

Arbeitsbericht NAB 21-13

**Rückholungskonzept für ein
geologisches Tiefenlager**

November 2022

Arbeitsbericht NAB 21-13

Rückholungskonzept für ein geologisches Tiefenlager

November 2022

STICHWÖRTER

gTL, Rückholung, Konzept

Nationale Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle
Hardstrasse 73
Postfach
5430 Wettingen
Telefon 056 437 11 11
www.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.

Copyright © 2022 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.

Zusammenfassung

Das geologische Tiefenlager soll den langfristigen Einschluss radioaktiver Abfälle sicherstellen. Es ist so auszulegen, dass es sicher gebaut, betrieben und verschlossen werden kann. Das Tiefenlagerkonzept sieht zusätzlich vor, die Rückholung von Abfällen zu ermöglichen, falls unerwartete Entwicklungen dazu führen, dass der Sicherheitsnachweis nicht mehr erbracht werden kann. Als letzte Instanz ordnet das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) in diesem Fall die Rückholung an.

Das Kernenergiegesetz (KEG) schreibt vor, dass für geologische Tiefenlager eine Betriebsbewilligung nur dann erteilt werden kann, wenn die Rückholung der radioaktiven Abfälle bis zu einem allfälligen Verschluss ohne grossen Aufwand möglich ist. Die Kernenergieverordnung (KEV) hält zudem fest, dass vor der Inbetriebnahme die konkrete Umsetzung vor Ort zu demonstrieren ist.

Mit dem Rahmenbewilligungsgesuch ist gemäss Vorgaben des ENSI das vorliegende Konzept zur Rückholung der radioaktiven Abfälle einzureichen. Das Konzept zeigt auf, wie die gemäss heutigem Lagerkonzept in verfüllten Lagerkammern eingelagerten Abfälle zurückgeholt werden können.

Die geordnete Einlagerung der radioaktiven Abfälle erfolgt in Endlagerbehältern in ein dafür gebautes Tiefenlager, so dass Ort, Lage und Zustand auch zukünftig zuverlässig bekannt sind. Die Auslegung der Behälter und die sorgsamsten Handhabungsvorgänge während der Einlagerung stellen sicher, dass die Integrität der Behälter für den zu betrachtenden Rückholungszeitraum und darüber hinaus erhalten bleibt. Die fortlaufende Verfüllung und Versiegelung der Lagerkammern mit der Einlagerung der Abfälle wird dabei so vorgenommen, dass die Abfälle schnell in einer passiven Sicherheit eingeschlossen sind.

Nach Abschluss der Einlagerung werden das geologische Tiefenlager weiter – nach heutiger Planung 50 Jahre lang - beobachtet und Daten als Entscheidungsgrundlage für den Verschluss des Gesamtlagers erfasst. Mit der geordneten Einlagerung und dem Verschluss in Etappen werden die Anforderungen erfüllt, dass die Langzeitsicherheit gewährleistet und eine Rückholung ohne grossen Aufwand möglich (KEV) ist. Der Verschluss des Gesamtlagers wird nur durch den Bundesrat angeordnet, sofern der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet (KEG) ist. Auch danach ist die Rückholung möglich, allerdings mit höherem Aufwand.

Für die Entwicklung des Konzepts wurde der Rückholungszeitpunkt unmittelbar vor Verschluss des Gesamtlagers gewählt. Dies ist der Zeitpunkt der anspruchsvollsten Bedingungen für eine Rückholung im Nachweiszeitraum und somit eine abdeckende Planung für alle früheren Zeitpunkte.

Bis zum Verschluss des Tiefenlagers kann für die Rückholung die bestehende Infrastruktur – insbesondere der Zugang von der Oberfläche – genutzt werden. Die Rückholung bedeutet grundsätzlich die Umkehr der Einlagerung. Die Umsetzung kann deshalb auf die Erfahrungen und die bewährte Technik aus der Einlagerung zurückgreifen. Dem aktuellen Rückholungskonzept wurde ausschliesslich heute zur Verfügung stehende Technik zugrunde gelegt. Das Konzept zeigt auf, mit welchen Geräten und welchem Vorgehen die Rückholung im heutigen Lagerkonzept umgesetzt würde und welche technischen Herausforderungen zu berücksichtigen sind. Es wird zukünftig stufengerecht weiterentwickelt und dabei den Fortschritt von Wissenschaft und Technik adäquat berücksichtigen.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
Figurenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
1.1 Einordnung des Berichts.....	1
1.2 Ziel des Berichts und Abgrenzung	1
1.3 Aufbau des Berichts.....	2
2 Grundlagen.....	3
2.1 Ursprung der Anforderungen zu Überwachung und Rückholung ohne grossen Aufwand bis zum Verschluss	3
2.2 Überwachungstechnische Schritte (Monitoring) bis zum Verschluss des Gesamtlagers	3
2.3 Gesetzliche und regulatorische Grundlagen	4
2.4 Kurzbeschrieb der wichtigsten planerischen Schritte.....	5
3 Grundlagen Lagerkonzept.....	7
3.1 Lagerarchitektur des geologischen Tiefenlagers	7
3.2 Endlagerbehälter SMA und HAA.....	9
3.3 Verfüllung der Lagerkammer und Verschluss des gTL.....	12
3.3.1 Verfüllung der Lagerkammern	13
3.3.2 Versiegelungsbauwerke.....	15
3.3.3 Verfüllung der Lagerfeldzugänge.....	16
4 Betrachteter Rückholungszeitpunkt und relevante Zustandsgrössen	17
4.1 Betrachteter Rückholungszeitpunkt.....	17
4.2 Randbedingungen des Strahlenschutzes bei der Rückholung.....	19
4.3 Relevante Zustandsgrössen während der Rückholung	20
5 Konzept für die Durchführung der Rückholung.....	23
5.1 Vorbereitende Arbeiten	23
5.2 Rückholung der HAA-Endlagerbehälter	26
5.2.1 Gerätschaften für die HAA-Rückholung	27
5.2.2 Freilegen und Entnahme der HAA-ELB aus den verfüllten Lagerstollen	32
5.2.3 Umladen eines HAA-ELB (Schleuse) und Transport an die Oberfläche	35
5.3 Rückholung der SMA-Endlagerbehälter	38
5.3.1 Gerätschaften für die SMA-Rückholung	38
5.3.2 Freilegen und Entnahme der SMA-ELB aus den verfüllten Lagerkavernen (Kalotte).....	44

5.3.3	Transport von SMA-ELB an die Oberfläche (Kalotte), Sicherung des Kavernengewölbes und Wiederholung der Schritte zur vollständigen Räumung (Kalotte)	48
5.3.4	Freilegen und Entnahme der SMA-ELB aus den verfüllten Lagerkavernen (Strosse).....	50
5.3.5	Transport von SMA-ELB an die Oberfläche und Wiederholung der Schritte zur vollständigen Räumung (Strosse).....	55
5.4	Umgang mit Störungen (Ausblick).....	55
6	Fazit und Ausblick	57
7	Literaturverzeichnis	59
8	Glossar	61
Anlage A	Gesetzliche und regulatorische Grundlagen	A-1
A.1	Weitere Erläuterungen zu Kapitel 2.3.....	A-1
Anlage B	Beobachtung und Verschluss in Etappen	B-1

Tabellenverzeichnis

Tab. 4-1:	Planungsannahmen zum Lagerzustand relevanter Elemente.....	20
Tab. 5-1:	Anlagen und Gerätschaften für die vorbereitenden Arbeiten	24
Tab. 5-2:	Zusammenfassung der erforderlichen Gerätschaften für die Rückholung der HAA-ELB.....	27
Tab. 5-3:	Zusammenfassung der erforderlichen Gerätschaften für die Rückholung SMA.....	38

