V1-Versiegelungen errichtet. Nach Versiegelung der SMA-Lagerkavernen beginnt die Beobachtungsphase (7). Ca. 10 Jahre später sind auch die HAA-Stollen versiegelt und die Beobachtungsphase beginnt auch dort. Schon vor Beginn der Beobachtungsphase beginnt die Überwachung des Pilotlagers, um Informationen zum Verhalten des Mehrfachbarrierensystems während der frühen Entwicklung nach der Einlagerung bereitzustellen (Nagra 2021c). Ausserdem wird eine Überwachung der Umwelt und des geologischen Umfelds von der Oberfläche (Fanger et al. 2021), der noch offenen Untertagbauten und Zugänge (Nagra 2021b), sowie der Betriebssicherheit durchgeführt. Alle Überwachungs- und Beobachtungsdaten zusammen liefern Input für periodische Aktualisierungen des Sicherheitsnachweises, für den Stakeholder-Dialog, für die Vertrauensbildung und für die Entscheidungsfindung zum Verschluss. Für Planungszwecke wird gemäss Art. 3 SEFV von einer Beobachtungsphase von 50 Jahren nach Abschluss des HAA-Einlagerungsbetriebs ausgegangen. Diese Dauer kann angepasst werden, sollte sich die Notwendigkeit oder der Bedarf ergeben.

Nach einer gewissen Beobachtungsdauer (Teil 1) – im in Fig. 3-2 dargestellten Realisierungsplan des Kombilagers 10 Jahre nach Einlagerungsende HAA – werden die Zugänge zu den Lagerfeldern zu den Haupt- und Pilotlagern SMA und HAA auf Lagerebene verfüllt und verschlossen

⁹ «Testbereiche» ersetzen im RBG «EUU» (Erdwissenschaftliche Untersuchungen Untertag)

(Verschluss Hauptlager, (8)). Dazu werden die VF1-Verfüllungen eingebracht und die V2-Versiegelungen (vgl. Fig. 3-1) gebaut. Zudem wird zu diesem Zeitpunkt ein Zugang nach Untertag (z. B. der Einlagerungsschacht) mit der V3-Versiegelung im Wirtgestein versiegelt, bis an die Oberfläche verfüllt, und verschlossen.

Auch nach Verschluss der Haupt- und Pilotlager bleibt der Zugang zu den Testbereichen sowie den Kontrollstollen HAA und SMA der Pilotlager (Fig. 3-1) über die verbleibenden Zugänge (z. B. Bau- und Betriebs- bzw. Lüftungsschacht) offen. Die Beobachtung wird bis zum Verschluss des Gesamtlagers (9) fortgesetzt.

Nach Ablauf der Beobachtungsphase ordnet der Bundesrat den Verschluss des Gesamtlagers an, wenn der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet ist (Art. 39 Abs. 2 KEG). Dies umfasst den Verschluss der bis dahin noch bestehenden Testbereiche und der Kontrollstollen der Pilotlager und aller anderen offenen Untertagbauten inklusive der noch offenen Zugänge. Nach ordnungsgemäsem Verschluss befindet sich das geologische Tiefenlager in der Nachverschlussphase. Auch in dieser Phase kann die Überwachung bei Bedarf von der Oberfläche aus weitergeführt werden (Umweltüberwachung). Eine allfällige befristete Überwachung, die durch den Bundesrat nach Verschluss verfügt werden kann, würde nur noch im Rahmen der Überwachung der Umwelt und des geologischen Umfelds von der Oberfläche (Fanger et al. 2021) durchgeführt werden; dies bis zur Entlassung des verschlossenen Tiefenlagers aus der Kernenergiegesetzgebung (Art. 39 Abs. 4 KEG).

3.3.2 Mögliche Varianten des zeitlichen Ablaufs

Ausgehend vom Ablauf gemäss Kap. 3.3.1, kann lediglich eine weitere Variante mit Durchführung derselben Massnahmen zu einem früheren oder späteren Zeitpunkt betrachtet werden, d. h. einer alternativen Beobachtungsdauer. Die beiden Varianten werden in Tab. 3-1 zusammengefasst.

Tab. 3-1: Übersicht der beiden Verschlussvarianten gemäss heutigem Planungsstand

Variante 1: Ablauf gemäss Kap. 3.3.1	Einbringung der Verfüllungen und Versiegelungen VF1 und V2 sowie VF2 und V3 für den Einlagerungsschacht 10 Jahre nach Abschluss des Einlagerungsbetriebs HAA
Variante 2: Alternativer Ablauf	Einbringung der Verfüllungen und Versiegelungen VF1 und V2 sowie VF2 und V3 für den Einlagerungsschacht mit einer alternativen Dauer der Beobachtungsphase nach Abschluss des Einlagerungsbetriebs HAA

Als Untervariante kann z. B. der frühzeitige Verschluss des Bau- und Betriebsschachts statt des Einlagerungsschachts betrachtet werden. Dies hat jedoch keinen Einfluss auf den Vergleich der Varianten.

Der Vergleich der beiden gezeigten Varianten zur Vorgehensweise erfolgt anhand der Abwägung der Gewichtung der Forderung der Langzeitsicherheit nach schneller Herstellung passiver Sicherheit gegenüber den Ansprüchen der Beobachtung, die natürlich Interesse an einem langen Beobachtungszeitraum hat, um besser abgesicherte Ergebnisse zu erzielen. Der Strahlenschutz ist in beiden Varianten als gegeben zu betrachten, da die V1-Versiegelungen das nukleare Inventar abschliessen. Auch die Betriebssicherheit differenziert hier nur untergeordnet, indem ein regulärer Unterhalt der nicht verfüllten Untertagbauten, die notwendigerweise für die Beobachtung offen zu halten sind, zur Betriebssicherheit beiträgt.

Die Nagra legt der Planung, wie im Abschnitt 3.3.1. dargestellt, die Variante 1 zugrunde, da sie sich damit einen zusätzlichen Zugewinn an Beobachtungsdaten erhofft, ohne die Langzeitsicherheit negativ zu beeinflussen. Diese Vorgehensweise wurde bereits im vom Bundesrat 2018 genehmigten Entsorgungsprogramm 2016 dargelegt. Aus heutiger Sicht stellt diese Vorgehensweise einen guten Kompromiss der gegenläufigen Interessen dar, indem in 10 Jahren genügend Daten gesammelt und bewertet werden können, um eine fundierte Entscheidung für den Verschluss des Hauptlagers zu treffen. Sollten die Beobachtungen diese Entscheidung nicht stützen, ist eine weitere Offenhaltung möglich.

Im Hinblick auf den Betrieb und eine zu diesem Zeitpunkt noch unwahrscheinliche Rückholung müssen zwei Schächte offengehalten werden. Da bei einer Verfüllung des Einlagerungsschachts auch die Oberflächenanlage rückgebaut werden kann, ergäbe sich damit für diese Untervariante ein Vorteil, sofern die Nebenzugangsanlagen für Lüftung und Betrieb auf einem Betriebsgelände zusammengefasst erstellt werden. Daher sieht die Nagra auch den vorzeitigen Verschluss¹⁰ des Einlagerungsschachts vor.

¹⁰ Dies bedeutet mit dem Verschluss des Hauptlagers: Punkt (8) in Fig. 3-2.

4 Versiegelungsbauwerke

Bei den Versiegelungsbauwerken handelt es sich um technische Bauwerke in Form von Tunnel- und Schachtverschlüssen. Gemeinsam mit weiteren Elementen des Mehrfachbarrierensystems (Abschnitt 2.2), wie beispielsweise den Endlagerbehältern und dem Wirtgestein, gewährleisten sie den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle.

Die Versiegelungen V1-HAA, V2-HAA, V1-SMA, V2-SMA sowie V3 erfüllen unterschiedliche Funktionen und Aufgaben im Verschlusssystem. Basierend auf Abschnitt 3.1 kann die Funktionsweise der Versiegelungsbauwerke wie folgt zusammengefasst werden:

Die Versiegelungsbauwerke mit Dichtelementen auf Bentonitbasis hindern portalseitig anstehendes Wasser daran, über die untertägigen Zugänge in Richtung der Lagerkammern der Lager (HAA-Lagerstollen und SMA-Lagerkavernen) zu fließen. Als Konsequenz sättigt sich das geologische Tiefenlager aller Voraussicht nach nur sehr langsam und hauptsächlich aus dem intakten Wirtgestein auf. Durch die Limitierung des Wasserflusses mit den Dichtelementen der Versiegelungen wird das Ziel der Verhinderung der Bildung eines dominanten Transportpfads entlang untertägiger Zugänge erreicht. Zudem werden Prozesse, wie z. B. Gasbildung und Radionuklidfreisetzung, begrenzt. Gleichzeitig ermöglicht die Verwendung eines Baustoffs auf Basis von Bentonit durch dessen Sorptionskapazität (unabhängig von der konkreten Ausführung) eine zusätzliche Radionuklidrückhaltung.

Aus den Vorüberlegungen in Kapitel 2 und 3 lassen sich Auslegungsgrundsätze für die Versiegelungsbauwerke ableiten und festlegen. Anschliessend wird ein prinzipieller Aufbau der Versiegelungsbauwerke dargestellt (Abschnitt 4.1). In den jeweiligen Unterkapiteln zu den einzelnen Versiegelungsbauwerken sind exemplarische Umsetzungen dargestellt (Abschnitt 4.2 und 4.3), die auf Planungsannahmen beruhen.

4.1 Auslegungsgrundsätze

Folgende Auslegungsgrundsätze können, basierend auf den diskutierten Anforderungen der Versiegelungen zur Gewährleistung der Sicherheitsfunktionen (Abschnitt 3.1), abgeleitet werden:

Langzeitsicherheit

1. Keine Schädigung des Wirtgesteins

Durch einen ausreichenden form- und kraftschlüssigen¹¹ Kontakt zwischen dem Dichtelement und dem Wirtgestein werden Instabilitäten bzw. Konvergenzen und folglich eine Schädigung der geologischen Barriere weitestgehend verhindert. Durch die Herstellung einer möglichst hohen und homogenen Einbaudichte im Gesamtquerschnitt des Dichtelements wird angestrebt, diesem Ziel nahe zu kommen.

¹¹ Kraftschlüssiger Kontakt wird durch den Quellvorgang erhöht.

2. *Ein bedeutender Radionuklidtransport entlang der Tunnel und Zugangsbauwerke ist zu unterbinden.*

Gute Sorptionseigenschaften und niedrige Durchlässigkeiten des Opalinustons führen zu langen charakteristischen Transportzeiten für den Radionuklidtransport durch das Wirtsgestein. Wenn keine alternativen Transportpfade existieren, führt dies zu einer äusserst langsamen Radionuklidfreisetzung. Ziel ist es deshalb, Wasserströmungen in und aus dem geologischen Tiefenlager entlang der Zugänge zu minimieren, um so auch den Transport von Radionukliden entlang der Tiefenlagerzugänge weitestgehend zu unterbinden.

3. *Der Zutritt von Wasser in die Lagerstollen und -kavernen soll möglichst über das intakte Wirtsgestein erfolgen und nur so gering wie möglich über die untertägigen Zugänge.*

Der Wassereintritt durch die untertägigen Zugänge in die Lagerstollen und -kavernen ist so lange wie möglich zu verzögern, um die Radionuklidrückhaltung zu unterstützen (siehe Punkt 2) und das Potenzial von chemischen Reaktionen zu reduzieren (z. B. Verzögerung von Korrosionsprozessen). Das Bemessungsziel der Versiegelungsbauwerke ist es daher, den Wasserfluss entlang der Zugänge zu den Lagerkammern zu minimieren.

4. *Der Gasfluss – wenn auch nur bedingt –, insbesondere entlang eines SMA-Versiegelungsbauwerks, muss gewährleistet werden.*

Der Gasfluss durch den Porenraum eines Dichtelements aus Bentonit im gequollenen (gesättigtem) Zustand ist äusserst gering.¹² Um eine gewisse Gasdurchlässigkeit auch im gequollenen Zustand für die SMA-relevanten Versiegelungsbauwerke aufrechterhalten zu können, wird eine Sand-Bentonit-Mischung (80:20) verwendet. Versuche zeigen, dass sich in diesem Fall die Permeabilitäten für Flüssigkeiten und Gas um bis zu sechs Grössenordnungen unterscheiden können (Spillmann et al. 2015). Die speziellen Eigenschaften des Bentonitbaustoffs der HAA- und SMA-Versiegelungen werden später im Abschnitt 4.2 diskutiert.

5. *Alle Versiegelungen sollen einen Beitrag zur Sicherheit des Tiefenlagers leisten*

Alle Massnahmen – insbesondere auch der Bau von Versiegelungsbauwerken als massgebliche technische Barrieren – haben das übergeordnete Ziel, ein insgesamt ausgeglichenes Sicherheitsniveau herzustellen und als redundantes Mehrfachbarrierensystem zusammenzuwirken.

Sowohl der Zutritt von Wasser in ein Tiefenlager als auch der Radionuklidaustrag sollen durch das System aus geologischen Barrieren und Verschlussbauwerken verzögert und reduziert werden. Dabei sind alle Barrieren aufeinander abzustimmen und die Prinzipien von Redundanz und Diversität, soweit möglich und sinnvoll, ortsspezifisch umzusetzen. Für die Versiegelungsbauwerke bedeutet dies im Hinblick auf ihre Dichtigkeit und Rückhaltungswirkung:

- Im Sinne einer bestmöglichen Redundanz sind – hinsichtlich der abdichtenden Wirkung – V1-, V2- und V3-Versiegelungsbauwerke mit ähnlichen Beiträgen zu bevorzugen.
- Die Auslegung der Versiegelungen berücksichtigt die an ihrem Einbauort zu erwartenden Einwirkungen.

Durch die Reihenschaltung von ähnlich wirksamen Versiegelungen werden robuste Redundanzen im Verschlussystem erreicht.

¹² Intrinsische Permeabilität von bis zu 10^{-19} m².

6. *Ein schneller Rückzug aus dem geologischen Tiefenlager, im Falle der Anordnung eines temporären Verschlusses, soll möglich sein.*

Ein schneller Rückzug aus dem geologischen Tiefenlager während der Betriebsphase soll berücksichtigt werden und bei ausreichendem Sicherheitsniveau möglich sein. Das Auslegungsprinzip stammt aus der gesetzlichen (Art. 11 KEV 2004) und regulatorischen Forderung (ENSI 2020a) des temporären Verschlusses (Abschnitt 2.1.2).

Hieraus leitet sich die Konsequenz ab, dass die V1-Versiegelungsbauwerke derart beschaffen sein müssen (Funktionstüchtigkeit), dass sie die Sicherheit auch ohne die Unterstützung der weiteren V2- und V3-Versiegelungsbauwerke – wenn auch (temporär) eingeschränkt – gewährleisten. Dieser Auslegungsgrundsatz stützt die These, auf eine Hierarchisierung bzw. auf ein Gefälle von V3 zu V1 bei den Versiegelungsbauwerken zu verzichten (siehe Punkt 5) und steht im Einklang mit den regulatorischen Vorgaben eines temporären Verschlusses in seiner Umsetzung. Der temporäre Verschluss wird im Kapitel 7 behandelt.

Baustoffauswahl

7. *Versiegelungsbauwerke werden auf Basis von Bentonitbaustoff errichtet.*

Bentonit stellt ein arteigenes Material zum Wirtgestein Opalinuston dar. Denkbar sind Ausführungen in Form von Granulat, Pellets, Formsteinen, Bentonitmehl oder Mischungen der genannten Ausführungen mit vorgegebenen Körnungslinien. Bei Kontakt mit Wasser quillt Bentonit und wird dadurch nahezu wasser- und gasundurchlässig.¹³ Zur Beibehaltung einer gegebenenfalls notwendigen Gasdurchlässigkeit nach der Aufsättigung wird Bentonit mit Sand (z. B. 20:80) vermischt (siehe Punkt 4). Dichtelemente des Versiegelungsbauwerks auf Basis von Bentonit haben daher bei Zutritt von Wasser einen selbstabdichtenden Charakter. Zusätzlich besitzt Bentonit, wie das Wirtgestein, sorbierende Eigenschaften, was dafür sorgt, dass sich hinsichtlich vieler Radionuklide ein allfälliger Transport verzögert. Die Langzeitbeständigkeit des Bentonits im Dichtelement sorgt somit für eine dauerhafte Dichtwirkung gegen anstehendes Wasser in Richtung der Lagerkammern einerseits und entgegen einem Austrag von Radionukliden aus den Lagerkammern andererseits.

8. *Zementbasierte Baustoffe sollen im Umfeld des abdichtenden Bentonits nur eingesetzt werden, wenn bautechnische Alternativen fehlen.*

Der Einsatz von zementbasierten Baustoffen (Beton, Mörtel) ist in Nahbereichen von Dichtelementen eines Versiegelungsbauwerks, wo möglich, zu begrenzen. Die langfristige Interaktion von Wasser mit zementbasierten Baustoffen kann zu einer negativen Veränderung der Wasserchemie und Toneigenschaften führen (Nagra 2021a).

¹³ Gasundurchlässigkeit zählt nicht für Sand-Bentonit-Mischungen (80:20). Die Bewahrung einer geringen Gasdurchlässigkeit wird durch die Beimischung von Sand angestrebt. Siehe dazu Punkt 4.

Aufbau des Versiegelungsbauwerks

Zur Veranschaulichung stellt Fig. 4-1 den prinzipiellen, generischen Aufbau der Versiegelungsbauwerke dar.

9. *Tragende und dichtende Funktionen werden bei den Versiegelungsbauwerken getrennt.*

Bentonit besitzt im initialen, ungequollenen Zustand keine ausreichende Festigkeit und Steifigkeit, um als tragender Baustoff eines Versiegelungsbauwerks zu wirken oder einen Quelldruck ohne Unterstützung aufzubauen. Daher ist es notwendig, die tragende Wirkung (Standicherheit) und die dichtende Wirkung (Funktionstüchtigkeit) auf verschiedene Elemente des Versiegelungsbauwerks aufzuteilen:

(a) *Versiegelungsbauwerk in Längsrichtung (axial)*

In axialer Richtung besteht ein Versiegelungsbauwerk aus drei unterschiedlichen Arten von Elementen beziehungsweise Bauteilen:

- Dichtelement(en) zwecks Funktionstüchtigkeit
- Widerlager zwecks Standicherheit des Dichtelements aufgrund des aufbauenden Quelldrucks (Einspannung)¹⁴
- Übergangsschicht(en) zwecks konstruktiver Durchbildung

(b) *Versiegelungsbauwerk in Querschnittsebene (radial)*

Eine Versiegelungsbauwerk besteht in seiner Querschnittsebene aus mindestens "drei" sich zwangsläufig ergebenden Bereichen:

- dem jeweiligen Baustoff der Versiegelung
- einen ggf. noch vorhandenen Teil des Ausbaus
- der Kontaktzone/-fläche mit dem Wirtgestein
- der Auflockerungszone im tunnel- bzw. schachtnahen Wirtgestein

Das Versiegelungsbauwerk verhindert oder (zumindest) reduziert Wegsamkeiten entlang der Tunnel und Stollen. Dies verlangt für den Baustoff des Dichtelements eine ausreichend geringe Permeabilität und für die Kontaktfläche/-zone zum Wirtgestein einen ausreichenden kraftschlüssigen Kontakt.

(c) *Übergangsschichten*

Als konstruktive Elemente oder Bauteile besitzen Versiegelungsbauwerke Übergangsschichten, bestehend aus Filterschichten und Trennwänden.

Die Übergangsschichten sorgen für die bautechnische Trennung von Dichtelementen, Widerlagern und Resthohlraumverfüllungen zur Vermeidung unerwünschter geochemischer Wechselwirkungen (Nagra 2024c).

¹⁴ Das Widerlager gewährleistet die Standicherheit zunächst selbst, wird im Laufe der Zeit aber mit der aussen anstehenden Verfüllung zusammen tragen.

Die Filterschichten können auch zur gleichmässigen Verteilung des anstehenden Wassers über die Querschnittsfläche des Dichtelements dienen. Dadurch wird ein gleichmässiges Quellen des Bentonits¹⁵ und damit der selbstnivellierende Charakter des Prozesses unterstützt. Darüber hinaus dienen Filterschichten auch dem Vermeiden der Bildung präferierter Fliesspfade durch das Versiegelungsbauwerk.

Als weiteres konstruktives Element werden Trennwände erstellt, welche als Schalung die Schüttung kohäsionsloser Baustoffe über den gesamten Versiegelungsquerschnitt ermöglichen.

10. Versiegelungsbauwerke werden konstruktiv symmetrisch aufgebaut.

Die Versiegelungen sollen in axialer Richtung einen möglichst symmetrischen Aufbau besitzen. Der Auslegungsgrundsatz ergibt sich einerseits daraus, dass jede Versiegelung zwei Prozesse verzögern bzw. verhindern soll:

- Zutritt von Wasser in das Tiefenlager entlang der Zugänge
- Austrag (advektiver Transport in Wasser) von Radionukliden entlang der Zugänge aus dem Tiefenlager

Andererseits werden zwei Widerlager benötigt, um – bevor der radiale Quelldruck des Bentonits in ausreichendem Masse aktiviert ist – das Dichtelement am gewünschten Ort zu halten. Eine (axiale) Volumendehnung des Dichtelements als Folge des Quellens wird bei geeigneter Auslegung weitgehend verhindert, sodass sich der gewünschte Quelldruck aufbaut und die Kontaktflächen zwischen Dichtelement und Wirtgestein planmässig kraftschlüssig sind. Die Widerlager befinden sich dafür beidseitig vom Dichtelement.

11. Der konstruktive Aufbau der Versiegelungsbauwerke soll einfach gehalten werden.

Der Bauwerksentwurf eines Versiegelungsbauwerks soll einfach und übersichtlich sein sowie wenige Einzelelemente umfassen.

Das Konstitutivverhalten eines Bentonits ist komplex. Dies gilt umso mehr bei der notwendigen Berücksichtigung des geochemischen Milieus. Es empfiehlt sich daher, möglichst "einfache" Geometrien und Einbautechniken bei gleichzeitig einfachem Aufbau zu planen und einzusetzen. Die Qualitätssicherung beim Bau soll mit Hilfe weniger, leicht messbarer Grössen erfolgen können. Dazu bieten sich zum einen die Hohlraumvolumina-Vermessung, beispielsweise mittels Laser-Scans, und die eingebaute Massen-Quantifizierung mittels Wägen an. Aus diesen beiden Messgrössen lassen sich die vorgegebenen, aus der Dimensionierung resultierenden Verfüllgrade oder Trockeneinbaudichten des Bentonits verifizieren.

Bautechnik

12. Die Errichtung von vertikalen Versiegelungen ist im Falle einer Wahl derjenigen von horizontalen Versiegelungen vorzuziehen.

Vertikale oder zumindest stark geneigte Versiegelungsbauwerke sind einfacher zu planen, zu dimensionieren und zu errichten als horizontale. Die V3-Versiegelungen werden daher

¹⁵ Gilt für reine Bentonit-Dichtelemente.

ausschliesslich in den Schächten und nicht in dem am Schachtfuss angeschlossenen Tunnel realisiert. Als Vorteile eines Versiegelungsbauwerks in einem Schacht werden genannt:

- Die Schwerkraft "unterstützt" den Bau. Die Thematik einer ausreichenden Firstbündigkeit, die bei einem Versiegelungsbauwerk in einem horizontalen bzw. subhorizontalen Bauwerk bautechnisch zu lösen ist, entfällt.
- Geforderte Einbaudichten, zum Beispiel beim Bentonit, lassen sich leichter realisieren. Während in horizontalen Strecken "gestopft" werden muss, kann in Schächten lagenweise eingebaut und beispielsweise mit Rüttelplatten verdichtet werden.
- Beim Einsatz von hydraulisch abbindenden Baustoffen wie Beton entfällt ein Teil der Schalungen.
- Filterschichten und andere konstruktive Elemente lassen sich in vertikal aufgebauten Versiegelungsbauwerken mittels eines lageweisen Einbaus sehr einfach realisieren.
- Der Ausbau lässt sich leichter rauben als in einem subhorizontalen Tunnel. Zwischenbauzustände sind einfacher zu handhaben.

13. Alle Versiegelungsbauwerke basieren auf einem einheitlichen Bauwerkstyp.

Für die V1-, V2- und V3-Versiegelungen wird, abgesehen von der Einbaurichtung (vertikal, (sub-)horizontal), der gleiche generische Bauwerksentwurf bevorzugt. Eine Unterscheidung ist bei den Abdichtungslängen jedoch in Abhängigkeit vom Ort des Bauwerks notwendig.

Der Einbau von in Serie und gleich aufgebauten Versiegelungen hat insbesondere folgende Vorteile:

- Der Bau läuft mit der Zeit routinierter ab und erfordert insgesamt kürzere Erprobungs- und Testphasen sowie Bauzeiten.
- Durch Verwendung eines einheitlichen Versiegelungsbauwerkstyps gleicht sich das übergeordnete Sicherheitsniveau aus (vgl. dazu auch Punkt 5).

14. Das Bauverfahren soll ein möglichst gebirgsschonendes Lösen des Gebirges erlauben.

Die tunnelnahe Auflockerung des Wirtgesteins ist zu minimieren. Beim Vortrieb und Sichern der für die Versiegelung vorgesehenen Tunnel- und Schachtabschnitte sowie beim Rauben sind gebirgsschonende Verfahren, wenn technisch sinnvoll und möglich, anzuwenden.

Sowohl durch den Vortrieb, als aber auch durch ein allfälliges Rauben des Ausbaus, kommt es zur Bildung einer neuen resp. Vergrösserung einer vorhandenen Auflockerungszone. Dies kann temporär zu einer Erhöhung der Durchlässigkeit im Nahbereich des Ausbruchsrands führen. Durch die Auflockerung entstandenen Risse im Wirtgestein beginnen sich infolge Tonquellens bei Feuchtigkeitseintrag jedoch wieder zu schliessen ("Selbstabdichtung"), so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Durchlässigkeit in der Auflockerungszone nach Einbau der Ausbruchsicherung über die Zeit wieder abnimmt. Je feiner und disperser die Volumenvergrösserung in der Auflockerungszone verteilt ist, desto geringer ist die temporäre Durchlässigkeitserhöhung und desto schneller die Abnahme der Durchlässigkeit infolge der "Selbstabdichtung". Ein schonender Ausbruch oder ein Rauben des Ausbaus mit einem nachfolgenden direkten Einbau einer Ausbruchsicherung wirkt sich günstig auf die auflockerungsbedingte Rissbildung aus. Potenzielle Wegsamkeiten im anstehenden Tonstein werden damit reduziert und im Idealfall vermieden.

15. Falls es die felsmechanischen Verhältnisse zulassen, wird der Ausbau vor der Errichtung der Versiegelungsbauwerke soweit wie möglich bergigsschonend geraubt.

Nach dem Bau der Versiegelungsbauwerke sollen sich potenzielle Wegsamkeiten im angrenzenden Wirtgestein überwiegend in Radial- oder Umfangsrichtung – das heisst im Tunnelquerschnitt – ausdehnen. Der Auslegungsgrundsatz hat das Ziel, eine Ausbildung von höher transmissiblen Wegsamkeiten in Tunnellängsrichtung zu verhindern. Somit ist der Ausbau in den Bereichen der späteren Versiegelungsbauwerke bei Möglichkeit vollständig zu rauben. Linienhafte oder punktuelle Sicherungselemente können beibehalten werden. Gegebenenfalls ist auch das Verbleiben von Teilen der flächenhaften Ausbruchssicherung im Falle der V1- und V2-Versiegelungen erforderlich. Verbleibende oder angrenzende Teile des Ausbaus sind entsprechend auf die Zusatzbelastung auszulegen. Weitere Variationen hinsichtlich der Reaktionsmöglichkeiten auf die In-situ-Bedingungen an den Einbauorten der Versiegelungsbauwerke werden im Kapitel 5 diskutiert.

16. Die Wahl der Orte für die Versiegelungsbauwerke erlaubt eine gewisse Flexibilität.

Die genaue Positionierung der Versiegelungsbauwerke soll möglichst nicht durch baulich vordefinierte Randbedingungen beeinträchtigt werden. Versiegelungsbauwerke sollten vor allem an geomechanisch günstigen Orten platziert werden und möglichst kleine Ausbruchquerschnitte und günstige Profilformen aufweisen.

Die Entscheidung zur genauen Platzierung einzelner Versiegelungsbauwerke soll möglichst lange offengehalten werden. Bei den V1- und V3-Versiegelungsbauwerken ist diese Flexibilität kleiner als bei den V2-Versiegelungsbauwerken.

Prinzipieller Aufbau einer Versiegelung

Auf Basis der Auslegungsgrundsätze und des prinzipiellen, generischen Aufbaus werden die spezifischen Versiegelungsbauwerke hinsichtlich ihrer jeweiligen Anforderungen und Randbedingungen beispielhaft konstruktiv durchgebildet (Fig. 4-1).

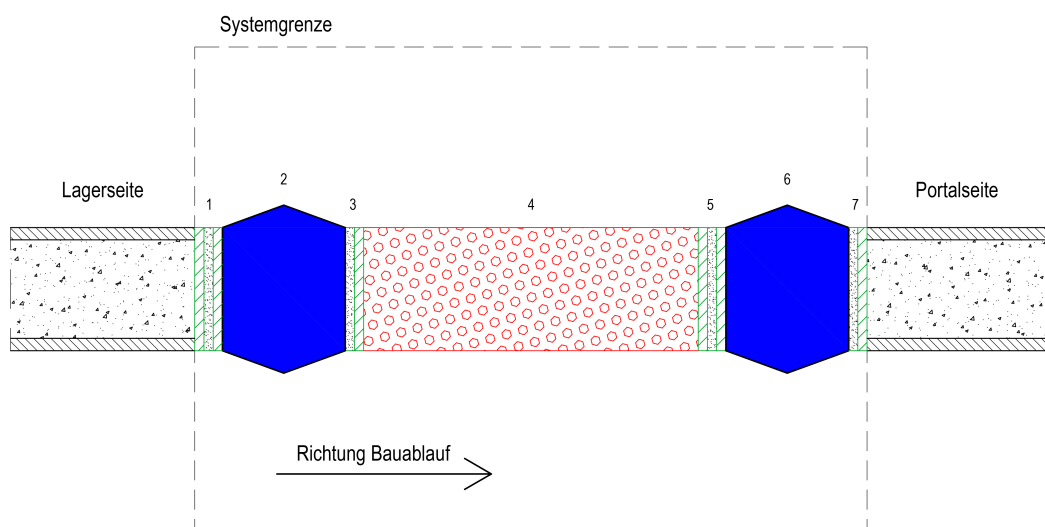


Fig. 4-1: Prinzipieller, generischer Aufbau der Versiegelungsbauwerke (nicht massstäblich)

Die Ziffern 1, 3, 5 und 7 entsprechen den Übergangsschichten, die Ziffern 2 und 6 den beiden Widerlagern und die Ziffer 4 dem Dichtelement.

4.2 Exemplarischer Aufbau der V1- und V2-Versiegelungsbauwerke

Die jeweiligen Unterkapitel zu den einzelnen Versiegelungsbauwerken enthalten noch keine finalen und vollumfänglichen geometrischen Angaben, sondern exemplarische Abmessungen, die auf Planungsannahmen beruhen. Der derzeitige Stand der Planungen legt bewusst noch keine endgültigen Angaben fest.

Die nachstehenden Beschreibungen im Abschnitt 4.2.1 und 4.2.2 beziehen sich auf die V1- und V2-Versiegelungen beider Lagerteile, das heisst auf Versiegelungsbauwerke in horizontalen bzw. subhorizontalen Tunnelabschnitten. Unterschiede und Besonderheiten der Versiegelungsbauwerke werden in den zugehörigen Abschnitten thematisiert. Aufgrund der vertikalen Lage und den teilweise abweichenden Randbedingungen wird die V3-Versiegelung von den anderen Versiegelungsbauwerken getrennt und umfassender im Abschnitt 4.3 beschrieben.

Um die statische Auslegung bei der Planung einfach und nachvollziehbar zu gestalten und die Qualitätssicherung bei der Ausführung zu vereinfachen, werden einige einfache Dimensionierungsgrundsätze berücksichtigt. Mit ihrer Hilfe lässt sich beispielsweise die konstruktive Durchbildung der Versiegelungen weitgehend vereinheitlichen und die Einbauqualität von Bentoniten leichter prüfen.

Die V1- und V2-Versiegelungsbauwerke bestehen aus 3 wesentlichen Elementen: dem Dichtelement, den Widerlagern und den Übergangsschichten (Fig. 4-1). Die beiden Versiegelungsbauwerkstypen werden beidseitig von Verfüllungen in Form von Lockermassen (z. B. Bentonit oder aufbereiteter Opalinuston) umschlossen. Im Fall der SMA-Lagerkavernen wird als einzige Ausnahme ein hochporöser Mörtel als Lagerkavernenverfüllung verwendet.

- Dichtelement
 - Das Dichtelement besteht aus einem kompaktierbaren Bentonit, der den Bentonit als feinkörniges Material, Granulat, Pellets, Formsteine oder eine Kombination davon enthält. Alternative Sand-Bentonit-Gemische¹⁶ (siehe Abschnitt 4.2.2) sind bei SMA-Versiegelungsbauwerken zur Erhöhung der Gasdurchlässigkeit vorgesehen. Überschlägige Berechnungen zeigen, dass von einer Mindestlänge der Dichtelemente von ca. dem dreifachen Tunneldurchmesser auszugehen ist, um die geforderten Permeabilitätswerte zu erreichen. Angestrebt wird eine intrinsische Permeabilität des Bentonits im gequollenen Zustand von etwa 10^{-19} bis 10^{-17} m² (Nagra 2024c). Die Dimensionierung des Dichtelements erfolgt über die Trockeneinbaudichte derartig, dass der Bentonit bei vollständiger Sättigung einen definierten Quelldruck¹⁷ aufweist.
 - Der Bentonit kann mit fortlaufendem Schüttkegel, z. B. mit sogenannten Stopfschnecken, eingebracht werden. Mit fortlaufendem Schüttkegel können, im Gegensatz zu einem Einbau in Lagen (vertikaler Einbau), auch die Firstbereiche verfüllt werden. Schüttkegel können durch vertikale Hilfselemente (Mauern o.ä.) verringert werden. Eine Alternative ist der Einbau vorgefertigter Blöcke aus kompaktierten Materialien und das Verfüllen verbleibender Hohlräume mit Bentonitgranulat. Der Einbau erfolgt so, dass ein Kontakt zur Ausbruchlaibung hergestellt wird (formschlüssig). Ein kraftschlüssiger Anschluss im Gewölbe erfolgt aber erst, wenn das Gebirge weiter in Richtung des verfüllten Bauwerks konvergiert bzw. der Bentonit in Richtung Bauwerk quillt.

¹⁶ In der Regel als feinkörniges Material bzw. als Granulat vorgesehen.

¹⁷ Gilt vor allem bei "reinen"-Bentonit-Dichtelementen. Dichtelemente aus Sand-Bentonit-Mischungen besitzen nur eine reduzierte Erhöhung des Quelldrucks.