Figurenverzeichnis

Fig. 3-1:	Systemskizze für die untertägigen Anlagenelemente und Bauten eines Kombilagers.....	8
Fig. 3-2:	Kombilager mit Lagerkavernen links (SMA) und Lagerstollen rechts (HAA)	9
Fig. 3-3:	Endlagerbehälter SMA	10
Fig. 3-4:	Endlagerbehälter HAA	11
Fig. 3-5:	Lage der Verschlussbauwerke in der Lagerarchitektur	12
Fig. 3-6:	Einlagerungsmodul analog FE-Experiment, Felslabor Mont Terri	13
Fig. 3-7:	Darstellung der Verfüllung in den HAA-Lagerstollen	13
Fig. 3-8:	Verfüllung der Lagerkaverne während der Einlagerung in der Strosse.....	14
Fig. 3-9:	Darstellung einer eingelagerten und verfüllten SMA-Lagerkaverne.....	15
Fig. 3-10:	Generischer Aufbau der Versiegelungsbauwerke.....	16
Fig. 4-1:	Zustand des Kombilagers zum Zeitpunkt vor dem Verschluss des Gesamtlagers	18
Fig. 5-1:	Erstellung einer Erkundungsbohrung am Beispiel einer SMA-Kaverne.....	25
Fig. 5-2:	Fortlaufender Einbau einer Ausbruchsicherung im Bereich des geräumten Dichtelements	26
Fig. 5-3:	Übersicht der Arbeitsmodule (inkl. Antriebsmodul) für die Rückholung im HAA-Lagerstollen	29
Fig. 5-4:	Übersicht der Geräte für das Umladen und den Transport von HAA-ELB.....	30
Fig. 5-5:	Motorisierte Fahrzeuge zum Bewegen von Geräten, Modulen und Plattformwagen.....	30
Fig. 5-6:	Beispielhafte Darstellung der Logistikflächen während der HAA-Rückholung.....	31
Fig. 5-7:	Situationsansicht von Windenfahrzeug, Antriebsmodul und Baggermodul im Lagerstollen	32
Fig. 5-8:	Abbaggern der Lagerstollenverfüllung zum Freilegen der HAA-ELB	33
Fig. 5-9:	Einsatz des Bohrmoduls zur Auflockerung des Bentonits.....	34
Fig. 5-10:	Greifen des HAA-ELB im Längs- und Querschnitt	35
Fig. 5-11:	Ausgangssituation für das Durchführen des Umladens im Umladebereich.....	35
Fig. 5-12:	Umladen des HAA-ELB in den SOB auf den Plattformwagen mittels Teleskopzylinderwagen.....	36
Fig. 5-13:	Zugmaschine im Umladebereich für den Abtransport des HAA-ELB im SOB auf Plattformwagen.....	37
Fig. 5-14:	Gerätschaften für die Rückholung der SMA-ELB (Arbeitsgeräte)	40
Fig. 5-15:	Gerätschaften für die Rückholung der SMA-ELB (Transport Teil 1).....	41
Fig. 5-16:	Gerätschaften für die Rückholung der SMA-ELB (Transport Teil 2).....	42

Fig. 5-17:	Darstellung Einbau Ausbruchsicherung: Sequenz vollständig geräumter Übernahmebereich.....	43
Fig. 5-18:	Beispielhafte Darstellung eines Geräteinsatzes in der Kalotte (Platzverhältnisse).....	44
Fig. 5-19:	Darstellung Freilegen der SMA-ELB in der Kalotte: Abbruch Mörtel Firste und Stösse.....	44
Fig. 5-20:	Darstellung Freilegen der SMA-ELB in der Kalotte: Sägen des Spalts zwischen SMA-ELB.....	45
Fig. 5-21:	Darstellung Überblick Platzverhältnisse Kräne (Längsschnitt).....	46
Fig. 5-22:	Installation Übernahmekran im Übernahme- und Umladebereich	46
Fig. 5-23:	Darstellung Greifgehänge am Übernahmekran im Umladebereich.....	47
Fig. 5-24:	Entnahme SMA-ELB in der Kalotte und Umladen im Übernahmebereich.....	48
Fig. 5-25:	Transport von SMA-ELB zum Schacht.....	48
Fig. 5-26:	Darstellung Sicherung des Kavernengewölbes.....	49
Fig. 5-27:	Endzustand nach der SMA-Rückholung in der Kalotte.....	49
Fig. 5-28:	Beispielhafte Darstellung eines Geräteinsatzes in der Strosse (Platzverhältnisse).....	50
Fig. 5-29:	Abbruch Mörtelschicht zum Freilegen der obersten ELB-Reihe (Strosse)	51
Fig. 5-30:	Bohrung der Systemankerung für die Sicherung der Kranbahnaufleger	51
Fig. 5-31:	Darstellung Abfolge der Schnitte durch Mörtel und Reihenfolge der Rückholung.....	52
Fig. 5-32:	Durchführen der Sägearbeiten in den Spalten zwischen den SMA-ELB in der Strosse.....	53
Fig. 5-33:	Absenken einer Grube im Übernahmebereich.....	53
Fig. 5-34:	Einbau und Installation Kavernenkran	54
Fig. 5-35:	Darstellung Abtransport der SMA-ELB aus der Strosse	54
Fig. B-1:	Realisierungsplan für ein Kombilager	B-1
Fig. B-2:	Fortschritt Verschluss nach fertiger Einlagerung und Beginn Beobachtungsphase Teil 1	B-2
Fig. B-3:	Fortschritt Verschluss nach Ende der Beobachtungsphase Teil 1 mit dem Hauptverschluss.....	B-3
Fig. B-4:	Endgültiger Zustand des gTL nach dem Verschluss des Gesamtlagers	B-5

Abkürzungsverzeichnis

ELB	Endlagerbehälter
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
EP	Entsorgungsprogramm
EUU	Erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag
FE	FE-Experiment (<i>Full-Scale Emplacement Experiment</i>) im Felslabor Mont Terri
gTL	Geologische(s) Tiefenlager
HAA	Hochaktive Abfälle (abgebrannte Brennelemente und hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung)
KEG	Kernenergiegesetz
KEV	Kernenergieverordnung
M1-Mörtel	Hochpermeabler Monokorn-Mörtel
RBG	Rahmenbewilligungsgesuch
SEFV	Stilllegungs- und Entsorgungsfondsverordnung
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle
SOB	Shuttle-Overpack-Behälter
StSV	Strahlenschutzverordnung
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr Energie und Kommunikation
Vx	Versiegelungsbauwerk x
VFx	Verfüllung x
Zwilag	Zwischenlager Würenlingen AG

1 Einleitung

1.1 Einordnung des Berichts

Das Kernenergiegesetz (KEG) schreibt die Entsorgung aller radioaktiven Abfälle der Schweiz in geologischen Tiefenlagern vor (KEG 2003). Die Realisierung erfolgt in einem mehrstufigen Bewilligungsverfahren, beginnend mit der Rahmenbewilligung (Art. 12 KEG 2003). Mit ihr werden Standort, Zweck der Anlage und Grundzüge des Projekts festgelegt. Weitergehende Festlegungen erfolgen stufengerecht in späteren Bewilligungsschritten. Das Auswahlverfahren für die Bezeichnung von Lagerstandorten erfolgt vorgängig zum Rahmenbewilligungsverfahren gemäss dem vom Bundesrat verabschiedeten Sachplan geologische Tiefenlager SGT (BFE 2011). In der laufenden Etappe 3 hat die Nagra die drei Standortgebiete Jura Ost, Nördlich Lägern und Zürich Nordost vertieft untersucht und bereitet ein Rahmenbewilligungsgesuch (RBG) für ein Kombilager in Nördlich Lägern mit den Oberflächenanlagen am Standort Haberstal vor. Die Verpackung der Abfälle in Endlagerbehälter soll am Standort Zwilag erfolgen.

Die vorgeschriebenen Unterlagen für ein RBG umfassen Berichte zur Sicherheit und Sicherung, zur Umweltverträglichkeit, zur Abstimmung mit der Raumplanung, zur Überwachung und Beobachtungsphase, zum Verschluss des Tiefenlagers, zur Stilllegung der Oberflächenanlage sowie zur Begründung der Standortwahl (Art. 23 & 62 KEV 2004). Weiter ist das RBG gemäss den Vorgaben des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats (ENSI) für Etappe 3 (ENSI 2018) zu begründen. Die Gesuchsunterlagen zum RBG stützen sich auch auf Referenzberichte, die teilweise vor Einreichung des RBG veröffentlicht werden.

Der vorliegende Bericht stellt solch einen frühzeitig veröffentlichten Referenzbericht dar und beschreibt das Konzept zur Rückholung für ein Kombilager. Das Konzept gilt für alle standortspezifischen Lagerprojekte, die gemäss ENSI 2018 dem Standortvergleich und den Sicherheitsnachweisen zugrunde liegen.

1.2 Ziel des Berichts und Abgrenzung

Das KEG (Art. 37 Abs.1 Bst. b KEG 2003) sieht vor, dass für ein geologisches Tiefenlager (gTL) eine Betriebsbewilligung erteilt werden kann, *wenn [...] die Rückholung der radioaktiven Abfälle bis zu einem allfälligen Verschluss ohne grossen Aufwand möglich ist.*

Der vorliegende Bericht beschreibt ein Rückholungskonzept für die Abfälle im geologischen Tiefenlager (gTL) im Opalinuston und zeigt, wie diese Bedingung bis zum Verschluss erfüllt werden kann.