- Widerlager
 - Alle Widerlager bestehen z. B. aus einem unbewehrten, hochwertigen Konstruktionsbeton mit einer Nenndruckfestigkeit von mindestens 25 MPa. Aus statischen Gründen soll der Lastabtrag in das anstehende Gebirge möglichst über Normalspannungen erfolgen, und zur Gewährleistung der Lagestabilität ist das Widerlager in einer doppeltkonischen Form ausgebildet. Um Spannungsüberhöhungen aus Biegeeffekten zu vermeiden, entspricht die Länge der Widerlager in etwa ihrem Durchmesser. Ein Aufweitungswinkel im Bereich von ca. 20° bis 25° stellt den Lastabtrag in das umgebende Wirtgestein in der gewünschten Art und Weise sicher. Einschnitte in der genannten Grössenordnung lassen sich unter Tag erfahrungsgemäss¹⁸ gut realisieren.
 - Beide Widerlager nehmen hauptsächlich den anstehenden Gebirgsdruck sowie den sich ausbildenden Quelldruck aus dem Dichtelement des Versiegelungsbauwerks auf. Weiter sind auch lagerseitig auftretende Quelldrücke aus dem Quellen der Tunnelverfüllung und dem hydrostatischen Druck aus potenziell portalseitig anstehendem Wasser mit der Auslegung abzudecken.
 - Die Widerlager werden anfangs eine gewisse Dichtigkeit gegen Fluide aufweisen. Sie werden jedoch konservativ als nicht langzeitbeständig angenommen und leisten somit keinen Beitrag zur Dichtigkeit im Rahmen von Langzeitsicherheitsanalysen.
- Übergangsschichten
 - Die Übergangsschichten sorgen als konstruktive Elemente für die bautechnische Trennung von Dichtelementen, Widerlagern und Resthohlraumverfüllungen zur Vermeidung unerwünschter geochemischer Wechselwirkungen (Nagra 2024c.). Dazu gehören einerseits Filterschichten aber auch z. B. Mauerwerk¹⁹ als "Schalung" für geschüttete Filterschichten. Zum Einsatz kommen ausschliesslich langzeitbeständige Materialien, wie z. B. Sande, Kiese²⁰ oder Kalksandsteine, die das geochemische Milieu gar nicht oder tendenziell eher positiv beeinflussen.
 - Eine Mächtigkeit von etwa einem halben Meter je Lockermassenschüttung oder je Mauerwerk reicht bei geeigneter konstruktiver Durchbildung aus, um die zugewiesenen Aufgaben – z. B. als verlorene Schalung oder als Filter – zu erfüllen. Längere Übergangsschichten zur Einhaltung ihrer Funktion als Stabilisator des geochemischen Milieus sind allerdings auch denk- und realisierbar.

¹⁸ Erfahrungen obliegen Bauverfahren aus dem konventionellen Berg- und Tunnelbau.

¹⁹ Als Mauerwerk kommen z. B. ein solches aus Kalkformsteinen o.ä. geochemisch bedingt geeignete Materialien in Frage.

²⁰ Beispielsweise ein Kalkkies o.ä. geochemisch bedingt geeignete Materialien.

- Die Übergangsschichten werden in den V1- und V2-Versiegelungsbauwerken beidseitig der Widerlager positioniert. Somit werden die abträglichen Wechselwirkungen zwischen Bentonit und Zement limitiert (vgl. Abschnitt 4.1, Punkt 8). Sie erhalten zudem je eine Filterschicht. Somit unterstützen sie eine gleichmässige Sättigung des Dichtelements (innenseitig) und eine gleichmässige Beaufschlagung durch anstehendes Wasser (aussen-seitig).
- Ergänzend könnten auch Filterschichten innerhalb des Dichtelements eingesetzt werden, um bei grösseren Längen eine gleichmässige Sättigung zu unterstützen und um bevorzugte Wegsamkeiten im Dichtelement zu unterbrechen. Solche und alle weiteren Filterschichten nehmen jeweils den gesamten Querschnitt des Versiegelungsbauwerks ein und wären in Längsabständen vom ca. ein- bis zweifachen ihres Durchmessers zu realisieren.

4.2.1 Versiegelungsbauwerke V1-HAA der Lagerstollen

Nachstehend werden die Besonderheiten der Versiegelungsbauwerke V1-HAA erläutert. Einen exemplarischen Aufbau des Versiegelungsbauwerks zeigt Fig. 4-2.

Errichtungszeitpunkt

Die Errichtung der Versiegelungsbauwerke V1-HAA findet unmittelbar nach Abschluss der Einlagerung von HAA-Abfällen in den jeweiligen HAA-Lagerstollen statt. Die zeitnahe Versiegelung der HAA-Lagerstollen stellt die schnelle Isolation der radioaktiven Abfälle sicher.

Positionierung

Eine Versiegelung V1-HAA wird im Anschluss an den Abzweiger im Anfangsbereich (vgl. Fig. 3-1) des HAA-Lagerstollen errichtet. Die Versiegelung grenzt den kompaktierten Bentonit der HAA-Lagerstollenverfüllung von der VF1-Resthohlraumverfüllung im Einlagerungsfeld ab. Hinsichtlich der Kompartimentalisierung trennt die Versiegelung die HAA-Lagerstollen vom übrigen Lagerfeld. Zur Errichtung der Versiegelungsbauwerke V1-HAA werden einige wenige Dekameter des jeweiligen HAA-Lagerstollens beansprucht.

Entfernung des Ausbaus

Wie bei allen anderen Versiegelungsbauwerken wird der vorhandene Ausbau möglichst geraubt. Mögliche Varianten inklusive jener, in der Teile des Ausbaus verbleiben, werden im Kapitel 5 erläutert und diskutiert.

Baustoffauswahl

Für das Dichtelement wird Bentonit verwendet. Bei Bedarf können geringe Mengen an Zusätzen (z. B. Sand) beigemischt werden. Die Baustoffe der Übergangsschichten und Widerlager sind vorne angegeben.

Abmessungen

Den abgeschätzten Abmessungen liegt ein Bauwerksdurchmesser von ungefähr 3.5 m zugrunde, der sich aus einem lichten Durchmesser des HAA-Lagerstollens von 2.8 m und dem geraubten Ausbau von zweimal 0.35 m zusammensetzt.

Das gesamte Versiegelungsbauwerk hat – hier in der exemplarischen Umsetzung – eine Länge von 20 m bis 25 m. Davon werden für das eigentliche Dichtelement 10 m (das Dreifache des Durchmessers), für die beiden Widerlager etwa je 4 m und für jede der vier Übergangsschichten ca. 1 m²¹ resp. 1.5 m²² benötigt.

Anzahl

Die aktuellen Planungen sehen insgesamt 23 Versiegelungen V1-HAA vor. Davon befinden sich 20 im Hauptlager und drei im Pilotlager (Fig. 3-1).

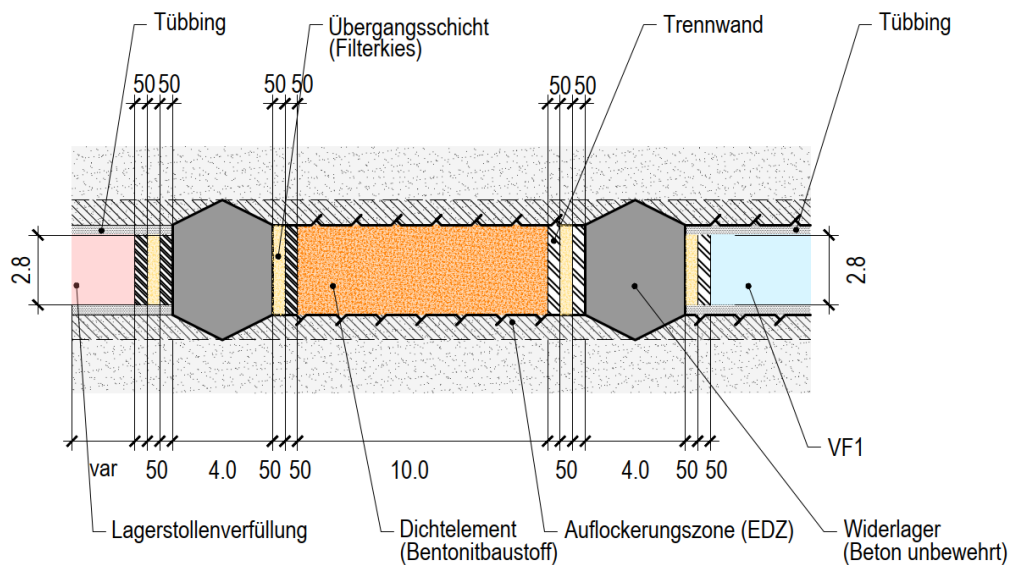


Fig. 4-2: Exemplarischer Aufbau der Versiegelung V1-HAA eines HAA-Lagerstollens (Längsschnitt)

²¹ Bei der Dimension der Übergangsschichten handelt es sich um Mindestgrößen aus rein bautechnischer Sicht. Größere Dimensionen aufgrund spezifischer Anforderungen (z. B. geochemisches Milieu) sind möglich.

²² Falls bautechnisch eine beidseitige (verlorene) Schalung notwendig ist.

4.2.2 Versiegelungsbauwerke V1-SMA der Lagerkavernen

Nachstehend werden die Besonderheiten der Versiegelungsbauwerke V1-SMA erläutert. Einen exemplarischen Aufbau des Versiegelungsbauwerks zeigt Fig. 4-3.

Errichtungszeitpunkt

Die Errichtung der Versiegelung V1-SMA findet unmittelbar nach der vollständigen Beschickung der jeweiligen SMA-Lagerkaverne mit Abfällen statt. Die zeitnahe Versiegelung der SMA-Lagerkavernen stellt die schnelle Isolation der radioaktiven Abfälle sicher.

Positionierung

Eine Versiegelung V1-SMA wird nach der Verfüllung der zugehörigen SMA-Lagerkaverne im entsprechenden Abzweiger (vgl. Fig. 3-1) errichtet. Sie grenzt die VF1-Lockermassenverfüllung im Lagerfeld von der Verfüllung der SMA-Lagerkaverne mit einem hochporösen Mörtel ab. Zur Errichtung der Versiegelungsbauwerke V1-SMA werden, ähnlich wie bei V1-HAA, einige Dekameter benötigt.

Die Kompartimentalisierung betrifft im Gegensatz zu den Versiegelungen V1-HAA nur die hydraulischen Verhältnisse, d. h. die Bewegung von Gebirgswasser. Mit der erzielten Gasdurchlässigkeit der Versiegelungen V1-SMA werden ungünstig hohe Gasdrücke innerhalb der SMA-Lagerkavernen vermieden, indem Gas in den übrigen Tiefenlagerbereich abgeleitet wird.

Widerlager

Der M1-Mörtel der SMA-Lagerkavernenverfüllung übernimmt die lagerseitige Widerlagerfunktion und kann die entstehenden Quelldrücke des Dichtelements aufnehmen. Somit kann lagerseitig auf die Errichtung eines Widerlagers bei den Versiegelungsbauwerken V1-SMA "verzichtet" werden. Der prinzipielle Aufbau resp. die Auslegungsgrundsätze der Funktionstrennung sowie der symmetrische Aufbau bleiben ansonsten erhalten.

Entfernung des Ausbaus

Wie bei allen anderen Versiegelungsbauwerken wird die Ausbruchsicherung nach Möglichkeit geraubt resp. rückgebaut. Entsprechende Varianten werden in Kapitel 5 diskutiert.

Baustoffauswahl

Beim Dichtelement wird ein Bentonit verwendet, welcher sich aus einem Sand-Bentonit-Gemisch im Verhältnis 80:20 zusammensetzt. Das Sand-Bentonit-Gemisch vereint die Vorteile des Bentonits-abdichtende Wirkung gegen Wasser und Sorption von Radionukliden – mit der angestrebten Gasdurchlässigkeit (siehe Abschnitt 4.1, Punkt 4). Die Baustoffe der Übergangsschichten (Sande, Kiese, Mauerwerk etc.) und Widerlager (hochwertiger Konstruktionsbeton) bleiben gegenüber den bisherigen Beschreibungen unverändert.

An dieser Stelle wird erneut auf die massgebende Anforderung bezüglich der Gaspermeabilität des Versiegelungsbauwerks verwiesen, welche die Versiegelungen V1-SMA und V2-SMA im SMA-Lagerteil betrifft. Die dort eingelagerten Abfälle (siehe Abschnitt 2.4) zeichnen sich im Vergleich zu den Abfällen im HAA-Lagerteil durch ein wesentlich höheres Gasbildungspotenzial aus. Für das sich bildende Gas muss ein ausreichendes Gasspeichervolumen zur Verfügung gestellt werden. Solche Volumina stehen in der Verfüllung der SMA-Lagerkaverne selbst sowie im Porenraum der VF1- und VF2-Verfüllungen (bis zum V3-Versiegelungsbauwerk) zur Verfügung.

Abmessungen

Den exemplarischen Abmessungen liegt ein Bauwerksdurchmesser von ungefähr 6.5 – 7.0 m zugrunde. Der lichte Durchmesser der SMA-Abzweigertunnel beträgt etwa 5.5 m. Hinzu kommt die Mächtigkeit des zu raubenden Ausbaus. Damit benötigt das doppelkonusförmige Widerlager etwa eine Länge von ca. 7.5 m, während sich das eigentliche Dichtelement über etwa 20 m erstrecken soll (etwa dreifacher Tunneldurchmesser).

Die drei Übergangsschichten, inklusive Mauerwerke als verlorene Schalungen, werden zu jeweils ca. 1 m²³ resp. 1.5 m²⁴ beidseitig des portalseitigen Widerlagers sowie als Trennschicht zwischen Lagerkavernenverfüllung und Dichtelement vorgesehen. Daraus ergibt sich eine Gesamtlänge von etwa 30 m für die exemplarische Umsetzung.

Anzahl

Gemäss heutiger Planung sind insgesamt acht Versiegelungen V1-SMA vorgesehen, davon sieben im Hauptlager und eine im Pilotlager (Fig. 3-1).

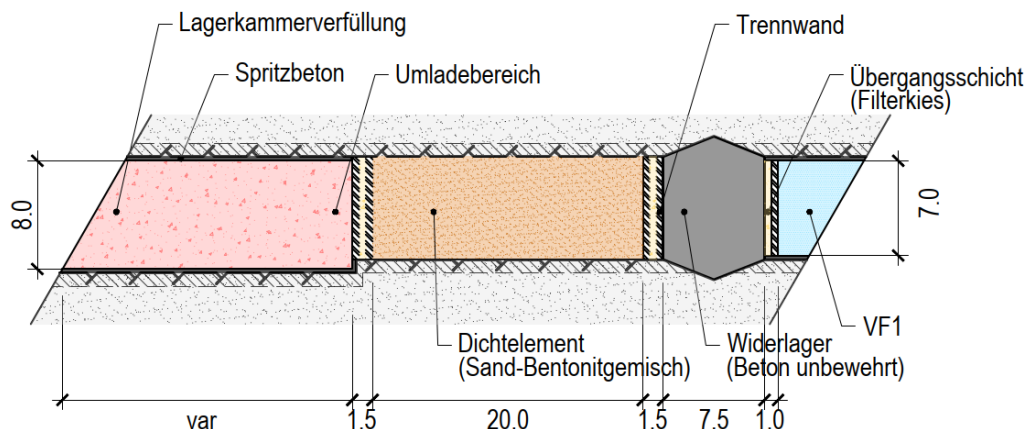


Fig. 4-3: Exemplarischer Aufbau der Versiegelung V1-SMA einer SMA-Lagerkaverne im Abzweiger (Längsschnitt)

²³ Bei der Dimension der Übergangsschichten handelt es sich um Mindestgrössen aus rein bautechnischer Sicht. Grössere Dimensionen aufgrund spezifischer Anforderungen (z. B. geochemisches Milieu) sind möglich.

²⁴ Falls bautechnisch eine beidseitige (verlorene) Schalung notwendig ist.

4.2.3 Versiegelungsbauwerke V2-HAA und V2-SMA der Lagerfeldzugänge

Im Folgenden werden die Eckdaten zu den Versiegelungsbauwerken V2-HAA und V2-SMA zusammengefasst. Die beiden Typen unterscheiden sich, wegen der bereits im Abschnitt 4.2.2 thematisierten, unterschiedlichen Anforderungen hinsichtlich der Gaspermeabilität, lediglich durch die Baustoffauswahl für das Dichtelement. Sie werden daher gemeinsam behandelt. Einen exemplarischen Aufbau der Versiegelungsbauwerke zeigt Fig. 4-4.

Errichtungszeitpunkt

Die Errichtung der jeweiligen V2-Versiegelungsbauwerke findet unmittelbar nach der vollständigen VF1-Verfüllung der Lagerfeldzugänge (bzw. der Zugänge der Pilotlager) statt. Durch die zeitnahe Versiegelung der Lagerfelder wird bereits früh eine zusätzlich in Reihe geschaltete Barriere zu den V1-Versiegelungsbauwerken geschaffen und die vollständige Trennung der Lagerfelder vom restlichen Bereich des geologischen Tiefenlagers realisiert.

Positionierung

Die V2-Versiegelungsbauwerke werden in den subhorizontalen Tunneln der Lagerfeldzugänge errichtet. Dabei handelt es sich zum einen um die drei Tunnel für Bau, Betrieb und Lüftung des HAA-Lagerteils und zum anderen um die zwei Tunnel des SMA-Lagerteils für den Betrieb und die Lüftung (vgl. Fig. 2-2). Des Weiteren wird je Lagertyp ein V2-Versiegelungsbauwerk in den Zugangstunneln der jeweiligen Pilotlager eingebaut.

Räumlich trennen die V2-Versiegelungsbauwerke somit die VF1-Lagerfeldverfüllungen von den VF2-Resthohlraumverfüllungen des zentralen Bereichs ab. Weiterhin grenzen sie im Falle eines Kombilagers die beiden Lagertypen voneinander ab. Die Übersicht in Fig. 3-1 veranschaulicht die Positionierung der Versiegelungsbauwerke.

Zur Realisierung werden Tunnelabschnitte von mehreren Dekametern Länge benötigt. Aufgrund des Lagerdesigns besteht hinsichtlich der genauen Lokalisierung die grösste Flexibilität, sodass auf unvorhergesehene und gegebenenfalls weniger günstige Verhältnisse, die erst bei der Auffahrung erkannt werden, reagiert werden kann.

Entfernung des Ausbaus

Wie bei allen anderen Versiegelungsbauwerken werden die Gebirgssicherung auch hier so weit wie möglich geraubt bzw. rückgebaut und Teile der Auflockerungszone werden entfernt. Wenn die felsmechanischen Verhältnisse dies zulassen, ist es auch denkbar, bereits beim Vortrieb auf einen flächenhaften Ausbau an den in Frage kommenden Orten zu verzichten.

Gegebenenfalls erforderliche Varianten diskutiert Kapitel 5.

Baustoffauswahl

Die Baustoffe der Versiegelungsbauwerke V2-HAA²⁵ entsprechen denjenigen der Versiegelungsbauwerke V1-HAA, die Versiegelungsbauwerke V2-SMA denen der Versiegelungsbauwerke V1-SMA. Unterschiede ergeben sich demnach nur bei den Bentonitbaustoffen der Dichtelemente.

Beim Dichtelement der Versiegelungsbauwerke V2-SMA kommen folglich wieder Sand-Bentonit-Gemische (z. B. Verhältnis 80:20) zum Einsatz. Analog zur Begründung zu den Versiegelungsbauwerken V1-SMA schafft dieses Material einen Zugang für Gase in den Porenraum der Resthohlraumverfüllungen ausserhalb der Lagerfeldzugänge. Damit vergrössert sich das zur Verfügung stehende Gasspeichervolumen.

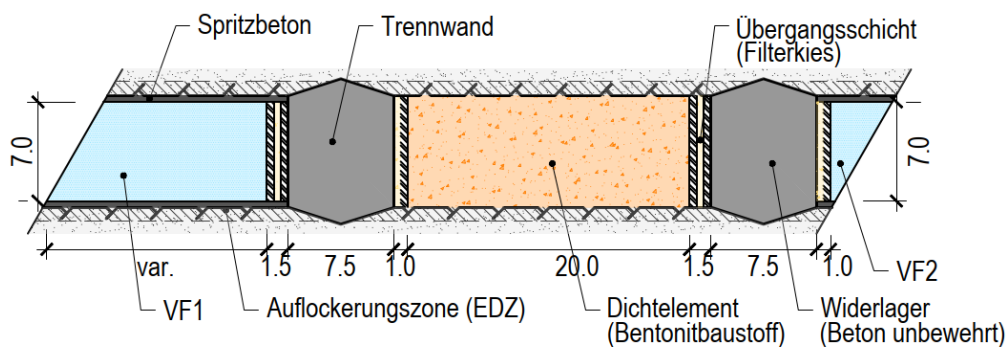
Die Baustoffe der Übergangsschichten und Widerlager bleiben unverändert (siehe Abschnitt 4.2).

Abmessungen

Die exemplarischen Abmessungen gehen von einem Bauwerksdurchmesser von etwa 6.5 – 7.0 m lichter Durchmesser der Tunnel – zuzüglich geraubtem Ausbau – aus. Für die Widerlager ist eine Länge von ca. 7.5 m erforderlich. Die Dichtelemente haben eine Länge von etwa 20 m, was wieder ca. dem dreifachen Durchmesser entspricht. Die vier Übergangsschichten, inklusive Mauerwerke als verlorene Schalungen, werden zu jeweils ca. 1 m²⁶ resp. 1.5 m²⁷ beidseitig der beiden Widerlager vorgesehen. Daraus ergibt sich eine Gesamtlänge in der exemplarischen Umsetzung von etwa 40.0 m (vgl. Fig. 4-4).

Anzahl

Gemäss heutigem Planungsstand sind insgesamt vier Versiegelungen V2-HAA und drei Versiegelungen V2-SMA (Fig. 3-3) geplant, davon jeweils eines zur Abgrenzung des Pilotlagers im jeweiligen Lagerteil.



²⁵ Zur Erhöhung des Gasspeichervolumens könnten im Rahmen der Optimierung bei der Baustoffauswahl der Versiegelungen V2-HAA auch Sand-Bentonit-Gemische verwendet werden.

²⁶ Bei der Dimension der Übergangsschichten handelt es sich um Mindestgrößen aus rein bautechnischer Sicht. Grössere Dimensionen aufgrund spezifischer Anforderungen (z. B. geochemisches Milieu) sind möglich.

²⁷ Falls bautechnisch eine beidseitige (verlorene) Schalung notwendig ist.

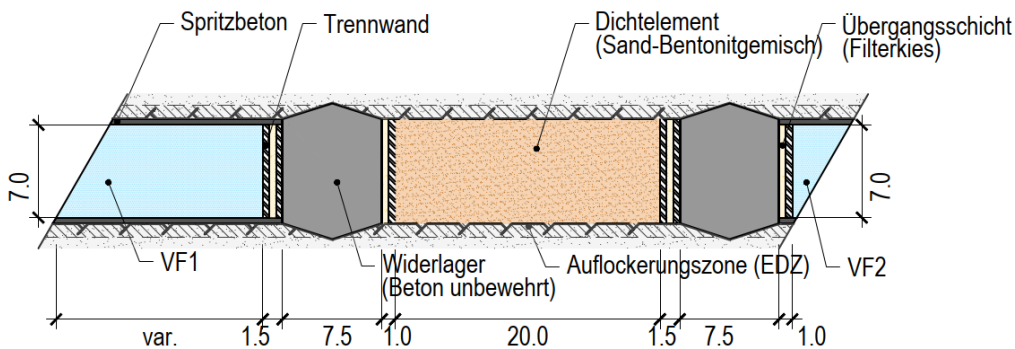


Fig. 4-4: Exemplarischer Aufbau der Versiegelungen V2-HAA (oben) und V2-SMA (unten) der Lagerfeldzugänge (Längsschnitte)

4.3 Exemplarischer Aufbau der V3-Versiegelungsbauwerke

Nachstehend werden die Besonderheiten der vertikalen V3-Versiegelungsbauwerke erläutert. Einen exemplarischen Aufbau des Versiegelungsbauwerks zeigt Fig. 4-5.

Der exemplarischen Aufbau der V3-Schachtversiegelungen berücksichtigt die folgenden vier Voraussetzungen:

- Anordnung des geologischen Tiefenlagers etwa in der Mitte des Wirtgesteins:
 - Zur Errichtung der V3-Schachtversiegelungen steht etwa die halbe Mächtigkeit des Opalinustons zur Verfügung (von Lagerebene bis zur Oberkante des Wirtgestein).
- vollständiger Rückbau gebirgssichernder Ausbauelemente:
 - Um den hydraulischen Widerstand der Versiegelung im Zusammenwirken mit dem Wirtgestein zu maximieren, wird der Schachtausbau über die vollständige Ausdehnung der V3-Versiegelung geraubt (abschnittsweise während der Bauausführung). Lediglich punktuelle oder linienhafte Sicherungselemente verbleiben in allfälligen Schwächezonen im Gebirge.
 - Um ein gebirgsschonendes Rauben des Ausbaus zu ermöglichen, soll der Schachtausbau nach Möglichkeit mit geeigneten konstruktiven Massnahmen dafür vorbereitet werden.
- Langzeitbeständigkeit aller eingesetzten Baustoffe:
 - Dieser Grundsatz garantiert die Standsicherheit der gesamten Füllsäule, insbesondere die Lagestabilität des eigentlichen Dichtelements der V3-Versiegelung. Lediglich oberhalb des Dichtelements werden eingeschränkt langzeitbeständige Baustoffe wie zement-basierter Beton zugelassen. Die Langzeitbeständigkeit des Bentonits sorgt für eine dauerhafte Dichtwirkung gegen ggf. anstehendes Deckgebirgswasser.

- Trennung von Dichtfunktion und Widerlagerfunktion:
 - Das eigentliche Dichtelement wird auf Basis von Bentonit errichtet, welches seine Dichtwirkung erst mit dem Quelldruck nach dem Zutritt von Wasser ausbildet. Die Gewährleistung der Dichtigkeit bzw. Gebrauchstauglichkeit verlangt daher die Einspannung des Dichtelements zwischen zwei im Vergleich zum Dichtelement näherungsweise starren Widerlagern. An die Widerlager werden keine langfristigen Anforderungen hinsichtlich der Dichtwirkung gestellt. Lediglich das obere Widerlager übernimmt bis zur vollständigen Sättigung des Dichtelements eine temporäre Dichtwirkung. Die Sättigung des Dichtelements erfolgt – im Gegensatz zu den (sub-)horizontalen Versiegelungen auf Lagerebene – aufgrund seiner Positionierung im Schacht auch über portalseitiges Gebirgswasser und nicht hauptsächlich über das Wirtgesteins.

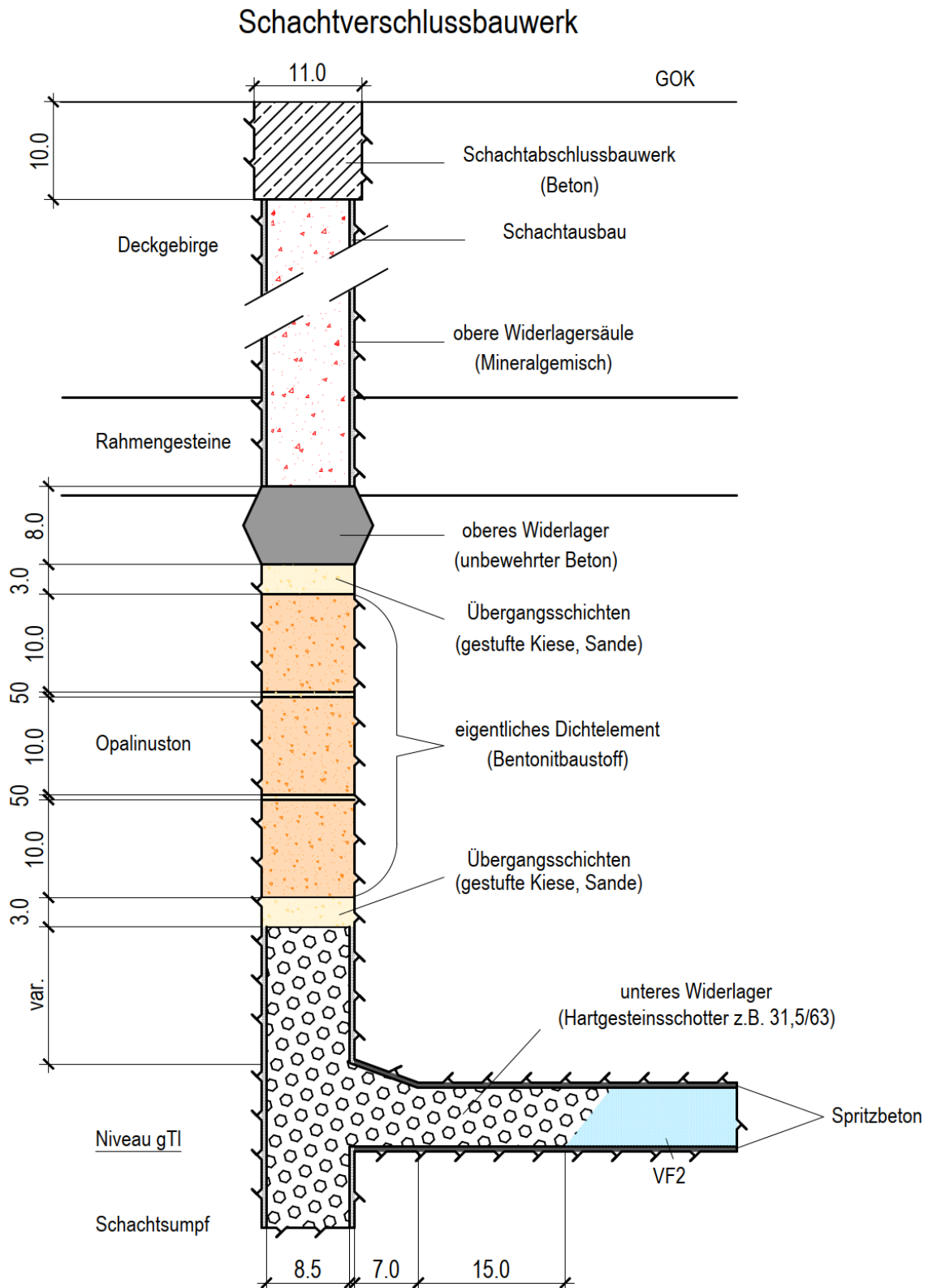


Fig. 4-5: Exemplarischer Aufbau der V3-Versiegelung eines vertikalen Zugangsbauwerks/Schachts (Längsschnitt)

Die in Fig. 4-5 gewählten exemplarischen Abmessungen gehen von einem Schachtdurchmesser von $9.5 - 10.0 \text{ m}^{28}$ (8.5 m lichter Durchmesser des Schachts zuzüglich des geraubten Ausbaus und geraubter loser Felsteile), einer Höhe des angeschlossenen Tunnels von 7.0 m und einer Mächtigkeit des Opalinustons von beispielhaft 100 m aus. Zur Errichtung der V3-Versiegelung steht somit ein Teufenbereich von etwa fünfzig Metern zur Verfügung. Standortspezifisch können barrierewirksame Rahmengesteine mit einbezogen werden.

Die Elemente der V3-Versiegelungsbauwerke und die anstehenden Verfüllungen können exemplarisch wie folgt beschrieben werden:

- Dichtelement:
 - Das eigentliche Dichtelement besteht aus einem Bentonit, der sich aus feinkörnigem Material, Granulat, Pellets, Formsteinen oder einer Kombination der genannten zusammensetzt. Die Dimensionierung des Dichtelements erfolgt über die Trocken-einbaudichte derartig, dass der Bentonit bei vollständiger Sättigung den gewünschten Quelldruck aufweist.
 - Angestrebt wird eine mittlere Permeabilität des Bentonits im gequollenen Zustand von 10^{-19} bis 10^{-18} m^2 (Nagra *in prep.*). Die V3-Versiegelung verhindert somit dauerhaft einen relevanten Zutritt von Gebirgswasser in das geologische Tiefenlager.
 - Alle zehn Meter wird eine Filterschicht aus Feinsand eingebaut. Ihre Mächtigkeit beträgt einen halben Meter. Sie unterstützt eine gleichmässige Aufsättigung resp. ein gleichmässiges Quellen des Bentonits und bricht bevorzugte Wegsamkeiten. Die Abstände der Filterschichten entsprechen ungefähr dem Durchmesser des Dichtelementes im Schacht.
- unteres Widerlager:
 - Das untere Widerlager besteht aus einem setzungsstabil eingebauten Hartgesteins-schotter.²⁹ Auf einen zementgebundenen Baustoff als Alternative wird verzichtet, weil dieser keine vergleichbare Langzeitbeständigkeit beim Zutritt von Gebirgswasser aufweist (Gefahr der Korrosion), was die notwendige Lagestabilität des Dichtelements – in seiner vertikalen Lage – beeinträchtigen könnte.
 - Das untere Widerlager füllt den gesamten Schachtsumpf aus, sodass geringe Mengen an durch den Schacht zu tretendem Gebirgswasser hier zunächst aufgefangen werden. Es reicht oberhalb des Sohlenniveaus bis zur zweifachen Höhe des angeschlossenen Tunnels. Im Firstbereich des Anschlusstunnels wird ein Keil geraubt, um einerseits die gebirgsmechanischen Verhältnisse zu verbessern und andererseits die Verfüllung mit Schotter zu erleichtern.
 - Um die Auslaufsicherheit zu gewährleisten, dehnt sich das untere Widerlager in den Anschlusstunnel an die Schächte über die dreifache Tunnelhöhe aus, bevor sich die vergleichsweise weiche VF2-Verfüllung anschliesst.
 - Beim Einbau des Schotters wird eine Einbaudichte angestrebt, die eine Steifigkeit (Elastizitätsmodul) von 200 – 300 MPa aufweist. Diese reicht aus, um gemeinsam mit dem Lastabtrag über den Siloeffekt die Lagestabilität des Dichtelements der V3-Versiegelung langfristig zu gewährleisten.
 - Als wesentliche Last nimmt das untere Widerlager neben dem Eigengewicht den sich ausbildenden Quelldruck aus dem Dichtelement auf.

²⁸ Durchmesser gilt für den Zugangs- und Betriebsschacht.

²⁹ Als Planungsannahme wird ein Kalksteinschotter angesetzt, der das geochemische Milieu nicht negativ beeinflusst.

- oberes Widerlager:
 - Das obere Widerlager besteht aus einem nicht armierten, hochwertigen Konstruktionsbeton mit einer Nenndruckfestigkeit von mindestens 25 MPa. Um den Lastabtrag in das anstehende Gebirge möglichst über Normalspannungen zu erreichen und die Lagestabilität zu gewährleisten, besitzt es eine doppeltkonische Form. Um Spannungserhöhungen aus Biegung zu vermeiden, entspricht die Höhe des oberen Widerlagers annähernd seinem Durchmesser. Ein Aufweitungswinkel von ca. 25° unterstützt den gewünschten Lastabtrag über Normalspannungen in das Gebirge und vereinfacht zudem den Ausbruch sowie die Betonage bei der Errichtung.
 - Das obere Widerlager nimmt als wesentliche Lasten neben dem Eigengewicht den sich ausbildenden Quelldruck aus dem Dichtelement von unten und den hydrostatischen Druck im anstehenden Deckgebirgswasser von oben auf. Das Widerlager wird anfangs eine Dichtigkeit gegen Fluide aufweisen. Es wird jedoch konservativ als nicht langzeitbeständig angenommen und leistet somit keinen Beitrag zur Dichtigkeit im Rahmen von Langzeitsicherheitsanalysen. Das Dichtelement in der V3-Versiegelung wird aufgrund seiner Nähe zu den überliegenden Aquiferen im Vergleich zu den anderen Versiegelungen (V1 und V2) schneller vollständig gesättigt sein und somit die abdichtende Funktion übernehmen, welche das obere Widerlager nur temporär erfüllen kann.
- Übergangsschichten:
 - Die Übergangsschichten sorgen für die bautechnisch konstruktive Trennung der Widerlager vom Dichtelement. Sie bestehen aus gestuften Kiesen und Sanden, um die Filterstabilität der einzelnen Schichten untereinander zu gewährleisten. Eine Mächtigkeit von ca. drei Metern reicht bei geeigneter konstruktiver Durchbildung aus, um diese Aufgabe zu erfüllen.
 - Die untere Übergangsschicht umfasst vier bis sechs Einzelschichten, um bei gleichzeitiger Filterstabilität den Übergang vom grobkörnigen Hartgesteinsschotter zum Bentonit herzustellen. Der allfällige Einsatz von nicht korrodierenden Geotextilien kann den Herstellungsprozess erleichtern.
 - Die konstruktive Durchbildung der oberen Übergangsschicht besteht im einfachsten Fall, wenn die Funktion der Filterstabilität nicht benötigt wird, nur aus einer Feinsandschicht mit einem halben Meter Mächtigkeit. Die obere Übergangsschicht entspricht dann der Filterschichten im Dichtelement. Sie übernimmt in diesem Fall vor allem die Aufgabe, durch das obere Widerlager zutretendes Wasser über den Versiegelungsquerschnitt zu verteilen, was die gleichmässige Sättigung des Bentonits unterstützt.
 - Um Setzungen zu beschränken, werden Alle Sand- und Kiesschichten der Übergangsschichten beim Einbau lagenweise eingebaut verdichtet.
- Schachtverfüllung mit zusätzlicher Funktion als Grundwasserstockwerkstrenner (obere Widerlagersäule und Schachtabschlussbauwerk):
 - Formal gehört die obere Widerlagersäule nicht mehr zur V3-Versiegelung. Sie trennt die natürlichen Grundwasserstockwerke dauerhaft, um den natürlichen hydrogeologischen Zustand vor dem Abteufen der Schächte wiederherzustellen. Die Schachtverfüllung und das Schachtabschlussbauwerk werden im Abschnitt 6.1.5 behandelt.