Inhalt und Aufbau des Rückholungskonzepts richten sich nach der ENSI-Richtlinie G03 für geologische Tiefenlager (Kap 7.4.2 Bst. a ENSI 2020b). Diese gibt vor, dass mit *dem RBG ein Konzept zur allfälligen Rückholung der radioaktiven Abfälle einzureichen* ist. Das [...] *Konzept für eine allfällige Rückholung der radioaktiven Abfälle ohne grossen Aufwand beschreibt die Art und Weise des Vorgehens in den Grundzügen* (Zu Kap. 7.4.2 Bst. a ENSI 2020a). Mit dem vorliegenden Konzept soll dabei gezeigt werden, welche *planerischen, logistischen, baulichen und überwachungstechnischen Schritte* notwendig sind, um eine allfällige Rückholung bis zum Verschluss durchführen zu können (vgl. Kap. 7.4.2 Bst. a ENSI 2020b).

Schwerpunkt der Konzeptentwicklung ist die Entnahme der Abfallbehälter aus den verfüllten Lagerkammern mit heute zur Verfügung stehender Technik. Der dafür notwendige Rückbau der Verschlussbauwerke bis zu den Lagerkammern wird ebenfalls beschrieben. Das Verladen der Abfälle in Transportbehälter und der Transport an die Oberfläche ist vergleichbar mit den Vorgängen bei der Einlagerung und wird daher nur grob beschrieben.

Die Nacharbeiten nach erfolgter Rückholung zur Überführung des Tiefenlagers in einen mit den Behörden zu definierenden Zustand wird im vorliegenden Bericht nicht behandelt.

Der Rücktransport von Abfallbehältern an die Oberfläche während des Einlagerungsbetriebs stellt keine Rückholung dar und wird daher im Rahmen der Betriebs- und Störfallkonzepte betrachtet.

1.3 Aufbau des Berichts

Im Kapitel 2 werden die relevanten gesetzlichen und regulatorischen Grundlagen der Rückholung erläutert. Zudem erfolgt eine Beschreibung der Tiefenlagerung mit der Möglichkeit der Rückholung und erklärt die überwachungstechnischen Schritte im Rahmen der Beobachtung während der Einlagerung und der Verschlussphasen. Abschliessend werden die groben planerischen Schritte für eine Rückholung bis zum Verschluss des Gesamtlagers erläutert.

Im Kapitel 3 wird das Lagerkonzept des geologischen Tiefenlagers beschrieben. Damit die Langzeitsicherheit nachgewiesen werden kann, muss das Lagerkonzept so aufgebaut sein, dass die zukünftige Entwicklung des Lagers den Erwartungen entsprechend prognostiziert werden kann. Die dafür nötige systematische und geordnete Einlagerung führt dazu, dass für die Rückholung Lage, Ort und Zustand der radioaktiven Abfälle und ihrer Umgebung im Betrachtungszeitraum gut bekannt sind. Im Kapitel werden daher die Architektur des Kombilagers, die Endlagerbehälter (ELB) für hoch- sowie schwach- und mittelaktive Abfälle (HAA und SMA), die Verfüllung der Lagerkammer und die Verschlussbauwerke beschrieben. In Anlage B wird zudem der zeitliche Ablauf von Bau, Einlagerung, Überwachung (Beobachtung) und Verschluss des Lagers gezeigt.

Kapitel 4 definiert den betrachteten Zeitpunkt für das vorliegende Rückholungskonzept, nennt relevante Randbedingungen des Strahlenschutzes (HAA und SMA) und erörtert Annahmen zu relevanten Zustandsgrössen der Endlagerbehälter, der Verschlussbauwerke (Versiegelungen und Verfüllungen), der Verfüllungen der Lagerkammern und der Tragwerke der untertägigen Bauten zum Zeitpunkt der Rückholung.

Im Hauptteil des Berichts werden im Kapitel 5 die vorbereitenden Arbeiten und die Konzepte für die Durchführung Rückholung der Endlagerbehälter aus den verfüllten Lagerkammern im Lagerkonzept (Kapitel 3) aufgezeigt.

Der Bericht schliesst mit einem Fazit und einem Ausblick (Kapitel 6) ab. Im Ausblick wird erläutert, wie das Rückholungskonzept über die Realisierungsschritte bis zum Verschluss des Gesamtlagers weiterentwickelt wird.

2 Grundlagen

Dieses Kapitel beschreibt die Grundlagen der geologischen Tiefenlagerung mit dem Ablauf der Beobachtung (überwachungstechnische Schritte) und der Möglichkeit einer Rückholung ohne grossen Aufwand bis zum allfälligen Verschluss. Daraufgehend werden die gesetzlichen Vorgaben und Richtlinien im Kontext zur Rückholung erläutert. Zudem werden die wichtigsten planerischen Schritte einer Rückholung gezeigt.

2.1 Ursprung der Anforderungen zu Überwachung und Rückholung ohne grossen Aufwand bis zum Verschluss

In der Schweiz ist die geologische Tiefenlagerung als Entsorgungskonzept für alle radioaktiven Abfälle im Kernenergiegesetz seit 2003 vorgegeben (Art. 3 & 31 KEG 2003). Als Grundlage für diese gesetzliche Vorgabe legte im Jahr 2000 die vom Eidgenössischen Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) eingesetzte Arbeitsgruppe EKRA (Experten-Gruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle) ihren Schlussbericht vor (EKRA 2000). Die Arbeitsgruppe hatte die Aufgabe, alle möglichen Entsorgungskonzepte zu evaluieren. Sie kam zu dem Schluss, dass nur die geologische Endlagerung die nötige Langzeitsicherheit gewährleisten kann. Gleichzeitig hat die EKRA ein Konzept präsentiert, welches die gesellschaftlichen Anliegen an Kontrolle und Rückholbarkeit der Abfälle aufnimmt. Das heutige Lagerkonzept der Nagra nimmt die Anregungen der EKRA auf.

Das Konzept des Tiefenlagers sieht vor, dieses in Etappen zu verschliessen (Nagra 2021e) und in diesem Zeitraum mittels eines integralen Überwachungsprogramms zu beobachten (Nagra 2021c). *Dabei ist die Verfüllung so vorzunehmen, dass die Langzeitsicherheit gewährleistet und eine Rückholung der Abfälle ohne grossen Aufwand möglich ist* (Art. 67 Abs. 2 KEV 2004).

2.2 Überwachungstechnische Schritte (Monitoring) bis zum Verschluss des Gesamtlagers

Die geologische Tiefenlagerung folgt dem Primat der Sicherheit, das vorsieht, so schnell wie möglich passive Sicherheit herzustellen. Diesem Ziel wird bereits während der Betriebsphase Sorge getragen, in dem die Lagerkammern sukzessive mit der Einlagerung der Abfälle verfüllt und mit Versiegelungen verschlossen werden (Nagra 2021e). Mit dem Abschluss der Einlagerung der SMA-Abfälle und der HAA-Abfälle beginnen die Beobachtungsphase und der Verschluss in Etappen (siehe auch Anlage B). Schon vor Beginn der Beobachtungsphase beginnt die Überwachung des Pilotlagers, um schon früh Informationen zum Verhalten des Mehrfachbarrierensystems zu gewinnen (Nagra 2021c). Im Rahmen des Pilotlager-Konzepts wurde auch skizziert, wie es, auf der Basis des Monitorings, zur Entscheidung für eine Rückholung kommen könnte (Fig. 8.1 in Nagra 2021c). Weiterhin 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 und für die Vertrauensbildung im Hinblick auf die Entscheidung zum Verschluss des Tiefenlagers. Gemäss aktueller Planung wird von einer Beobachtungsphase von *50 Jahren* nach Abschluss des HAA-Einlagerungsbetriebs ausgegangen (Art. 3 SEFV).

Nach Ablauf der Beobachtungsphase ordnet der Bundesrat den Verschluss des Gesamtlagers an, sofern der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet ist (Art. 39 Abs. 2 KEG 2003). Bis zum Zeitpunkt des allfälligen Verschlusses muss eine Rückholung ohne grossen Aufwand (Art. 37. Abs. 1 Bst. b KEG 2003) möglich sein.