5 Bautechnische Auslegungsvarianten der Versiegelungsbauwerke

Die Varianten der Versiegelungsbauwerke unterscheiden sich in der konstruktiven Ausbildung der einzelnen Bauwerkselemente sowie im Umgang mit der bestehenden Ausbruchsicherung und der ausbruchsnahen Auflockerungszone. Alle gezeigten Varianten erfüllen die Anforderungen aus der Langzeitsicherheit. Es handelt sich somit um rein bautechnische Varianten. Die Notwendigkeit solcher Varianten folgt aus der Prognoseungewissheit in Bezug auf die lokalen (geomechanischen) Felseigenschaften des Wirtgesteins auf Lagerebene. Spätestens beim Bau des zentralen Bereiches und den Demonstrationen in den Testbereichen werden diese Ungewissheiten reduziert und die Varianten konkretisiert, sodass beim Bau jeweils mit optimierten Versiegelungsvarianten auf die angetroffenen Gebirgsverhältnisse reagiert werden kann.

Für die Herleitung der bautechnischen Auslegungsvarianten werden die Gefährdungsbilder beim Bau der Versiegelungsbauwerke identifiziert und Massnahmen vorgeschlagen (Abschnitt 5.1). Je nach Gebirgsverhalten beim Vortrieb bzw. Rauben des Ausbaus werden Massnahmenpakete für den Einbau des Dichtelements aufgezeigt (Abschnitt 5.2). Auf Basis der Massnahmenpakete werden anschliessend Auslegungsvarianten für die Versiegelungsbauwerke definiert (Abschnitt 5.3). Die exemplarischen Auslegungen der Versiegelungsbauwerke im Abschnitt 4.2 stellen, sofern es die felsmechanischen Verhältnisse zulassen, die Vorzugsvariante dar. Im Abschnitt 5.3 sind diese jeweils als Variante 3 aufgeführt.

5.1 Bautechnische Gefährdungsbilder

Beim Bau der Widerlager, des Dichtelements und der Übergangsschichten des Versiegelungsbauwerks ist in der Interaktion mit dem Gebirge mit unterschiedlichen Gefährdungsbildern zu rechnen.

In Tab. 5-1 sind die Gefährdungsbilder, die beim Bau der Versiegelungsbauwerke auftreten können, beschrieben, und es werden entsprechende Massnahmen zu deren Vermeidung vorgeschlagen. Die letzten drei Spalten ordnen das Gefährdungsbild den jeweiligen Elementen des Versiegelungsbauwerks zu.

Tab. 5-1: Übersicht bautechnischer Gefährdungsbilder entlang der Versiegelungsbauwerke beim Bau der Widerlager (W), des Dichtelements (D) und der Übergangsschichten (Ü)

Nr.	Name	Beschreibung	Annahme/Massnahme	W	D ³⁰	Ü ³¹
1	Steinfall	Gefährdung der Belegschaft durch Ablösen von Gesteinstteilen im Firstbereich (Grösse einige dm ³).	Reinigen der durch das Rauben der Ausbruchsicherung bzw. des Ausbaus freigelegten Gesteinsfläche und Arbeiten nur aus gesicherten Bereichen heraus.	×	×	
2	Auflockerung im Firstbereich	Überbeanspruchung der Ausbruchsicherung infolge Auflockerungsdruck. Durch die Entlastung entsteht ein aufgelockerter Bereich, welcher zu einem Auflockerungsdruck im Firstbereich auf den Ausbau führt.	Je nach vorliegender Standfestigkeit des Gebirges müssen beim Rauben der Ausbruchsicherung Teile der bestehenden Ausbruchsicherung beibehalten werden. Zusätzlich müssen ggf. neue Sicherungsmittel wie z. B. Anker oder Stahlbögen eingebaut werden, damit die verbleibende Ausbruchsicherung nicht überbeansprucht wird bzw. damit keine Ablösungen niederbrechen. Die Arbeiten erfolgen nur aus gesicherten Bereichen heraus.	×	×	
3	Ablösungen und Niederbruch	Gefährdung der Belegschaft und von Maschinen durch gravitations- oder spannungsbedingte Ablösungen entlang von Trennflächen oder Brüchen im First, Kämpfer oder in den Paramenten.		×	×	
4	Ausbildung einer starken Auflockerung mit weit offenen und verbundenen Rissen	Potenziell unzulässige Erhöhung der Gebirgsdurchlässigkeit infolge der Bildung einer ausbruchsnahen Auflockerungszone mit nicht-selbstabdichtenden offenen Rissen. Durch das Auffahren der Tunnel kommt es zu Spannungumlagerungen, welche das umliegende Gebirge durch Volumenvergrösserung auflockern.	Teilentfernen (Einschnitte) der ausbruchsnahen Auflockerungszone zur Verminderung von hydraulischen Fliesswegen.	×	×	

³⁰ Hier wird auch die Übergangsschicht inkludiert, die sich innerhalb der Widerlager unmittelbar am Dichtelement selbst befinden. Hier ist ein Rauben der Ausbruchsicherung wie beim Dichtelement notwendig.

³¹ Hier werden nur die Übergangsschichten, die sich ausserhalb der beiden Widerlager zur Abgrenzung der anliegenden Verfüllung befinden, berücksichtigt. Hier kann i.d.R. auf ein Rauben der Ausbruchsicherung verzichtet werden.

Tab. 5-1: Fortsetzung

Nr.	Name	Beschreibung	Annahme/Massnahme	W	D ³⁰	Ü ³¹
5	Unzulässige Deformationen infolge druckhaftem Gebirge	Entlastung und spannungs-induzierte Bruchvorgänge infolge Überschreitens der Gebirgsfestigkeiten führen zu unzulässigen Tunnelkonvergenzen.	Um unzulässige Deformationen zu vermeiden, wird in druckhaften Tunnelabschnitten die bestehende Ausbruch-sicherung bzw. der Ausbau nicht über die gesamte Dichtelementstrecke entfernt. Der verbleibende Ausbau ist so auszulegen, dass er die Lasten aus den geraubten Strecken aufnehmen kann. In den geraubten Abschnitten werden systematische radiale Anker oder Stahlbögen verbaut ³² (siehe auch Gefährdungsbild 2 und 3). Je grösser die Druckhaftigkeit des Gebirges, umso kleiner dürfen die zu raubenden Abschnitte sein.	×	×	×
6	Überbeanspruchung des Ausbaus infolge druckhaftem Gebirge	Durch den echten Gebirgsdruck kann die Ausbruch-sicherung bzw. der Ausbau überbeansprucht und beschädigt werden.		×	×	×
7	Zeitabhängige Deformation (resp. Zunahme Gebirgsdruck)	Bei gesättigtem Opalinuston kommt es infolge der aufgetretenen Volumenvergrösserung in der plastischen Zone zu langandauernden Spannungsumlagerungen infolge des Abbaus der Porenwasserüberdrücke. Diese führen zu zeitabhängigen Verformungen oder Gebirgsdruckzunahmen	Keine Massnahmen nötig. Die Zunahme des Gebirgsdrucks hat für den kurzen Bauzustand der Versiegelungsbauwerke keine Relevanz. Nach dem erfolgten Einbau der Versiegelung und vor der vollständigen Sättigung des Dichtelements führt ein Versagen des Ausbaus zu keiner Beeinträchtigung der Funktionstüchtigkeit der Versiegelung. Das satt eingebaute Dichtelement wird lediglich durch die Konvergenzen weiter kompaktiert. Eine Vergrösserung der auflockerungsbedingten Rissbildung ist langfristig aufgrund der selbstabdichtenden Wirkung des Wirtgesteins zu vernachlässigen. Langfristig stellt sich ein Gleichgewicht zwischen dem Gebirgsdruck und dem Quelldruck des Dichtelements bei einer geringen Konvergenz ein.		×	

³² Ausbau mit Stahlbögen gilt hier nur für den Bereich des Dichtelements. Im Bereich des Widerlagers sind nur punktuelle Ausbruch-sicherungen mit temporär-helfenden Konstruktionselementen wie z. B. "Verzugsmatten" vorgesehen.

Tab. 5-1: Fortsetzung

Nr.	Name	Beschreibung	Annahme/Massnahme	W	D ³⁰	Ü ³¹
8	Bergschlag in hochbelastetem, sprödem Gebirge	Gefährdung der Belegschaft durch plötzliche, schlagartige Ablösungen am Ausbruchsrand.	Anker in First, Kämpfer und Paramenten.	×	×	
9	Quellhebung	Unzulässige Sohlhebung (Verletzung des für den Bau der Versiegelung erforderlichen Lichtraums) durch Tonquellen.	Zur Verhinderung von Quellhebungen muss darauf geachtet werden, dass während der Bauphase dem Opalinuston kein Wasser zugeführt wird. Im Falle einer Quellhebung vor dem Einbau der Versiegelungen ist die Sohle nachzuschneiden, um das erforderliche Lichtraumprofil wiederherzustellen. Nach dem erfolgten Einbau der Versiegelung und vor der vollständigen Sättigung des Dichtelements führen Quellhebungen zu keiner Beeinträchtigung der Funktionstüchtigkeit der Versiegelung. Das satt eingebaute Dichtelement wird lediglich durch die Hebungen kompaktiert.	×	×	
10	Erhöhte Durchlässigkeit für Gas und Wasser infolge verbleibender Ausbau-elemente	Die Entfernung des bestehenden Ausbaus dient dazu, die ggf. vorhandene Fliesspfade zwischen Tunnelausbau und Wirtgestein zu unterbrechen. Muss der bestehende Ausbau aufgrund einer geringen Standfestigkeit im Tunnel verbleiben, werden diese Fliesspfade streckenweise nicht unterbrochen, wodurch die Gesamtdurchlässigkeit der Versiegelungsbauwerke erhöht sein kann.	Die Durchlässigkeiten der Versiegelungsbauwerke sind für eine bestimmte Länge, über welche das Dichtelement in form- und kraftschlüssigem Kontakt mit dem Wirtgestein ist, dimensioniert. Daraus resultiert, dass im Fall von einem verbleibenden Ausbau die Gesamtlänge des Dichtelements erhöht werden muss, um die erforderliche Strecke, über welche der form- und kraftschlüssige Kontakt zwischen Dichtelement und Wirtgestein benötigt wird, sicherzustellen.		×	

5.2 Bautechnische Massnahmenpakete

Um den bautechnischen Gefährdungsbildern (Abschnitt 5.1) zu begegnen, werden Massnahmenpakete vorgeschlagen. Der Bau des Dichtelements (inklusive Umgang mit dem bestehenden Ausbau) stellt beim Bau des Versiegelungsbauwerks die grösste Herausforderung dar, da dabei einerseits das Gebirge nach Möglichkeit geschont und andererseits ein direkter Kontakt zwischen dem Dichtelement und dem Gebirge hergestellt werden soll. Des Weiteren sollen, wenn die Gebirgsverhältnisse es erforderlich machen, Einschnitte in die Auflockerungszone realisiert werden.

Beim Bau der Widerlager³³ und der Übergangsschichten sind im Untertagbau bekannte Gefährdungsbilder zu erwarten, welchen mit Massnahmen des Tunnelbaus bzw. der Tunnelsanierung begegnet werden kann. Aus diesem Grund wird im Folgenden lediglich auf Massnahmenpakete für den Bau des Dichtelements eingegangen.

In Tab. 5-2 werden konzeptionelle bautechnische Massnahmenpakete für den Bau der Dichtelemente der Versiegelungsbauwerke vorgestellt, mit welchen den Gefährdungsbildern aus Tab. 5-1 begegnet wird. Die Varianten umfassen den Umgang mit dem bestehenden Ausbau und der Auflockerungszone sowie die daraus resultierenden Änderungen der Versiegelungslängen.

Im Fall des partiellen Raubens des Ausbaus ist eine Verlängerung des Dichtelements gegenüber der Auslegung mit kompletter Entfernung des Ausbaus notwendig. Die Lage des Dichtelements hängt von der erforderlichen Länge der Kontaktfläche (L_{tot}), der Länge der verbleibenden Ausbruchsicherung (L_{s_AS}) und der Länge der geraubten Strecken (L_R) ab. Die erforderliche Gesamtlänge eines Dichtelements (L) ergibt sich zu:

$$L = L_{tot} + L_{s_AS} * \left(\frac{L_{tot}}{L_R} - 1 \right)$$

³³ Der Einschnitt in das Wirtgestein zur Errichtung des Widerlagers erfolgt schrittweise in 1-Meter-Intervallen. Dabei werden aufgrund der Arbeitssicherheit punktuelle Ausbruchsicherungen verwendet (z. B. Anker) und gegebenenfalls temporäre flächenhafte Sicherungselemente (z. B. Gittermatten).

Tab. 5-2: Übersicht Massnahmenpakete für den Bau der Dichtelemente

Die geometrischen Angaben sind exemplarischer Abmessungen und stellen keine Vorfestlegung dar.

Massnahmenpaket	Voraussetzung/ Auslöser	Massnahmen	Beschreibung	Design- Parameter	Beurteilung der Wirksamkeit	Länge total (L_{tot}) direkter Kontakt Dichtelement – Wirtgestein
A (nur V1 SMA- Lager)	Ermöglichen eines präferierten Gas- pfads ³⁴ zur Erhö- hung der Gasper- meabilität	Ohne Rauben des Ausbaus	Einbau des Dicht- elements im lichten Profil des Tunnels ohne Rauben des Aus- baus	Einbaudichte Dichtmaterial Länge L des Dichtelements	Kein Kontakt zwischen Dicht- element und Gebirge und folg- lich erhöhte Permeabilität innerhalb des Ausbaus	$L_{tot} = 0$ m
B	Geringe Stand- festigkeit des Gebirges	Partielles Rauben des Ausbaus mit beschränkter Länge L_{s_AS}	Schneiden und Entfernen des flächigen Ausbaus über eine Länge $L_{s_AS} = 1$ m ohne Ersatz des Ausbaus Längsabtragung des Gebirgsdrucks auf benachbarte intakte Ausbauabschnitte von 2 m Länge	Einbaudichte Dichtmaterial Länge L Dicht- element Anzahl k Schlitze (k = ganze Zahl von $L / (L_{s_AS} + 3$ m))	Standfestigkeit Gebirge gewähr- leistet Kontakt Dicht- element mit Ge- birge gewähr- leistet.	$L_{tot} = k \times L_{s_AS}$
C	Geringe Standf- estigkeit des Gebirges Starke Auf- lockerung im Tunnelfeld	Partielles Rauben des Ausbaus und Nachschnitt Auf- lockerungszone mit beschränkter Länge L_{s_AS}	Schneiden und Entfernen des flächigen Ausbaus und Nachschnitt der Auflockerungs- zone über eine Länge $L_{s_AS} = 1$ m ohne Ersatz des Ausbaus Längsabtragung des Gebirgsdrucks auf benachbarte intakte Ausbau- abschnitte von 2 m Länge	Einbaudichte Dichtmaterial Länge L Dicht- element Anzahl k Schlitze (k = ganze Zahl von $L / (L_{s_AS} + 3$ m)) Nachschnitttiefe d_{ns}	Standfestigkeit Gebirge gewähr- leistet Kontakt Dicht- element mit Gebirge gewähr- leistet Entfernung stark durchlässiger Auflockerungs- zone	$L_{tot} = k \times L_{s_AS}$
D	Sehr gute Stand- festigkeit des Gebirges	Durchgehendes Rauben des Aus- baus über Länge L ³⁵	Schrittweises Ent- fernen des flächigen Ausbaus und Nachschneiden über Längen von ca. 1 m und Ersatz des Ausbaus durch Systemankerung oder Stahlbögen und Netze (Arbeits- sicherheit).	Einbaudichte Dichtmaterial Länge L Dicht- element Steifigkeit/ Festigkeit (in Grenzen) Ersatzausbruch- sicherung	Standfestigkeit Gebirge gewähr- leistet Kontakt Dicht- element mit Gebirge gewähr- leistet Entfernung stark durchlässiger Auf- lockerungszone	$L_{tot} = L$

L = Länge Dichtelement, L_{tot} = Länge total Kontakt Dichtelement und Wirtgestein, L_{s_AS} = Länge Rauben AS

Im Falle des partiellen Raubens des bestehenden Ausbaus können allfällige Arbeiten immer aus den gesicherten Bereichen heraus durchgeführt werden. Damit der verbleibende Ausbau die zusätzlichen Lasten aus den geraubten Bereichen mittragen kann, muss dieser entsprechend ausgelegt sein.

³⁴ Innerhalb der Schnittstelle zwischen Ausbruchsicherung aus Spritzbeton und Wirtgestein.

³⁵ Es sind zusätzliche Nach- und Einschnitte in das Wirtgestein möglich, sofern ein nachgewiesener Mehrwert resultiert.

5.3 Auslegungsvarianten

Basierend auf den Massnahmenpaketen für den Bau des Dichtelements werden im Folgenden Auslegungsvarianten für die Versiegelungsbauwerke vorgestellt. Wie bereits im Abschnitt 5.2 erwähnt, unterscheiden sich die Auslegungsvarianten nur hinsichtlich der Massnahmen beim Bau des Dichtelements. Alle Auslegungsvarianten erfüllen die Anforderungen aus der Langzeitsicherheit.

Aufgrund der ähnlichen Anforderungen an die Auslegung werden die Versiegelungen V1-HAA, V2-HAA und V2-SMA zusammengefasst betrachtet. Zusätzlich werden Varianten für die Versiegelungen V1-SMA gezeigt. Für das vertikale V3-Versiegelungsbauwerk wird lediglich eine Auslegungsvariante vorgeschlagen.

Der Entscheid über die zu verwendenden Versiegelungsvarianten wird, basierend auf den standortspezifischen Gebirgseigenschaften, nach der Testbereiche-Phase gefällt. Die für den Standort vorgesehenen Versiegelungsvarianten werden in Demonstrationen in den Testbereichen realisiert. Es wird angestrebt, eine Versiegelungsvariante pro Versiegelungstyp zu definieren, welche an allen Orten erstellt wird. Die gleichartige Erstellung pro Versiegelungstyp ermöglicht einen Lerneffekt, durch welchen der Versiegelungsbau optimiert werden kann (Abschnitt 4.1, Punkt 13). Spätere Erkenntnisse über die geomechanischen Bedingungen an den Einbauorten der einzelnen Versiegelungen können zu weiteren Optimierungen führen.

5.3.1 Varianten der Versiegelungen V1-HAA, V2-HAA und V2-SMA

Basierend auf den Massnahmenpaketen in Tab. 5-2, sind für die Versiegelungen V1-HAA, V2-HAA und V2-SMA drei Auslegungsvarianten vorgesehen. Die Varianten sind schematisch in Tab. 5-3 dargestellt.

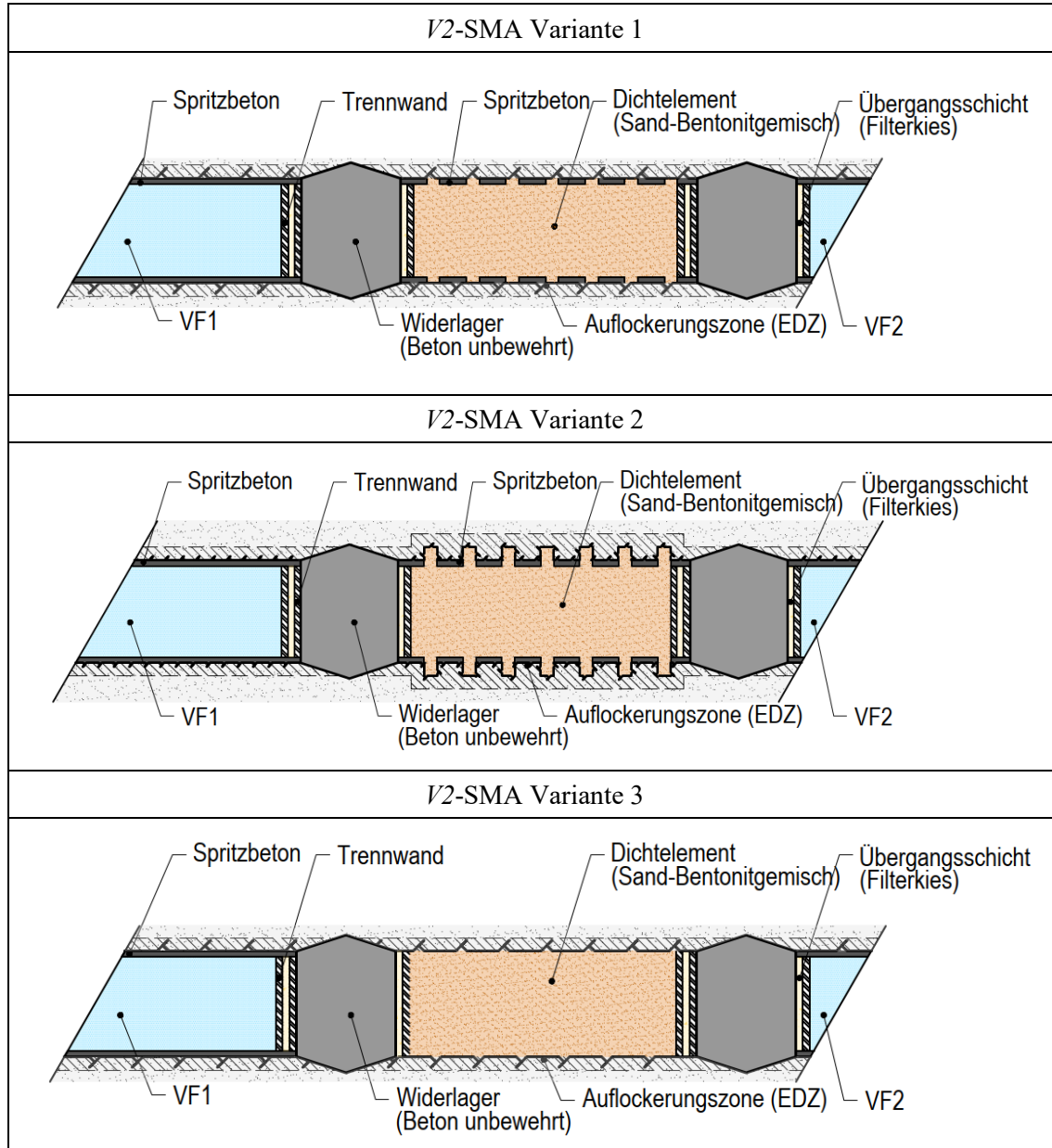
Bei der *ersten* Variante wird der bestehende Ausbau partiell entfernt. Zusätzlich wird durch das Lösen von lockeren Felsteilen die Kontaktfläche zwischen Dichtelement und Wirtgestein bereinigt. Diese Variante entspricht dem Massnahmenpaket B in Tab. 5-2 und ist im gering standfesten Gebirge vorgesehen.

Die *zweite* Variante umfasst ebenfalls eine partielle Entfernung des bestehenden Ausbaus sowie einen Nachschnitt eines Teils der Auflockerungszone im Bereich der Raubung. Diese Variante entspricht dem Massnahmenpaket C in Tab. 5-2 und ist im gering standfesten Gebirge mit starker Auflockerung vorgesehen. Um die erneute Auflockerung durch den Nachschnitt zu reduzieren, kann bei Bedarf eine radiale Ankerung vorgängig zum Nachschnitt installiert werden. Die Anker werden mit dem Erstellen des Nachschnitts ebenfalls geschnitten.

Bei der *dritten* Variante wird über die gesamte Länge des Dichtelements der bestehende Ausbau entfernt. Diese Variante entspricht dem Massnahmenpaket D in Tab. 5-2 und ist im standfesten Gebirge vorgesehen. Für die Gewährleistung der Arbeitssicherheit wird nach dem Rauben der flächenhaften Stützung eine Ausbruchsicherung mit Anker oder Stahlbogen, zusammen mit Netzen eingebracht.

Tab. 5-3: Exemplarische Varianten V1-HAA, V2-HAA und V2-SMA

Alle Varianten sind im Längsschnitt dargestellt. Für V1-HAA und V2-HAA wird "reiner" Bentonit als Dichtelement verwendet.



Bei den ersten beiden Varianten müssen die Versiegelungen verlängert werden, um eine konstante Länge der Kontaktfläche zwischen Wirtgestein und Dichtelement zu gewährleisten. Bei der dritten Variante handelt es sich um die kürzeste Variante der Versiegelungen. Sofern es die felsmechanischen Verhältnisse zulassen, stellt sie somit die Vorzugsvariante dar.

5.3.2 Varianten der Versiegelung V1-SMA

Eine Ausnahme bei der Variantenbetrachtung bietet bei den Versiegelungen V1-SMA die optionale Variante (siehe Tab. 5-4, unten). Diese zielt auf die Anforderung der Ermöglichung einer verbesserten³⁶ Gasmigration aus der Lagerkaverne ab.

Bei der *ersten* Variante wird der bestehende Ausbau partiell entfernt. Zusätzlich wird durch das Lösen von lockeren Felsteilen die Kontaktfläche zwischen Dichtelement und Wirtgestein bereinigt. Diese Variante entspricht dem Massnahmenpaket B in Tab. 5-2 und ist im gering standfesten Gebirge vorgesehen.

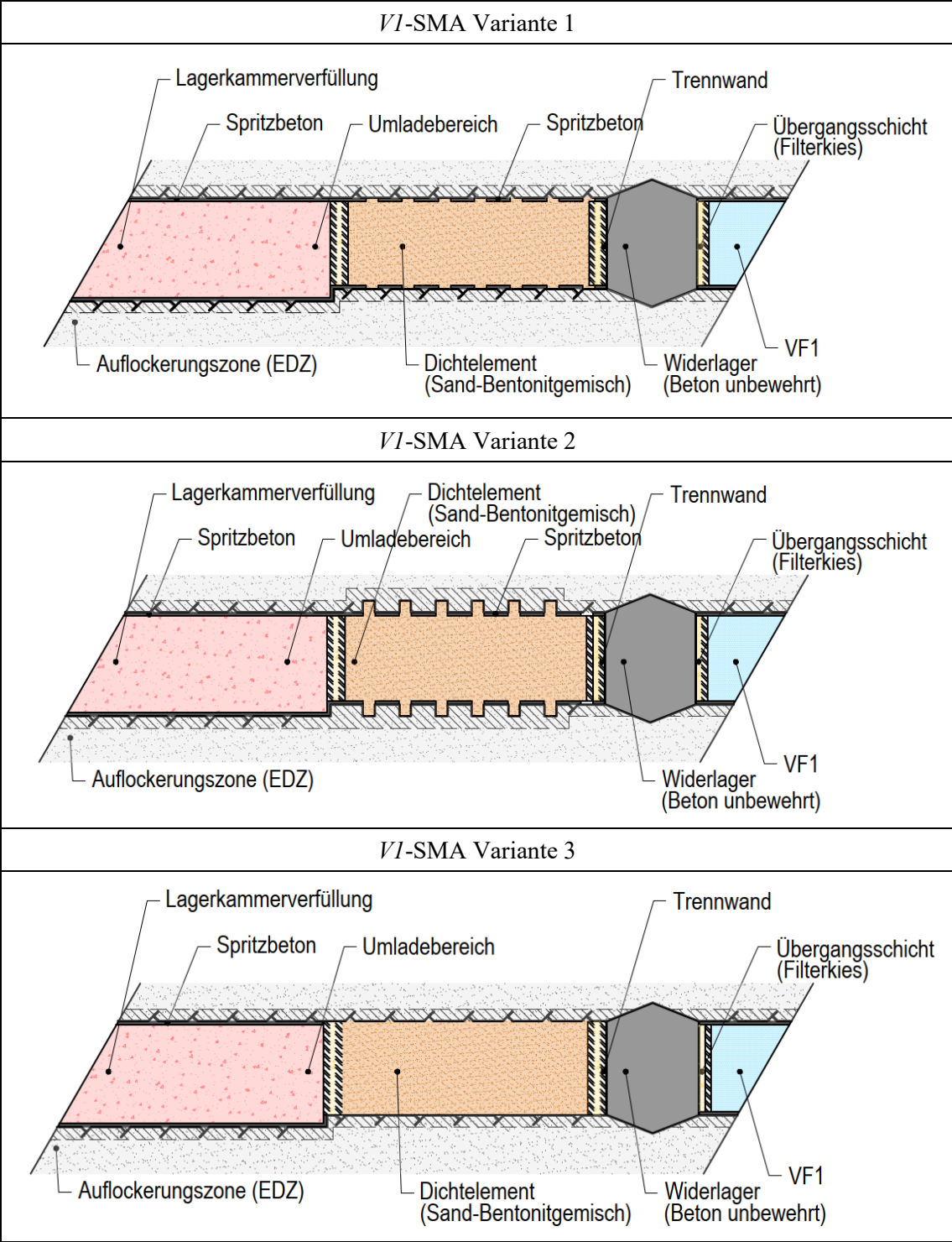
Bei der *zweiten* Variante wird zusätzlich zum partiellen Rauben des bestehenden Ausbaus die Auflockerungszone nachgeschnitten. Damit wird dem Gefährdungsbild der erhöhten tunnelnahen Auflockerung entgegengewirkt, wodurch jedoch der Gasfluss reduziert wird. Diese Variante entspricht dem Massnahmenpaket C in Tab. 5-2.

Bei der *dritten* Variante wird über die gesamte Länge des Dichtelements der bestehende Ausbau entfernt. Diese Variante entspricht dem Massnahmenpaket D in Tab. 5-2 und ist im standfesten Gebirge vorgesehen. Für die Gewährleistung der Arbeitssicherheit wird nach dem Rauben der flächenhaften Stützung eine Ausbruchsicherung mit Anker oder Stahlbogen zusammen mit Netzen eingebracht.

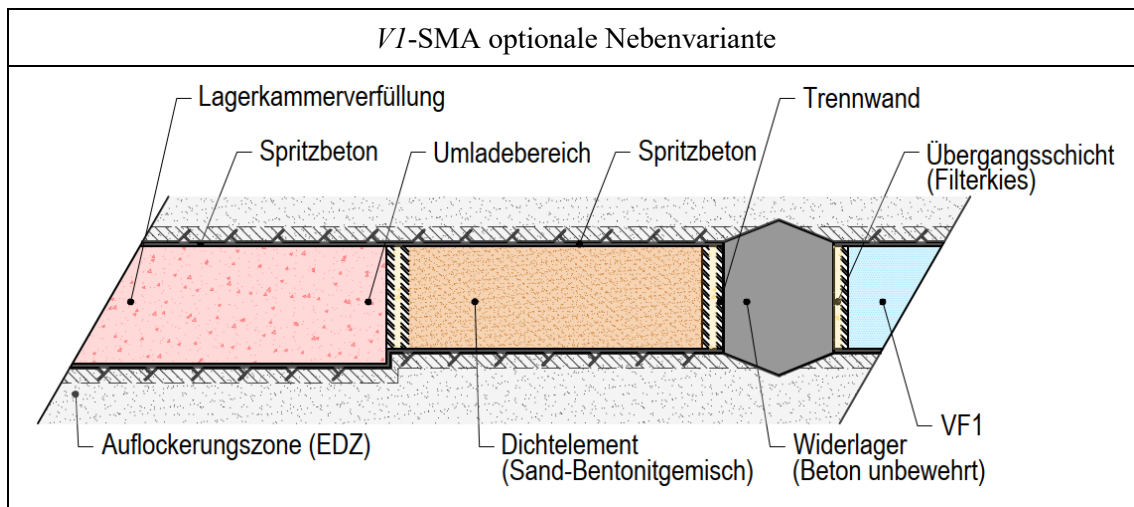
Die *optionale* Variante (Nebenvariante) dieser Versiegelung verzichtet auf die Entfernung der bestehenden Ausbruchsicherung. Diese Variante ist nur bedingt abhängig von den Felskonditionen und wird für den Fall von erhöhten Gasbildungspotenzialen vorgesehen, um einen verbesserten Gasfluss zu ermöglichen. Die Kontaktfläche zwischen der bestehenden Ausbruchsicherung aus Spritzbeton und dem Wirtgestein wirkt hierbei als Fliesspfad für das Gas. Die spätere Degradation des Betons führt zu einer erhöhten Gasdurchlässigkeit, bis die Fuge durch den Quelldruck des Dichtelements oder durch die Konvergenz des Gebirges überdrückt wird.

³⁶ Verbesserung durch eine – wenn auch nur temporär – erhöhte Gasdurchlässigkeit innerhalb der Ausbruchsicherung (hier: Spritzbeton) bzw. innerhalb der Konturzonen. Bei allen drei Varianten wird eine Gasdurchlässigkeit durch den hohen Sandanteil im Bentonit (Verhältnis S/B 80:20) ermöglicht. Siehe Abschnitt 4.1 (Auslegungsgrundsatz 4) und Abschnitt 4.2.2.

Tab. 5-4: Varianten für die Versiegelungen V1-SMA
Alle Varianten sind im Längsschnitt dargestellt.



Tab. 5-4: Fortsetzung



Um eine konsistente Länge der Kontaktfläche zwischen Wirtgestein und Dichtelement bei allen Varianten zu gewährleisten, müssen bei den ersten beiden Varianten die Versiegelungen ebenfalls verlängert werden. Bei der dritten Variante handelt es sich um die kürzeste Variante der Versiegelungen und stellt somit, sofern es die felsmechanischen Verhältnisse zulassen, die Vorzugsvariante dar. Die optionale Variante wäre der Vorzugsvariante gleichgestellt, sollten ihre Eigenschaften benötigt werden.

5.3.3 Variante der V3-Versiegelung

Für das V3-Versiegelungsbauwerk wird lediglich eine Auslegungsvariante vorgeschlagen. Da der Bau des Versiegelungsbauwerks im vertikalen Schacht erfolgt, sind keine Arbeiten überkopf erforderlich. Das Rauben des Ausbaus, das Einschneiden in die Auflockerungszone und der Einbau des Dichtelements können in vertikalen Etappen realisiert werden, welche an die vorherrschenden geologischen Verhältnisse angepasst werden können. Das Versiegelungsbauwerk unterscheidet sich dadurch jedoch nicht in seiner konstruktiven Auslegung. Fig. 4-5 zeigt den exemplarischen Aufbau der Variante.

6 Verfüllung der Resthohlräume

Zusätzlich zu den Versiegelungen beinhaltet das Verschlussystem die Verfüllungen der Resthohlräume. Dazu zählen die VF1- und VF2-Verfüllungen. Zu den VF1-Verfüllungen gehören die Verfüllungen der Lagerfeldzugänge resp. die Zugänge zu den Pilotlager HAA und SMA und zu den VF2-Verfüllungen jene des zentralen Bereichs, der Testbereiche, Teile der Lagerfeldzugänge resp. die Zugänge zu den Pilotlagern bis zu den V2-Versiegelungen, sowie die Kontrollstollen von HAA und SMA (s. Fig. 3-1).

Übersichtshalber werden die Verfüllungen der Lagerkammern (Lagerstollen und -kavernen) hier kurz erläutert (siehe Abschnitt 6.1.1 und 6.1.2). Diese zählen zu den Nahfeldbarrieren und sind somit nicht direkter Teil des Verschlusskonzepts.