Stufengerecht werden bei der Realisierung des geologischen Tiefenlagers wiederholt umfangreiche Analysen durchgeführt und detaillierte Nachweise erbracht, um methodisch-wissenschaftlich zu bestätigen, dass mit der geologischen Tiefenlagerung *der Schutz von Mensch und Umwelt* sichergestellt ist (Art. 13 Abs. 1 KEG 2003). Die Rückholung ist nicht fester Bestandteil des planmässigen Ablaufs, sondern eine gesetzliche Vorgabe, welche die Handlungsoption offenhält, die eingelagerten und versiegelten Abfälle zu bergen und an die Oberfläche zurückzubringen. Dem Rückholungskonzept liegt zugrunde, dass die Rückholung nur zwingend stattfinden muss («Ultima Ratio»), wenn *der Sicherheitsnachweis nicht mehr erbracht werden kann und eine wirksame Instandsetzung der Sicherheitsbarrieren nicht mehr möglich ist* (Kap. 7.4.1 Bst. b ENSI 2020b).

2.3 Gesetzliche und regulatorische Grundlagen

Das Schweizerische Kernenergiegesetz (Art. 37 Abs. 1 Bst. b KEG 2003) gibt vor, dass für das *geologische Tiefenlager die Betriebsbewilligung [nur] erteilt wird, wenn [...] die Rückholung der radioaktiven Abfälle bis zu einem allfälligen Verschluss (Gesamtverschluss) ohne grossen Aufwand möglich ist.*

Dabei ist gemäss Schweizerischer Kernenergieverordnung (Art. 11 Abs. 2 Bst. c KEV 2004) ein *geologisches Tiefenlager so auszulegen, dass Vorkehrungen [...] zur Rückholung der Abfälle die passiven Sicherheitsbarrieren nach dem Verschluss des Lagers nicht beeinträchtigen* (Art. 11, Abs. 2 Bst. c KEV 2004).

Ferner verlangt die KEV (Art. 65 Abs. 2 Bst. C. KEV 2004), *vor Inbetriebnahme des Tiefenlagers die sicherheitsrelevanten Techniken zu erproben und deren Funktionstüchtigkeit nachzuweisen. Dies betrifft insbesondere [...] das Entfernen des Verfüllmaterials zwecks allfälliger Rückholung von Abfallgebinden und die Technik zur Rückholung von Abfallgebinden.*

Die KEV (Art. 67 Abs. 1 KEV 2004) fordert weiter, dass *der Eigentümer eines geologischen Tiefenlagers nach Einlagerung der Abfallgebinde die Lagerkavernen und -stollen zu verfüllen hat und die Verfüllung so vorzunehmen hat, dass die Langzeitsicherheit gewährleistet und eine Rückholung der Abfälle bis zum Gesamtverschluss ohne grossen Aufwand möglich ist* (Art. 67 Abs. 2 KEV 2004) .

Die Richtlinie ENSI-G03 (ENSI 2020b) definiert Rückholung wie folgt: *Die Rückholung umfasst die Bergung und den Transport von eingelagerten radioaktiven Abfällen aus dem geologischen Tiefenlager zurück an die Oberfläche* (siehe (Anhang 1 ENSI 2020b)).

Zudem stellt (Kap. 7.4.1 ENSI 2020b) bezüglich Rückholung folgende generelle Vorgaben:

- a. *Ein geologisches Tiefenlager einschliesslich der Tiefenlagerbehälter ist so auszulegen, dass eine Rückholung der radioaktiven Abfälle bis zum Verschluss ohne grossen Aufwand möglich ist.*
- b. *Eine Rückholung oder Teilrückholung der Abfälle ist vorzunehmen, falls während der Betriebsphase der Sicherheitsnachweis nicht mehr erbracht werden kann und eine wirksame Instandsetzung der Sicherheitsbarrieren nicht mehr möglich ist.*

Eine ausführlichere Zusammenstellung relevanter Gesetze und regulatorischer Grundlagen befindet sich in Anlage A.

2.4 Kurzbeschreibung der wichtigsten planerischen Schritte

Ein Entscheid für eine Rückholung wird auf einer sorgfältigen Abwägung beruhen. Das vorgesehene Lagerkonzept stellt mit höchstmöglicher Sicherheit sicher, dass für eine gründliche Abklärung der Notwendigkeit der Rückholung und ihrer Umsetzung die notwendige Zeit zur Verfügung steht, weil davon ausgegangen werden kann, dass keine dringliche Situation vorliegt. Die Abfälle sind nach wie vor im bestehenden redundanten Mehrfachbarrierensystem (siehe Nagra 2021a) eingeschlossen, so dass eine unzulässige Freisetzung von Radionukliden an die Umwelt über einen langen Zeitraum vernachlässigt werden kann.

Im Sinne einer schrittweisen Planung sind, gemäss den gesetzlichen bzw. behördlichen Vorgaben bezüglich Rückholung, folgende Konkretisierungsschritte vorgesehen:

- Für das Rahmenbewilligungsgesuch ist gemäss ENSI (Kap 7.4.2 Bst. a ENSI 2020b) ein Konzept zur Rückholung zu erarbeiten.
- Im Rahmen des Baugesuchs wird das Rückholungskonzept weiter konkretisiert, so dass die erforderlichen baulichen Massnahmen umgesetzt werden können.
- Vor Inbetriebnahme, das heisst in Hinblick auf die Erteilung der Betriebsbewilligung, ist gemäss Art. 65 KEV 2004 die Funktionstüchtigkeit der Entfernung des Verfüllmaterials und die Technik zur Rückholung nachzuweisen.

Falls es in der Betriebs- oder Beobachtungsphase Hinweise gibt, dass eine Rückholung erforderlich sein könnte, wird eine detaillierte Planung erfolgen. Diese besteht aus einer Bestandsaufnahme aller Elemente des Lagers, die in Zusammenhang mit einer Rückholung relevant sind, und einer Bewertung im Hinblick auf den Sicherheitsnachweis. Falls die Bewertung zum Entscheid zur Rückholung führt, werden anschliessend alle Schritte der Rückholung geplant. Dazu kann für die Entfernung des Verfüllmaterials und die Rückholung der Endlagerbehälter auf die Erkenntnisse der entsprechenden Demonstrationsversuche abgestützt werden. Falls es hinsichtlich der Versuche geänderte Randbedingungen gibt, sind entsprechende Anpassungen bei den Abläufen oder den Geräten vorzunehmen. Für die Förderung der Endlagerbehälter an die Oberfläche kann grundsätzlich auf die für die Einlagerung verwendeten Techniken zurückgegriffen werden. Neben der Funktionalität der Rückholung, sind auch alle anderen schon für die Einlagerung relevanten Aspekte für die Rückholung zu prüfen bzw. zu gewährleisten (z. B. Strahlenschutz, nukleare Betriebssicherheit, Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz). Vor der Rückholung ist auch eine Bewilligung in einem dann bestehenden geeigneten Regelwerk, z. B. nach ENSI A04 (HSK 2016) «Änderung einer kerntechnischen Anlage», zu erlangen. Die Rückholung findet somit in einem geordneten Verfahren mit zugehörigen Prüfungen und Genehmigungen statt und wird entsprechend mehrere Jahre in Anspruch nehmen.

3 Grundlagen Lagerkonzept

In diesem Kapitel werden zunächst die Architektur eines Kombilagers und die Endlagerbehälter (ELB) der beiden Abfalltypen in den beiden Lagerteilen (HAA und SMA) beschrieben. Es enthält zudem eine Beschreibung der Verfüllung der Lagerkammern und eine Beschreibung der Verschlussbauwerke, bestehend aus den Versiegelungsbauwerken und den Verfüllungen der Lagerfeldzugänge.

3.1 Lagerarchitektur des geologischen Tiefenlagers

Das Konzept zur Rückholung wurde für ein Kombilager mit dem Zugang zur Lagerebene über drei Schachtbauwerke (Fig. 3-1) entwickelt (Nagra 2021a): Dazu gehören der Zugangsschacht (8), der Betriebsschacht (1) und der Lüftungsschacht (2). Ein Zugangsbauwerk als Rampe ist ebenfalls möglich und wird auch für die Rückholung berücksichtigt. Der Abtransport der geborgenen Behälter an die Oberfläche erfolgt dann über eine Rampe und nicht über den Schacht. Bei einem Kombilager teilen sich der HAA- und SMA-Lagerteil eine gemeinsame Oberflächenanlage (14) und Nebenzugangsanlagen (7).

Auf der Lagerebene (Fig. 3-1) besteht das Kombilager aus einem zentralen Bereich (3), den Testbereichen (4, 5, 6), einem SMA-Lagerteil (Hauptlager SMA und Pilotlager SMA) sowie dem HAA-Lagerteil (Hauptlager HAA und Pilotlager HAA).