Für die verschiedenen Verfüllungen können unterschiedliche Materialien (z. B. Bentonit-Granulat, Mörtel, Sand-Bentonit-Gemisch oder aufbereiteter Opalinuston) verwendet werden. Der heutige Planungsstand legt bewusst noch keine endgültige Materialisierung der Resthohlraumverfüllungen fest. Deren Wahl ist Teil der Optimierung nach dem RBG. Die massgebliche Funktion der VF1- und VF2-Verfüllungen besteht darin, eine mechanische Stabilisierung der zu verfüllenden untertägigen Zugänge sicherzustellen, um die Integrität der geologischen Barriere langfristig zu bewahren. Die Planungsannahme des Verhaltens der Verfüllung wird im Anhang B, Punkt 6, dargestellt. Zudem muss sie ein ausreichendes Gasspeichervolumen zur Verfügung stellen.

6.1 Arten von Verfüllungen

In den folgenden Unterkapiteln werden die massgeblichen Anforderungen an die Auslegung der Verfüllungen (Nagra 2024c) wiedergegeben.

6.1.1 Verfüllung Lagerstollen

Die Verfüllung der HAA-Lagerstollen gehört zu den Nahfeldbarrieren des geologischen Tiefenlagers. Die Hauptfunktion der Lagerstollenverfüllung ist der Schutz der Endlagerbehälter. Dieser wird durch günstige mechanische und hydraulische Eigenschaften des Verfüllmaterials erreicht. Beim Versagen des Behälters trägt die Rückhalte-eigenschaft des Verfüllmaterials zur Rückhaltung und langsamen Freisetzung der Radionuklide bei (Nagra 2024c).

6.1.2 Verfüllung Lagerkavernen

Die Verfüllung der SMA-Lagerkavernen soll ein Gasspeichervolumen (20 % wasserfüllbare Mindestporosität) und eine gewisse Gasdurchlässigkeit ($>1 \times 10^{-10} \text{ m}^2$) zur Verfügung stellen (Nagra 2024c) und die Lagerkavernen vor Konvergenzen schützen. Aus diesem Grund ist aktuell ein hochpermeabler Monokorn-Mörtel (M1-Mörtel) für die Verfüllung vorgesehen, genauere Details befinden sich in Jacobs et al. (1994) und Nagra (2021d). Durch seine einheitliche Korngrösse ermöglicht dieser die Aufrechterhaltung eines Mindestporenraums unter Kompressionsdrücken.

6.1.3 VF1-Verfüllung der Lagerfeldzugänge

Die VF1-Verfüllung wird lagerkammerseitig durch die V1-Versiegelungen und portalseitig durch die V2-Versiegelung begrenzt. Nach Erstellung der letzten V1-Versiegelung des HAA-Lagerteils gemäss EP21 und nach Abschluss der Beobachtungsphase Teil 1 (vgl. Abschnitt 3.3) wird die VF1-Verfüllung eingebracht. Die VF1-Verfüllung soll zur Gewährleistung einer mechanischen Stabilisierung der untertägigen Zugänge dienen und damit Konvergenzen mit Schädigungen der geologischen Barriere verhindern. Dieses Ziel wird durch eine bestmögliche firstbündige Vollverfüllung mit einer langzeitbeständigen Materialisierung aus Quelltonen mit geeignetem Korngefüge erreicht. Zudem dient sie als erstes Gasspeichervolumen und somit auch als Speichervolumen für volatile ^{14}C -Nuklide nach der V1-Versiegelung. Aus diesem Grund soll die Verfüllung eine ausreichende Mindestporosität (40 %) und eine intrinsische Permeabilität $>1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ (Nagra 2024c) besitzen, die mit einem genügend hohen Anteil an Sand und/oder Kies in der Verfüllung sichergestellt werden. Zusätzlich dient die Verfüllung dem Schutz der Versiegelungen vor Erosion und Fremdeinwirkung während und nach der Beobachtungsphase.

Durch die verwendete Materialisierung (Tonanteil) wird eine Unterstützung bei der Limitierung des Wasserflusses entlang der untertägigen Zugangsbauwerke zum Lagerfeld und eine Unterstützung bei der Begrenzung des Austrags von gelösten Radionukliden erreicht (zusätzliche nützliche Wirksamkeiten), falls jene diese erreichen.

Mögliche Materialisierungen sind z. B.:

- aufbereiteter Opalinuston aus dem Ausbruch des Tiefenlagers (mit Sand und/oder Kies vermischt)
- Sand-Bentonit-Gemisch oder
- Friedlandton (ebenfalls mit Sand und/oder Kies vermischt)

6.1.4 VF2-Verfüllung des Zentralen Bereichs und der Testbereiche

Zwischen den V2-Versiegelungen und V3-Versiegelungen wird die VF2-Verfüllung eingebracht (Fig. 3-3). Beim Kombilager wird ab diesem Bereich nicht mehr zwischen den SMA- und HAA-Lagerteilen unterschieden, da sie sich jenen Bereich teilen. Die Verfüllung dient als zusätzliches Gasspeichervolumen³⁷ und wirkt wie die VF1-Verfüllung als Gebirgsstützung. Des Weiteren ermöglicht auch diese Verfüllung unterstützende Funktionen hinsichtlich eines zusätzlichen hydraulischen Widerstands und zur Radionuklidrückhaltung durch Sorption, falls gelöste Radionuklide die VF2-Verfüllung erreichen. Aus diesen Gründen ist auch für diese Verfüllung dieselbe Materialisierung wie bei der VF1-Verfüllung vorgesehen.

³⁷ Gemäss heutiger Planungsannahme wird die Porosität von VF1 angesetzt.

6.1.5 Schachtverfüllungen bis zur Tagesoberfläche

Portalseitig der V3-Versiegelungen wird die Schachtverfüllung eingebracht, welche bis zur Oberfläche reicht. 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. Abgesehen von der Umweltverträglichkeit (z. B. Grundwasser-, Boden- und Naturschutz) 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), werden die Schächte gemäss dem heutigen Planungsansatz mit einem Mineralgemisch³⁸ 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 Durchlässigkeit von 10^{-9} bis 10^{-8} m/s angesetzt.

An der Geländeoberkante (GOK) unterstützt ein Schachtabschlussbauwerk in Form einer Betonkubatur den Schutz der Tagesoberfläche. Gleichzeitig sichert es den dann verfüllten Schacht gegen ein unbeabsichtigtes Eindringen ("human intrusion"/Proliferation), indem es auf bereits in der Vergangenheit stattgefundene menschliche Aktivitäten hinweist.

³⁸ Unter Mineralgemischen werden Mischungen aus Tonen, Sanden und Kiesen verstanden, die auf vorgegebene Eigenschaften abgestimmt sind. Sie zeichnen sich insbesondere durch spezielle Sieblinien aus, um geforderten Eigenschaften zu genügen. Zur Anwendung kommen beispielsweise das "Schlupfkornprinzip" zur Gewährleistung der Filterstabilität oder Ausfallkörnungen für niedrige Durchlässigkeiten.

7 Temporärer Verschluss

Art. 7.5 ENSI-G03 (ENSI 2020b) nennt neben dem ordnungsgemässen Verschluss (vgl. Abschnitt 2.1.1), der in diesen Bericht beschrieben wird, den temporären Verschluss (vgl. Abschnitt 2.1.2). Ein Konzept für den temporären Verschluss ist – wie im Abschnitt 2.1.2 beschrieben – erst mit dem Baugesuch einzureichen und mit dem Betriebsbewilligungsgesuch zu aktualisieren. Das hier vorgestellte Konzept für den ordnungsgemässen Verschluss enthält schon einige Aspekte eines temporären Verschlusses, auf die an dieser Stelle kurz eingegangen wird.

Beim ordnungsgemässen Verschluss stellen die teilweise redundant wirkenden Versiegelungsbauwerke (vgl. Kapitel 4) ein ausgeglichenes hohes Sicherheitsniveau her. Der Verschluss zielt im Interesse der Sicherheit dabei konsequent auf die gestaffelte und schnellstmögliche Herstellung eines passiv sicheren Zustands ab. Schon in der Einlagerungsphase werden die Lagerkammern fortlaufend verfüllt und unmittelbar nach Einlagerungsabschluss mit V1-Versiegelungen (vgl. Abschnitt 4.2.1 und 4.2.2) versiegelt. Die V1-Versiegelungen schützen einerseits die Nahfeldbarriere und verhindern den Zutritt Unbefugter zu den radioaktiven Abfällen (Proliferation), solange das geologische Tiefenlager nicht vollständig verschlossen ist. Andererseits erfüllen sie schon ihre Funktion als (temporären) Verschluss, indem sie den Radionuklidfluss aus den Lagerkammern in ausreichendem Masse begrenzen, falls die Fortsetzung des ordnungsgemässen Verschlusses des geologischen Tiefenlagers verzögert wird. Nach dem Setzen der V1-Versiegelung besteht also de facto ein temporärer Verschluss für den in der ENSI-G03 geforderten Zeitraum von einigen Jahrzehnten bis Jahrhunderten³⁹.

Um eine Gefahrenprävention zu erreichen, ist der temporäre Verschluss, wie gezeigt, nur zum Zeitpunkt vor dem Setzen der V1-Versiegelungen – also während der Einlagerung der Abfälle – relevant. Daher ist der temporäre Verschluss an sich nur als Ersatz für ordnungsgemässe V1-Versiegelungen vorzusehen.

In HAA-Lagerstollen können, unabhängig vom Einlagerungsfortschritt des jeweiligen Stollens, V1-HAA-Versiegelungen unmittelbar platziert werden, da sie auch im ordnungsgemässen Verschluss als Abschluss noch innerhalb des Stollens vorgesehen werden. Für den temporären Verschluss muss lediglich, wie beim ordnungsgemässen Verschluss, hinsichtlich des Strahlenschutzes eine ausreichende "Pufferstrecke" zwischen den Endlagerbehältern und den tatsächlichen Entstehungsort der V1-Versiegelung mit dem Verfüllbaustoff der Lagerstollen errichtet werden.

Für den temporären Verschluss von SMA-Lagerkavernen ist das Vorgehen des HAA-Lagerteils nicht direkt übertragbar, da bei gegebener Kavernengrösse V1-Versiegelungen nicht innerhalb der Lagerkavernen realisierbar sind. Somit ist, wie beim ordnungsgemässen Vorgehen, auch beim temporären Verschluss der Einbau der V1-SMA-Versiegelungen nur vor der SMA-Lagerkaverne möglich. Um den nicht verfüllten SMA-Kavernenteil vor Konvergenzen zu schützen und somit die geologische Barriere nicht zu schädigen sowie die notwendige Gasdurchlässigkeit bis zur V1-SMA-Versiegelung aufrechtzuerhalten, muss der noch offene Teil der Kaverne verfüllt werden. Dazu kann der ordnungsgemässe Verfüllbaustoff der Lagerkavernen (M1-Mörtel)

³⁹ In Anlehnung an die Lebensdauer der untertägigen Infrastruktur. Bei Auslegungsüberschreitung muss z. B. eine Verfüllung der Lagerfeldzugänge – hinsichtlich der mechanischen Stabilisierung – ab einem Zeitpunkt in Betracht gezogen werden, so dass auch die geforderte Reversibilität des temporären Verschlusses zur Rückführung in einen ordnungsgemässen Verschluss – auch "nach Jahrhunderten" – möglich ist.

verwendet werden oder alternativ z. B. ein Kalksteinschotter⁴⁰, der das Einbringen der grossen Verfüllvolumina erleichtert und beschleunigt. Mit der Resthohlraumverfüllung der Lagerkavernen wird auch für die Bereitstellung einer Gasspeicherkapazität – wenn auch gegebenenfalls nur für einen beschränkten Zeitraum⁴¹ – Sorge getragen.

Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt für den temporären Verschluss wäre die Vorhaltung von genügend benötigten Materialien in unmittelbarer Nähe des Tiefenlagers, um allfällig ausfallende Lieferketten zu überbrücken. Dazu gehören u.a. Materialien für die Herstellung der Komponenten der V1-Versiegelungen (Dichtelement, Widerlager, Übergangsschichten). Weiterhin wären ausreichend geschultes Personal für den Bau der Versiegelungen, die für die Herstellung der temporären Versiegelung benötigten Gerätschaften – gewartet und einsatzbereit –, sowie eine funktionierende Werkstatt mit genügend Ersatzmaterialien vorzuhalten.

Der ordnungsgemässe Verschluss bezeichnet gemäss ENSI-G03 (ENSI 2020b) einen Zustand, *in welchem keine weiteren Massnahmen zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit erforderlich sind*. Somit sind die Anforderungen an einen temporären Verschluss ausgehend von den Anforderungen für den definitiven Verschluss zu formulieren und entsprechend dem Zeitraum, für welchen der Verschluss wirksam sein soll, anzupassen. Als Planungsziel gilt hierbei, dass der Erfüllungsgrad der Anforderungen möglichst nahe an jenem vom ordnungsgemässen Gesamtverschluss ist.

Die Nagra wird ein Konzept zum temporären Verschluss mit dem Baubewilligungsgesuch ausarbeiten und einreichen.

⁴⁰ Ein Schotter aus Kalkstein ist notwendig, um das pH-Milieu nicht negativ zu beeinflussen. Hinweis: Der Einbau eines hochpermeablen Monokorn-Mörtels wäre bei gegebener Kavernengrösse gegenüber dem Kalksteinschotter mit erheblich höherem Aufwand verbunden. Ist eine Lagerkaverne nicht vollständig mit SMA-Behältern gefüllt, erhöht sich das zu verfüllende Volumen erheblich.

⁴¹ Mit fortschreitendem Zeitraum und fortschreitender Korrosion der SMA vergrössert sich der Bedarf an Gasspeichervolumen, der je nach Füllgrad der Abfälle pro Lagerkaverne zeitlich limitiert ist. Bei bereits voll beschickten Lagerkavernen müssen zumindest Teile der Lagerfeldzugänge ebenfalls verfüllt werden, um Gasspeichervolumen auch über die Lebensdauer der Ausbruchsicherung hinaus zu bewahren.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im mehrstufigen Planungs- und Bewilligungsverfahren für das geologische Tiefenlager wird wiederholt geprüft, dass es sicher gebaut, betrieben und langzeitsicher verschlossen werden kann. Für das aktuelle Rahmenbewilligungsgesuch wurde ein abdeckendes Verschlusskonzept erarbeitet. Zudem wurde mit dem vorliegenden Bericht die Bundesratsaufgabe 5.4 zum Entsorgungsprogramm 2016 (Bundesrat 2018) beantwortet, indem verschiedene Verschlussvarianten aufgezeigt und miteinander verglichen wurden (siehe Abschnitt 3.3).

Das Verschlusskonzept sieht eine Verfüllung aller untertägigen Anlagen bis zur Geländeoberkante vor. Weiterhin umfasst es Versiegelungsbauwerke an verschiedenen Positionen in den Zugängen und auf Lagerebene. Diese Versiegelungsbauwerke erfüllen unter anderem hydraulische, mechanische und chemische Funktionen. Durch die Verfüllung der Resthohlräume auf Lagerebene wird in der Nachverschlussphase die mechanische Stabilisierung der geologischen Barriere gewährleistet und ein Gasspeichervolumen zur Verfügung gestellt. Für die Gewährleistung der Versiegelung bei unterschiedlichen geomechanischen Bedingungen werden unter Berücksichtigung möglicher Gefährdungsbilder Varianten für die Ausführung der Versiegelungsbauwerke beschrieben.

Gemäss den Sicherheitsanalysen für die Nachverschlussphase (Kapitel 10, Nagra 2024a) bestehen grosse Sicherheitsreserven. Im Verschlusskonzept gewährleisten insbesondere die Schachtversiegelungen den Einschluss der radioaktiven Abfälle und die Rückhaltung der Radionuklide. Sie sorgen sowohl für die Rückhaltung von Gasen auf Lagerebene als auch für eine hydraulische Versiegelung derselben. Versiegelungsbauwerke können in den vertikalen Zugängen zudem einfacher realisiert werden als in den horizontalen Bauwerken auf Lagerebene.

Die Expertengruppe geologische Tiefenlager (EGT) betont in einer Stellungnahme zur Begutachtung⁴² die Relevanz der Schachtsiegel und empfiehlt die Untersuchung einfacherer Konzepte hinsichtlich des Gastransportes aus den SMA-Kavernen. Auch die Nagra sieht Handlungsspielraum für eine Vereinfachung des Verschlusskonzepts und der Versiegelungsbauwerke. Dies wird bei der Projektentwicklung im weiteren Bewilligungsverfahren berücksichtigt. Dabei werden Erfahrungen und der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik berücksichtigt, indem unter anderem auch parallellaufende Tiefenlagerprojekte in anderen Ländern betrachtet werden.

⁴² <https://www.egt-schweiz.ch/dokumente/stellungnahme-der-egt-zum-konzept-zur-versiegelung-und-zum-verschluss-eines-geologischen-tiefenlagers-nab-21-12/>, 23.10.2023

9 Literaturverzeichnis

- ArG (1964): Bundesgesetz über die Arbeit in Industrie, Gewerbe und Handel (Arbeitsgesetz, ArG) vom 13. März 1964, Stand am 1. Januar 2021. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 822.11, Schweiz.
- Bundesrat (2018): Verfügung zum Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen vom 21. November 2018. Schweizer Bundesrat.
- BV (1999): Bundesverfassung der Schweizerischen Eidgenossenschaft (BV) vom 18. April 1999, Stand am 1. Januar 2021. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 101, Schweiz.
- ENSI (2020a): Geologische Tiefenlager. Erläuterungsbericht zur Richtlinie ENSI-G03/d. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- ENSI (2020b): Geologische Tiefenlager. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-G03/d. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- Fanger, L., Müller, H. & Vogt, T. (2021): Überwachung Umwelt und geologisches Umfeld. Nagra Arbeitsbericht NAB 20-28.
- GSchG (1991): Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG) vom 24. Januar 1991, Stand am 1. Januar 2020. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 814.20, Schweiz.
- Jacobs, F., Mayer, G. & Wittmann, F.H. (1994): Hochpermeable, zementgebundene Verfüllmörtel für SMA Endlager. Nagra Technischer Bericht NTB 92-11.
- KEG (2003): Kernenergiegesetz (KEG) vom 21. März 2003, Stand am 1. Januar 2021. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.1, Schweiz.
- KEV (2004): Kernenergieverordnung (KEV) vom 10. Dezember 2004, Stand am 1. Februar 2019. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.11, Schweiz.
- Leupin, O.X., Smith, P., Marschall, P., Johnson, L., Savage, D., Cloet, V., Schneider, J. & Senger, R. (2016a): High-level waste repository-induced effects. Nagra Technical Report NTB 14-13.
- Leupin, O.X., Smith, P., Marschall, P., Johnson, L., Savage, D., Cloet, V., Schneider, J. & Senger, R. (2016b): Low- and intermediate-level waste repository-induced effects. Nagra Technischer Bericht NTB 14-14.
- Martin, L., Kosakowski, G., Papafotiou, A. & Smith P.A. (2023) Evolution of the sealing system porosity and its impact on performance. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-21.
- Nagra (2002): Projekt Opalinuston: Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse – Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Technischer Bericht NTB 02-03.
- Nagra (2005): Geologische Tiefenlagerung der abgebrannten Brennelemente, der hochaktiven und langlebigen mittelaktiven Abfälle: Darstellung und Beurteilung der aus sicherheitstechnisch-geologischer Sicht möglichen Wirtgesteine und Gebiete. Nagra Technischer Bericht NTB 05-02.

- Nagra (2008): Vorschlag geologischer Standortgebiete für ein SMA- und ein HAA-Lager: Geologische Grundlagen. Textband. Nagra Technischer Bericht NTB 08-04.
- Nagra (2014): SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Geologische Grundlagen (Dossiers I – VIII). Nagra Technischer Bericht NTB 14-02.
- Nagra (2019): Implementation of the Full-scale emplacement Experiment at Mont Terri: Design, Construction and Preliminary Results. Nagra Technical Report NTB 15-02.
- Nagra (2020): Standortunabhängiger Vergleich eines Kombilagers mit zwei Einzellagern hinsichtlich Bau- und Betriebsabläufe sowie Umwelt. Nagra Arbeitsbericht NAB 19-15.
- Nagra (2021a): Entsorgungsprogramm 2021 (EP21). Nagra Technischer Bericht NTB 21-01.
- Nagra (2021b): Konzept erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag (EUU). Nagra Arbeitsbericht NAB 21-14.
- Nagra (2021c): Pilot Repository Monitoring: First Concept Report. Nagra Arbeitsbericht NAB 21-11.
- Nagra (2021d): The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland. Nagra Technical Report NTB 21-02.
- Nagra (2021e): Verschlusskonzept für ein geologisches Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 21-12.
- Nagra (2022): Rückholungskonzept für ein geologisches Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 21-13.
- Nagra (2024a): Post-Closure Safety Report. Nagra Technical Report NTB 24-10 Rev. 1.
- Nagra (2024b): Anlagen- und Betriebskonzept für das geologische Tiefenlager. Nagra Technischer Bericht NTB 24-11.
- Nagra (2024c): Safety and Repository Concept and Provisional Design. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-18 Rev. 1.
- SEFV (2007): Verordnung über den Stilllegungsfonds und den Entsorgungsfonds für Kernanlagen (Stilllegungs- und Entsorgungsfondsverordnung, SEFV) vom 7. Dezember 2007, Stand am 1. Januar 2020. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.17, Schweiz.
- 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.
- UVG (1981): Bundesgesetz über die Unfallversicherung (UVG) vom 20. März 1981, Stand am 1. Juli 2021. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 832.20, Schweiz.

Anhang A: Auflage 5.4 Verschlussvarianten

Die Nagra hat im Entsorgungsprogramm 2021 als Vorarbeit zur Erstellung eines Konzepts für das Rahmenbewilligungsgesuch mögliche Verschlussvarianten aufzuzeigen und zu vergleichen.

Für das Rahmenbewilligungsgesuch wird gemäss Art. 23 KEV u.a. ein Konzept für den Verschluss des geologischen Tiefenlagers in der Schweiz gefordert. Der Plan für den Verschluss wird gemäss Art. 16 Abs. 1 Bst. e KEG und Art. 24 KEV dagegen erst für die Baubewilligung benötigt. Zum Verschlusskonzept gehört die Entwicklung eines nach dem Stand der Technik und Wissenschaft zweckmässigen Systems, welches robust ist und in Anbetracht des langen Zeithorizonts bis zum definitiven Verschluss einen angemessenen Handlungsspielraum zur Berücksichtigung späterer Optimierungen bietet.

Die Einhaltung bzw. Sicherstellung der Langzeitsicherheit ist die wichtigste Anforderung an das zu erarbeitende Konzept und somit an das Verschlussystem. Die sukzessive Verfüllung und Versiegelung der Lagerstollen/-kavernen, der Zugangsbauwerke und der abschliessende Gesamtverschluss des geologischen Tiefenlagers für radioaktive Abfälle sind mehrheitlich Bestandteile des Mehrfachbarrierensystems und tragen dazu bei, dass der Transport von Radionukliden aus den untertägigen Anlagenelementen verhindert bzw. minimiert wird.

Als Vorarbeit zum geforderten Konzept für das RGB und im Hinblick auf die Bundesratsauflage 5.4 hat die Nagra einen Hintergrundbericht (Nagra 2021e) erarbeitet. Dieser Bericht beschreibt ein standortunabhängiges Verschlusskonzept. Es werden die wichtigsten gesetzlichen Vorgaben, die an den Verschluss gestellt werden, erörtert und die Anforderungen aus der Langzeitsicherheit an den Verschluss stufengerecht beschrieben. Aus den übergeordneten Anforderungen werden Auslegungs- und Dimensionierungsgrundsätze für die Konzipierung des Verschlusses abgeleitet. Mit diesen Grundsätzen werden Konzepte für alle Versiegelungsbauwerke erarbeitet und diese für den jeweiligen Einsatzort (Lagerkammern, Lagerfelder und Zugangsbauwerke) grob vordimensioniert. Es werden unterschiedliche bautechnische Varianten für die Ausführung der Versiegelungen entwickelt, die zusammen ein breites Spektrum zu erwartender geologischer Randbedingungen abdecken und zur Erfüllung von Sicherheitsfunktionen der Langzeitsicherheit beitragen. Geotechnischen Gefährdungen wird dadurch so begegnet, dass Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit vermieden werden.

Die Planung des zeitlichen Ablaufs des Verschlusses, für den gemäss Bundesratsauflage 5.4 Varianten untersucht werden sollen, muss sich in den Realisierungsplan des Kombilagers (Nagra 2021a) einfügen und den Anforderungen der Langzeitsicherheit, der Betriebssicherheit und des Strahlenschutzes Rechnung tragen. Aus Sicht der Langzeitsicherheit ist es wünschenswert, möglichst schnell eine passive Sicherheit herzustellen, d. h. das Tiefenlager zu verfüllen und Versiegelungsbauwerke zu errichten. Für den Strahlenschutz und die Betriebssicherheit ist dies ebenfalls vorteilhaft. Für die HAA-Lagerstollen ist die Versiegelung unmittelbar nach Einlagerungsende vom ENSI vorgeschrieben (Art. 7.3a ENSI-G03, ENSI 2020b). Aus Sicherheitsüberlegungen ist ein identisches Vorgehen auch für die SMA-Lagerkavernen vorgesehen. Der Anforderung, die Rückholung "ohne grossen Aufwand" sicherzustellen, wird ebenfalls Rechnung getragen. Solange das geologische Tiefenlager zugänglich ist, bleibt der Aufwand zum Entfernen von errichteten Verfüllungen und Versiegelungen im Vergleich zum Gesamtaufwand für eine Rückholung klein.

Die im KEG vorgeschriebene Beobachtungsphase (Planungsannahme: Dauer ca. 50 Jahre) dient der Überwachung ausgewählter Aspekte des Sicherheitsnachweises. Die Beobachtung findet im Wesentlichen in den Kontrollstollen der HAA- und SMA-Pilotlager statt, die während des gesamten Beobachtungszeitraums zugänglich bleiben. Verschlussvarianten umfassen daher nur verschiedene Verschlusszeitpunkte für die HAA- und SMA-Lagerfeldzugänge und für die Zugänge zu den Pilotlagern.

Es ist eine erste Beobachtungsphase vorgesehen, für die als Planungsannahme im EP21 eine Dauer von ca. 10 Jahren postuliert wird. In dieser ersten Beobachtungsphase werden die Lagerfeldzugänge bis zu den Versiegelungen der Lagerkammern offengehalten und die dortigen Versiegelungen beobachtet. Nach erfolgreichem Abschluss dieser ersten Phase werden die Lagerfeldzugänge verfüllt und versiegelt. Eine Verlängerung oder Verkürzung der ersten Beobachtungsphase ist prinzipiell möglich und hat grundsätzlich keinen Einfluss auf die Langzeitsicherheit. Der Strahlenschutz ist zu jedem Zeitpunkt aufgrund des frühzeitigen Verschlusses der Lagerkammern sichergestellt. Ein regulärer Unterhalt der noch offenen untertägigen Bauwerke trägt zur Betriebssicherheit bei.

Im Hintergrundbericht werden in Anlehnung an die Bundesratsaufgabe 5.4 die im EP21 dargestellten Planungsannahmen mit Varianten verglichen. Nach heutiger Einschätzung stellt der Ablauf zum Verschluss des geologischen Tiefenlagers, wie er im Realisierungsplan (Nagra 2021b) dargestellt ist, die derzeit beste Lösung dar, da er unterschiedliche Anforderungen abgewogen berücksichtigt. Im Laufe der weiteren Konzeptentwicklung bis zum RBG und darüber hinaus werden weitere Varianten untersucht, und das Konzept wird optimiert.

Anhang B: Anforderungen und Planungsannahmen an die bauliche Umsetzung

Für die bauliche Umsetzung gelten folgende Anforderungen:

1. Handhabung der Materialien

Anforderung: Sämtliche Verfüll- und Versiegelungsmaterialien sind so zu transportieren und zu lagern, dass die geforderten Eigenschaften gewährleistet werden.

Massnahme: Um die quellfähigen Baumaterialien mit dem erforderlichen Quellpotenzial einzubauen, muss eine trockene Lagerung sowie ein Transport bei geringer Luftfeuchtigkeit bzw. in dichter Verpackung sichergestellt werden.

2. Vollständige Hohlraumverfüllung mit geforderter minimaler Raumdichte und Homogenität pro Element oder Strecke

Anforderung: Sämtliche Verfüll- und Versiegelungsmaterialien sind so einzubringen, dass keine Hohlräume verbleiben, die geforderte minimale Raumdichte pro Streckenabschnitt erreicht wird und die Verdichtung über den Querschnitt möglichst homogen ist.⁴³

Massnahme: Voraussetzungen für einen zuverlässigen Einbau sind neben einer guten Zugänglichkeit für Einbring- und Verdichtungsgeräte – sofern möglich (siehe Kapitel 5) – eine gleichmässige Ausbruchlaibung ohne grosse Sprünge und Einbauten.

3. Standsicherheit und Auflockerung der Tunnellaibung

Anforderung: Die Laibung bzw. die Umgrenzungslinie des Hohlraums muss während des Einbaus von Verschlusskomponenten in ihrer Lage stabil und standsicher sein (d. h. zu keinen bzw. nur sehr kleinen Deformationen führen und eine ausreichende Sicherheit gegen Niederbrüche gewähren). Ausbruchsnähe stark aufgelockerte Gebirgsbereiche sind möglichst zu minimieren.

Massnahmen: Ungesicherte Längen bzw. Flächen sind entsprechend den Gebirgsverhältnissen so zu wählen, dass der Opalinuston für die Dauer des Einbaus der Verschlusskomponente standfest bleibt. Durch die Auslegung der verbleibenden Ausbauelemente sind die Gebirgsverformungen während des Einbaus der Verschlusskomponenten zu minimieren. Bauverfahren und Massnahmen sind so zu wählen, dass im Bereich der Verschlusskomponenten stark aufgelockertes Gebirge minimiert wird.

⁴³ Die Erfüllung dieser Anforderung ist in horizontalen bzw. subhorizontalen untertägigen Strecken, besonders bei trocken einzubringenden Schüttmaterialien, anspruchsvoll. In Schächten ist der Einbau von Hohlraumverfüllungen deutlich leichter und mit kleinerem Aufwand zu realisieren.

4. Ebene und saubere Oberfläche der Umgrenzungsfläche des Hohlraums

Anforderung: Die Oberfläche der Umgrenzungsfläche soll eben, frei von losen Bestandteilen und trocken sein.

Massnahmen: Grosse Unebenheiten oder Absätze erschweren den vollständigen und verdichteten Einbau von Schüttmaterial. Lose Bestandteile sind vor dem Einbau zu entfernen. Trockenheit kann im Opalinuston vorausgesetzt werden.

5. Lichtraumprofil und Zugänglichkeit

Anforderung: Ausreichendes Lichtraumprofil und Zugänglichkeit für den Einbau der Verfüllung unter Wahrung der Arbeitssicherheit und des Gesundheitsschutzes

Massnahmen: Der betriebssichere Zugang mindestens von einer Seite zur Verfüll- bzw. Einbaufront ist zu gewährleisten. Die Arbeitsfront muss sonderbelüftet werden.

6. Dauerhaftigkeit des Ausbaus/ Verhalten der mechanischen Stützung der Verfüllung

Anforderung: Der Ausbau der Verfüllstrecken erfüllt die Stützwirkung so lange, bis die hohe Schüttdichte oder der Quelldruck der Verfüllung die Stützwirkung übernimmt.

Massnahmen: Die Nutzungsdauer des Ausbaus muss so ausgelegt werden, dass der Ausbau die Stützwirkung aufrechterhält, bis der entsprechende Abschnitt verfüllt und durch ein Widerlager begrenzt wird. Die erreichbare mittlere Schüttdichte der Verfüllung in den horizontalen Tunneln ist limitiert. Aber selbst wenn die Ausbruchsicherung versagt, bevor ein Quelldruck aufgebaut ist, lässt sich die Verfüllung bei den erwarteten Spannungsverhältnissen nicht wesentlich weiter verdichten, als es beim Einbau technisch möglich ist. Für den Fall, dass der Ausbau versagt, bevor ein Quelldruck aufgebaut ist, verengt sich daher der Hohlraum nur geringfügig, bis wieder ein Gleichgewicht mit der Verfüllung erreicht wird.

7. Quellfähiges Dichtelement

Anforderung: Das Material des Dichtelements muss, um die dichtende und langfristig gebirgsstützende Wirkung zu erreichen, quellfähig sein.

Massnahmen: Einsatz eines tonreichen Materials und Gewährleistung eines ausreichenden, gleichmässigen Feuchtigkeitseintrags. Siehe auch Überlegungen unter Punkt 1 und Punkt 2.

8. Kontrollierte Klima- bzw. Feuchtigkeitsverhältnisse während des Einbaus der Dichtelemente

Anforderung: Die Luftfeuchtigkeit ist konstant so gering zu halten, dass tonreiches Versiegelungs- und Verfüllmaterial nicht vor oder während des Einbaus zu quellen beginnt.

Massnahmen: Geeignete klimatische Bedingungen sind durch das Lüftungs- und Kühlungskonzept zu gewährleisten. Eine entsprechende maximal zulässige Luftfeuchtigkeit wurde beispielsweise im FE-Experiment im Felslabor Mont Terri für vorgefertigte Bentonitblöcke (Nagra 2019) ermittelt. Es ist aber zu beachten, dass die Entfeuchtung nicht dazu führen darf, dass der Opalinuston übermässig austrocknet.

9. Anforderungen an die Materialisierung

Anforderungen: Es dürfen nur Einbaumaterialien verwendet werden, welche die Anforderungen aus der Langzeitsicherheit erfüllen. Die Komponenten des Verschlusssystems sollen geeignete geochemische Eigenschaften aufweisen, welche sowohl mit dem jeweils angrenzenden Gesteinsbereich als auch mit den jeweils angrenzenden technischen Komponenten über den gesamten Betrachtungszeitraum verträglich sind (siehe Abschnitt 2.6).

Massnahmen: Für die Komponenten des Verschlusses sollen bewährte, ausreichend verfügbare Materialien sowie bewährte Einbaumethoden und -geräte verwendet werden. Die Beurteilung, was an dieser Stelle unter "bewährt" zu verstehen ist, darf jedoch nicht zu unzweckmässigen Einschränkungen führen. Sonderanfertigungen, Neu- und Weiterentwicklungen sind grundsätzlich möglich. Die Eignung wird in vorgesehenen Demonstrationen in den Testbereichen nachgewiesen (Nagra 2021b). Technische Fortschritte bis zum tatsächlichen Einsatz in einigen Jahrzehnten sind sukzessive zu berücksichtigen und zu begrüssen.

10. Vermeidung Kolloidmobilisierung infolge Wassersickerpfade

Anforderung: Der Aufbau der Versiegelungsbauwerke hat sicherzustellen, dass bei einem Druckgradienten kein tonreiches Dichtmaterial durch Mobilisierung ausgewaschen werden kann.

Massnahmen: Dies kann durch eine gleichmässige Beaufschlagung der Wasserdrücke auf den Bauwerksquerschnitt erreicht werden (z. B. durch Übergangsschichten inkl. Filterschichten bzw. Äquipotenzialschichten). Die Entstehung von präferierten Fliesspfade ("Fingering") können durch in regelmässigen Abständen eingebaute Filterschichten unterbunden werden.

11. Widerstand gegen lager- und portalseitige Lasten

Anforderung: Das Versiegelungsbauwerk soll sowohl portalseitigen Lasten, z. B. infolge eines anstehenden Wasserdrucks, als auch lagerseitigen Lasten infolge des Quellens der Verfüllung des Versiegelungsbauwerks bzw. der Lagerkammern und Lagerzugänge standhalten.

Massnahmen: Um sowohl die portal- als auch die lagerseitigen Lasten in das Wirtgestein abzuleiten, sind entsprechende Widerlager zu errichten.