Der SMA-Lagerteil umfasst das SMA-Hauptlager mit den entsprechenden Lagerkavernen (13) sowie den Lagerfeldzugängen (9, 10). Die SMA-Lagerkavernen haben jeweils nur einen stirnseitigen Zugang. Für die Kavernen ist ein zweischaliger Ausbau mit einer Aussenschale aus Spritzbeton und einer Innenschale aus Ortbeton vorgesehen. Das SMA-Pilotlager (12) inklusive des Kontrollstollens (11) dient der Überwachung des Verhaltens des Barrierensystems anhand einer kleinen repräsentativen Abfallmenge.

Der HAA-Lagerteil umfasst das HAA-Hauptlager mit den entsprechenden einseitig angeschlossenen Lagerstollen (20) sowie den zugehörigen Lagerfeldzugängen (15, 16, 17). Die derzeitige Planung geht von einem Ausbau mit Tübbingen in den HAA-Lagerstollen aus. Wie beim SMA-Lagerteil dient das HAA-Pilotlager (18) inklusive des Kontrollstollens (19) der Überwachung des Verhaltens des Barrierensystems anhand einer kleinen repräsentativen Abfallmenge.

Die Nutzungsphasen des gTL, in Anlehnung an das Entsorgungsprogramm (Nagra 2021a), sind in (Nagra 2022c) zu finden.

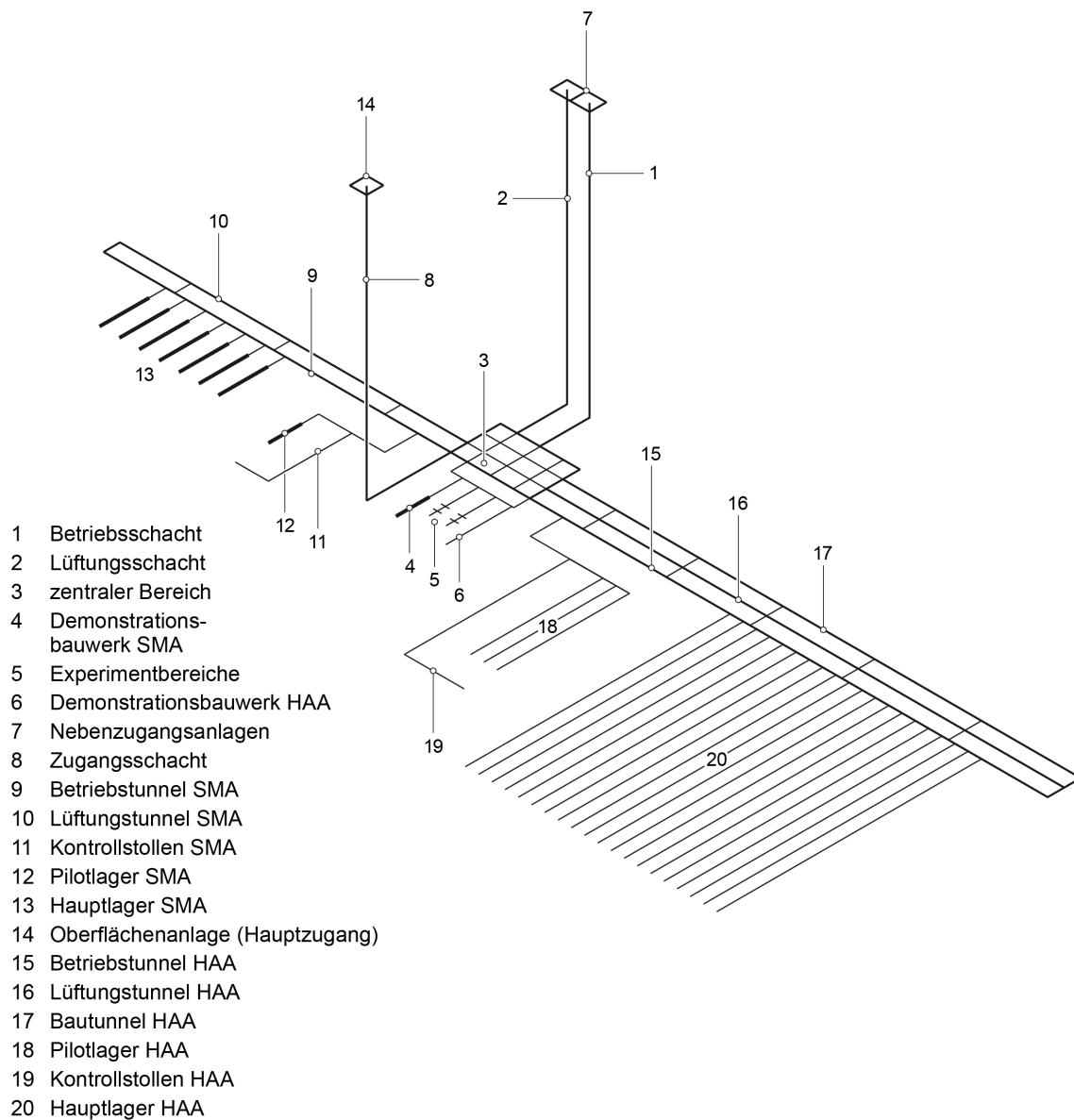


Fig. 3-1: Systemskizze für die untertägigen Anlagenelemente und Bauten eines Kombilagers (Nagra 2021a)

3.2 Endlagerbehälter SMA und HAA

Es sind unterschiedliche ELB für HAA und SMA vorgesehen (Fig. 3-2). Im Folgenden werden aus dem Entsorgungsprogramm 2021 (Nagra 2021a) beispielhafte ELB-Typen (HAA und SMA) gezeigt, die für das heutige Rückholungskonzept verwendet werden. Es existieren weitere Ausführungen von Behältern, deren Handhabung mit dem Rückholungskonzept gewährleistet sind.

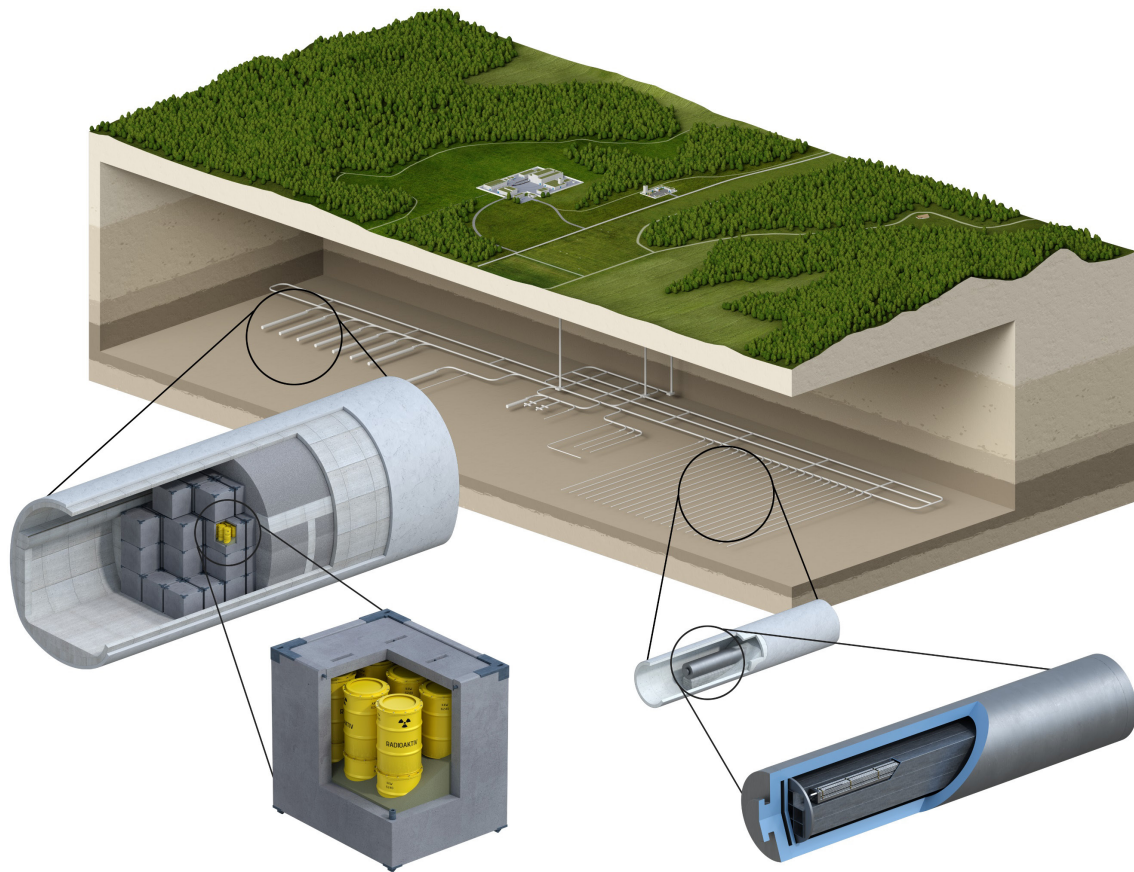


Fig. 3-2: Kombilager mit Lagerkavernen links (SMA) und Lagerstollen rechts (HAA)

SMA-Behälter

Die SMA-Abfälle werden im Wesentlichen in zwei unterschiedlich hohen armierten Betonbehältertypen mit identischer Grundfläche (Aussenmasse $L \times B \times H = \sim 2.4 \text{ m} \times \sim 2 \text{ m} \times 1.3 \text{ m}$ bzw. 1.95 m) verpackt. Das Gesamtgewicht inkl. der Abfälle kann bis zu 25 t betragen.

Die Behälter sind mit einem Stahlrahmen ausgerüstet (siehe Fig. 3-3). Zusätzlich sind die ELB an ihrer Oberseite mit vier sogenannten ISO-Ecken¹ (Twist-Lock-System) ausgerüstet, welche zum Transport und zur Handhabung genutzt werden können. An der Unterseite der ELB befinden sich Schubzapfen, welche bei der Einlagerung in die ISO-Ecken des darunter befindlichen ELB geführt werden. Das ermöglicht eine passgenaue Stapelung der ELB in der Kaverne.

¹ Die ISO-Ecken besitzen (extra) keine seitliche Öffnung. Ein Eindringen von Mörtel ist daher ausgeschlossen.

Die ELB werden für einen Zeitraum von mindestens 100 Jahren ausgelegt, so dass die Auslegedauer im Zeitrahmen des hier zugrunde liegenden Rückholungskonzepts nicht überschritten wird.

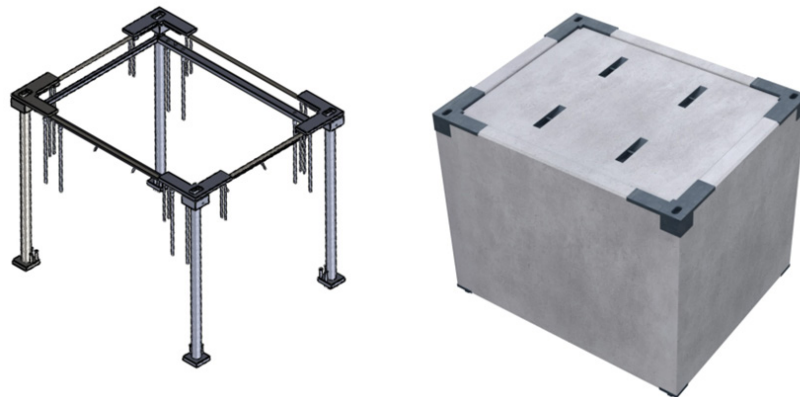


Fig. 3-3: Endlagerbehälter SMA
(links: Stahlrahmen; rechts: vollständiger Behälter)

HAA-Behälter

Gemäss heutiger Planung sind zwei verschiedene HAA-ELB-Typen vorgesehen: einer für verglaste, hochaktive Abfälle aus der Wiederaufbereitung und einen für abgebrannte Brennelement aus den Kernkraftwerken. Für die Rückholung relevante Unterschiede zwischen den Behältertypen sind unterschiedliche Abmessungen und Gewichte sowie unterschiedliche Wärmeleistungen und Strahlenexpositionen. Konservativ wird in diesem Bericht der grössere ELB-Typ (SF-BWR) zugrunde gelegt. Da dieser die grösseren Abmessungen, das höhere Gewicht, eine repräsentative Wärmeleistung (Auslegung 1'500 W pro ELB) und die höhere radioaktive Dosisleistung aufweist, ist er abdeckend für alle HAA-ELB-Typen.

Die Planung sieht einen Stahlzylinder mit einer Länge von 5.19 m, einem Aussendurchmesser von 1.05 m und einer Wandstärke von ca. 0.15 m vor. Er hat eine Masse (beladen) von bis zu ca. 25 t. Die HAA-ELB sind für einen Zeitraum von 1'000 Jahren (Kap. 4.4 Bst. e ENSI 2020b) auszulegen². Der ELB ist gemäss dem heutigen Konzept stirnseitig auf einer Seite mit einem Stahlnocken (Fig. 3-4) ausgebildet, dessen Auslegung sämtliche kinematische Bewegungen mit entsprechendem Handhabungsgerät zulässt. Der ELB kann somit an diesem Stahlnocken von der liegenden Position angehoben werden. Des Weiteren kann der ELB damit in der Achse torsionsfrei gedreht sowie gestossen und gezogen werden.



Fig. 3-4: Endlagerbehälter HAA

² Die Nagra strebt jedoch in Übereinstimmung mit anderen internationalen Tiefenlager-Projekten eine deutliche höhere Auslegung von bis zu 10'000 Jahren an.

3.3 Verfüllung der Lagerkammer und Verschluss des gTL

Der Verschluss des geologischen Tiefenlagers setzt sich aus den Versiegelungen und den Verfüllungen der Lager- und Lagerfeldzugänge zusammen (Nagra 2021e). Zusätzlich werden die Lagerkavernen und -stollen verfüllt. Fig. 3-5 zeigt die Lage der Versiegelungen und der Verfüllungen im gTL (Nagra 2021e).

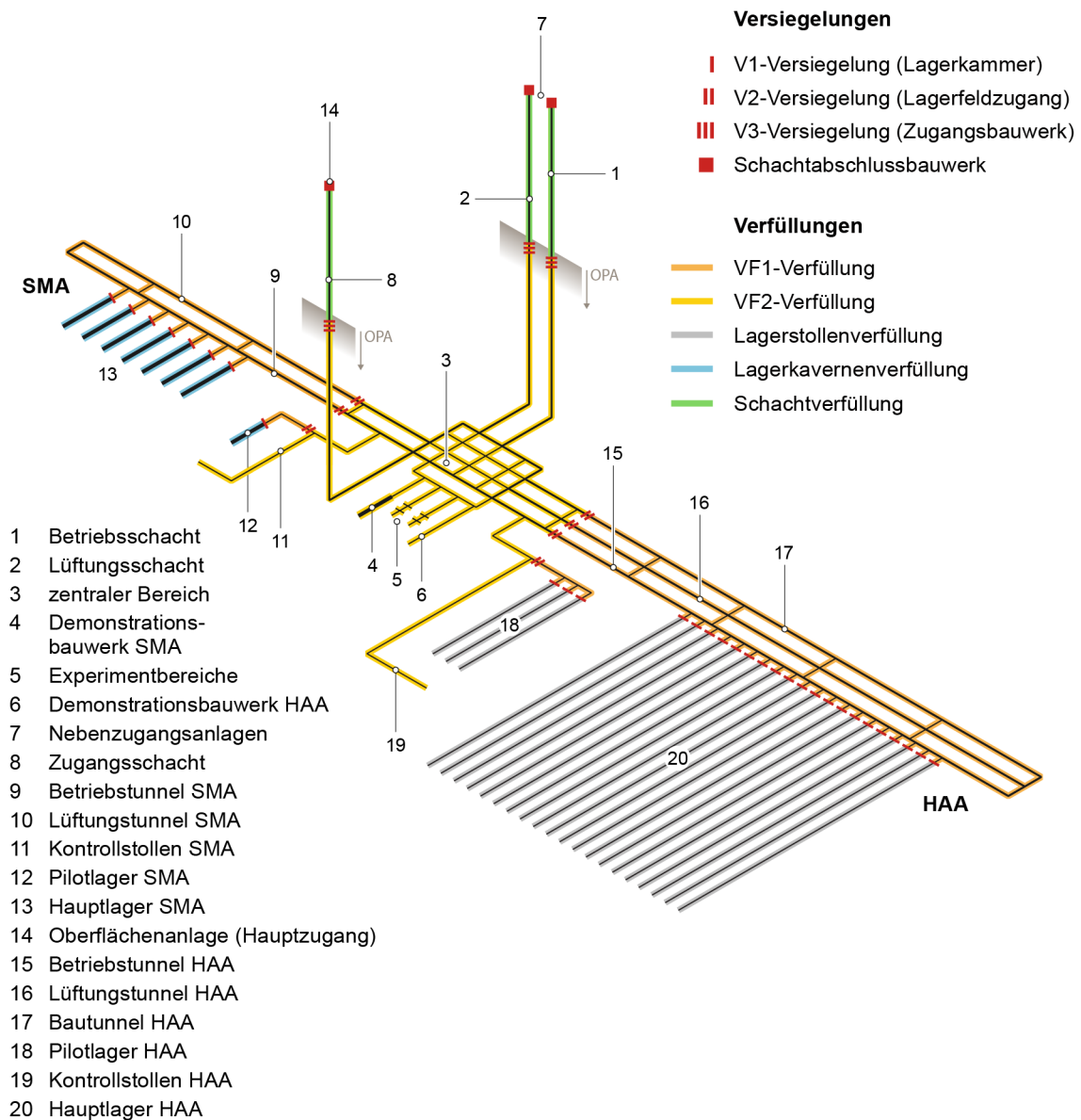


Fig. 3-5: Lage der Verschlussbauwerke in der Lagerarchitektur
(Nagra 2021e)

3.3.1 Verfüllung der Lagerkammern

Die Verfüllungen der Lagerkammern zählen zu den Nahfeldbarrieren des geologischen Tiefenlagers. Sie werden sukzessive mit der Einlagerung eingebracht. Nachfolgend werden die Verfüllungen der Lagerstollen (HAA) und -kavernen (SMA) beschrieben.

Lagerstollen HAA

Die HAA-ELB werden bei der Einlagerung auf Auflagern aus Bentonit-Blöcken parallel zur Stollenachse und mittig zum Stollenquerschnitt abgelegt. Der Resthohlraum des Stollenbereichs sowie die Strecke bis zur nächsten ELB Position wird mit einem quellfähigen Bentonit-Baustoff (z. B. mit Granulat, Pellets) verfüllt (siehe Nagra 2021e). Die Verfüllung erfolgt dabei horizontal mit dem Ziel, eine möglichst homogene Einbaudichte von mindestens 1.45 t/m^3 über dem gesamten Stollenquerschnitt zu erreichen.

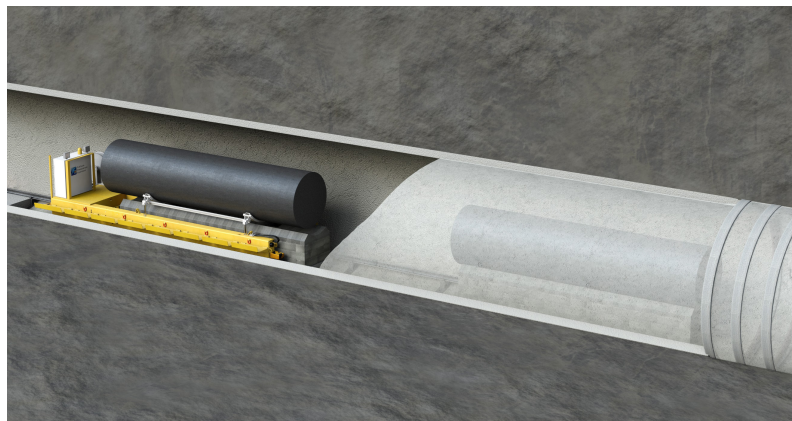


Fig. 3-6: Einlagerungsmodul analog FE-Experiment, Felslabor Mont Terri (Nagra 2019)

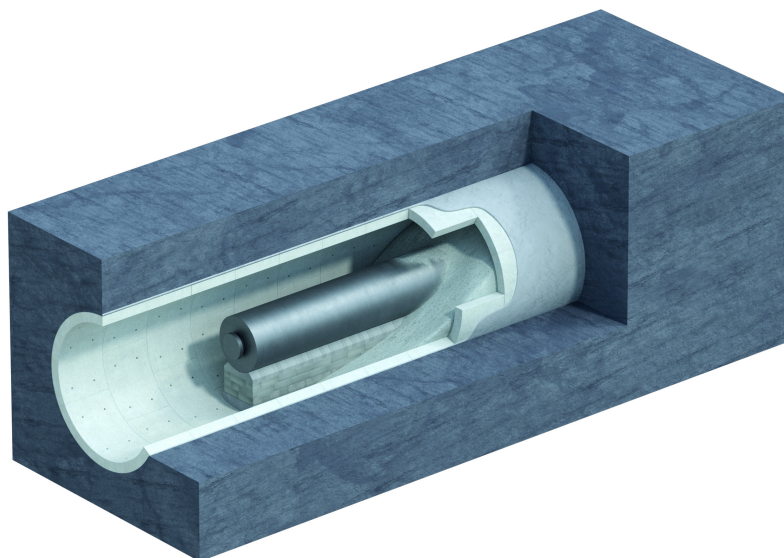


Fig. 3-7: Darstellung der Verfüllung in den HAA-Lagerstollen (Nagra 2022a)

SMA-Lagerkavernenverfüllung

Für das Verfüllen der Hohlräume zwischen den ELB kommt ein Mörtel zum Einsatz (siehe auch Jacobs et al. 1994 und Nagra 2021d). Beim M1-Mörtel handelt es sich um einen Monokornmörtel, dessen Zuschläge aus z. B. gebrochenen Kalkaggregaten bestehen. Die Zementleimmenge ist so bemessen, dass die Zuschläge miteinander verkittet werden, dabei die Haufwerks-Poren des Korngemisches aber nicht mit Zementleim verfüllt werden. Der M1-Mörtel wird so eingebracht, dass er Festigkeiten von mindestens 10 MPa und eine wasserfüllbare Porosität von mindestens 20 % erreicht.

In der Strosse der Kaverne werden die ELB (Fig. 3-9) lagenweise mit vertikalen Abständen von ca. 20 cm eingelagert und anschliessend bis ca. 10 cm unterhalb der ELB-Oberkante mit M1-Mörtel verfüllt. Zwischen den gestapelten SMA-ELB (Türmen; siehe Fig. 3-9) bleibt ein horizontaler Spalt³ von ca. 1 cm.

In der Kalotte werden die SMA-ELB auf Betonaufleger abgesetzt. An der Unterseite der ELB ergibt sich dadurch ein Spalt von wenigen Zentimetern zwischen ELB-Unterkante und einer vorgängig eingebrachten Mörtelsohle. Stirnseitig werden die ELB in der Kalotte jeweils bündig an die vorgängige ELB-Reihe gelagert, so dass dort kein Spalt bestehen bleibt.

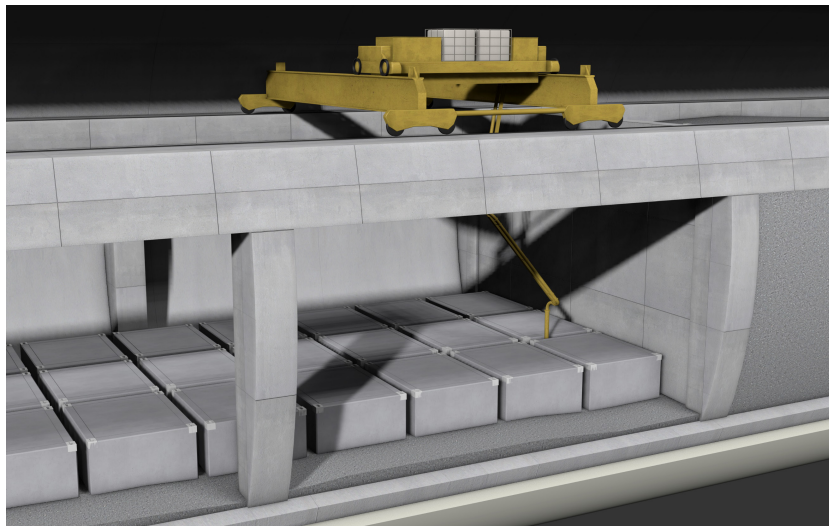


Fig. 3-8: Verfüllung der Lagerkaverne während der Einlagerung in der Strosse (Nagra 2022a)

³ Heutiger Planungsstand: Die Spalthöhe kann angepasst werden.

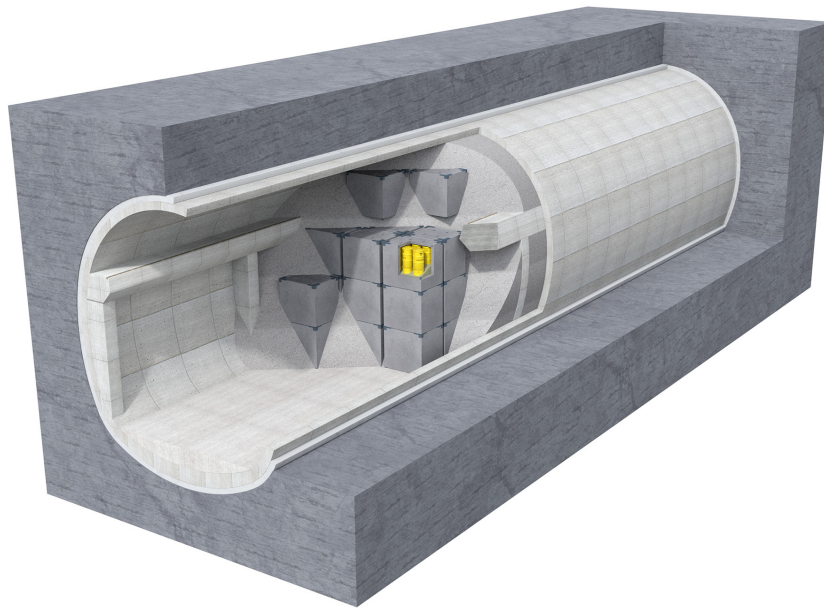


Fig. 3-9: Darstellung einer eingelagerten und verfüllten SMA-Lagerkaverne
(Nagra 2022a)

3.3.2 Versiegelungsbauwerke

Eine ausführliche Beschreibung aller Versiegelungsbauwerke befindet sich im Verschlusskonzept eines geologischen Tiefenlagers (Nagra 2021e).

Die Versiegelungsbauwerke müssen entfernt werden, um den Zugang zu den eingelagerten Abfällen herzustellen (vgl. Anlage B). Für den betrachteten Rückholungszeitpunkt sind die vertikalen Versiegelungen der Zugangsbauwerke zur Lagerebene (V3) nicht relevant (Kapitel 4.1).

Die Versiegelungsbauwerke V1 und V2 (siehe Fig. 3-5) sind horizontal orientiert, bestehen aus denselben Baustoffen und haben alle die gleiche konstruktive Durchbildung. Somit wiederholt sich im Falle einer Rückholung auch der generelle Ablauf beim Rückbau der Versiegelungen. Die Hauptunterschiede zwischen den Versiegelungen sind ihre geometrischen Abmessungen (u.a. abhängig von der Tunnelgeometrie) und die Materialisierung des Dichtelements (z. B. in Abhängigkeit des Teillagers). Generell bestehen alle Versiegelungen aus drei Elementen: dem Dichtelement, den Widerlagern sowie den Übergangsschichten (Fig. 3-10).

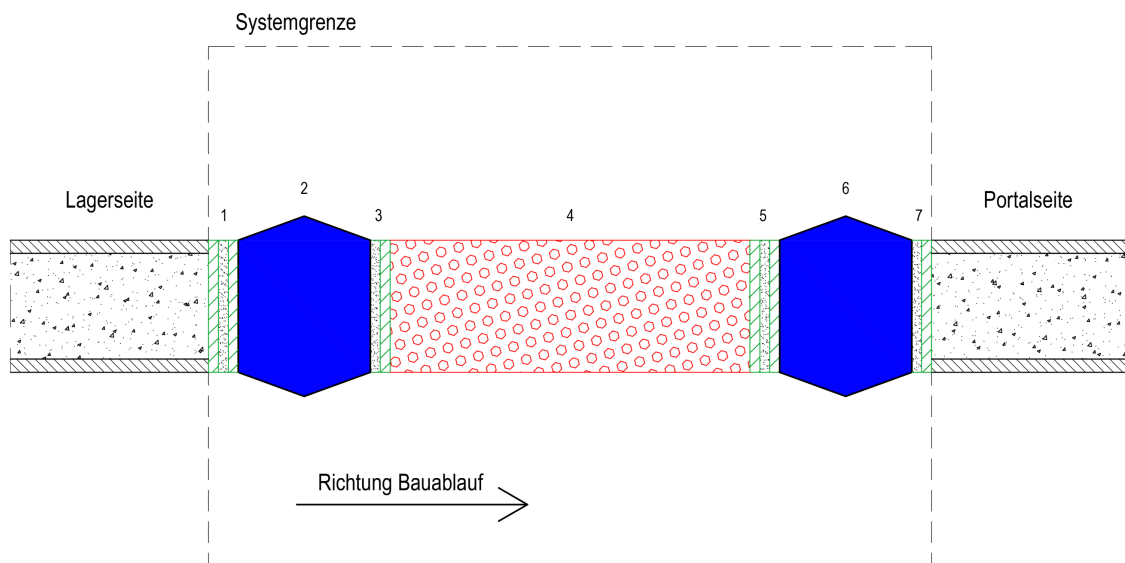


Fig. 3-10: Generischer Aufbau der Versiegelungsbauwerke
(Nagra 2021e)

Die Ziffern 1, 3, 5 und 7 bezeichnen die Übergangsschichten, Ziffern 2 und 6 die beiden Widerlager und Ziffer 4 das Dichtelement.

Das Kernstück der Versiegelungen ist das jeweilige Dichtelement. Es wird aus kompaktiertem Bentonit-Baustoff erstellt und formschlüssig mit dem Wirtgestein eingebaut, wofür der ursprüngliche Ausbau entlang des Dichtelements entfernt wird. Das Dichtelement ist beidseitig, u.a. aus Gründen der Lagestabilität, von Widerlagern eingespannt. Die konisch geformten Widerlager werden aus unbewehrtem, hochwertigem Konstruktionsbeton erstellt. Jeweils beidseitig der beiden Widerlager befinden sich Übergangsschichten als konstruktive Elemente, u.a. zur Vermeidung unerwünschter geochemischer Wechselwirkungen. Sie bestehen konstruktiv aus Mauerwerk (als verlorene Schalung) oder aus geschütteten kohäsionslosen Materialien wie z. B. Sanden, Kiesen oder Kalksandsteinen.

3.3.3 Verfüllung der Lagerfeldzugänge

In den Bereichen zwischen den Lagerfeldzugängen und dem zentralen Bereich wird im Rahmen des Lagerverschlusses eine Resthohlraumverfüllung aus Material mit geochemischen Eigenschaften ähnlich des Wirtgesteins eingebracht. Diese Verfüllungen bestehen z. B. aus Sand-Tongemischen und werden im bestehenden Tunnelausbau eingebracht (Nagra 2021e).

Im Falle einer Rückholung sind die bereits eingebrachten Verfüllungen der Lagerfeldzugänge zu entfernen, um den Zugang zu den eingelagerten radioaktiven Abfällen herzustellen (Anlage B).

4 Betrachteter Rückholungszeitpunkt und relevante Zustandsgrössen

4.1 Betrachteter Rückholungszeitpunkt

Das Rückholungskonzept betrachtet den Zeitpunkt des Abschlusses der Beobachtungphase unmittelbar vor Verschluss des Gesamtlagers (vgl. auch Anlage B). Dies ist der späteste zu betrachtende Zeitpunkt⁴ mit einer abdeckenden Planung, da die Entwicklung der relevanten Elemente (z. B. Tragwerke) am weitesten fortgeschritten sind und die meisten Versiegelungen und Verfüllungen entfernt werden müssen, um die Abfälle rückzuholen. Anlage B zeigt den zeitlichen Ablauf des Verschlusses in allen Phasen (Einlagerung bis Verschluss Gesamtlager). Fig. 4-1 zeigt den Zustand des Tiefenlagers unmittelbar vor dem Verschluss des Gesamtlagers. Alle Lagerkammern (Lagerstollen- und Lagerkavernenverfüllung), die Lagerfeldzugänge (VF1) und der Zugangsschacht sind vollständig verfüllt und versiegelt. Offen sind noch der Betriebs- und Lüftungsschacht, die Beobachtungsstollen der Pilotlager sowie Teile des zentralen Bereichs.

Die Rückholung ist auch nach dem Verschluss des Gesamtlagers möglich. Das Tiefenlager wird dann verschlossen, die Zugänge vollständig bis zur Geländeoberkante verfüllt und versiegelt sowie die Infrastruktur vollständig rückgebaut. Nach dem Erreichen dieses Zustandes wird die Rückholung international oft als «Bergung» bzw. «Recovery» bezeichnet und ist unter Verwendung etablierter und erprobter Techniken aus dem Untertage- und Bergbau ebenfalls umsetzbar, mit entsprechend grösserem Aufwand.

⁴ Die Rückholung ohne grossen Aufwand ist bis zum Verschluss zu zeigen.

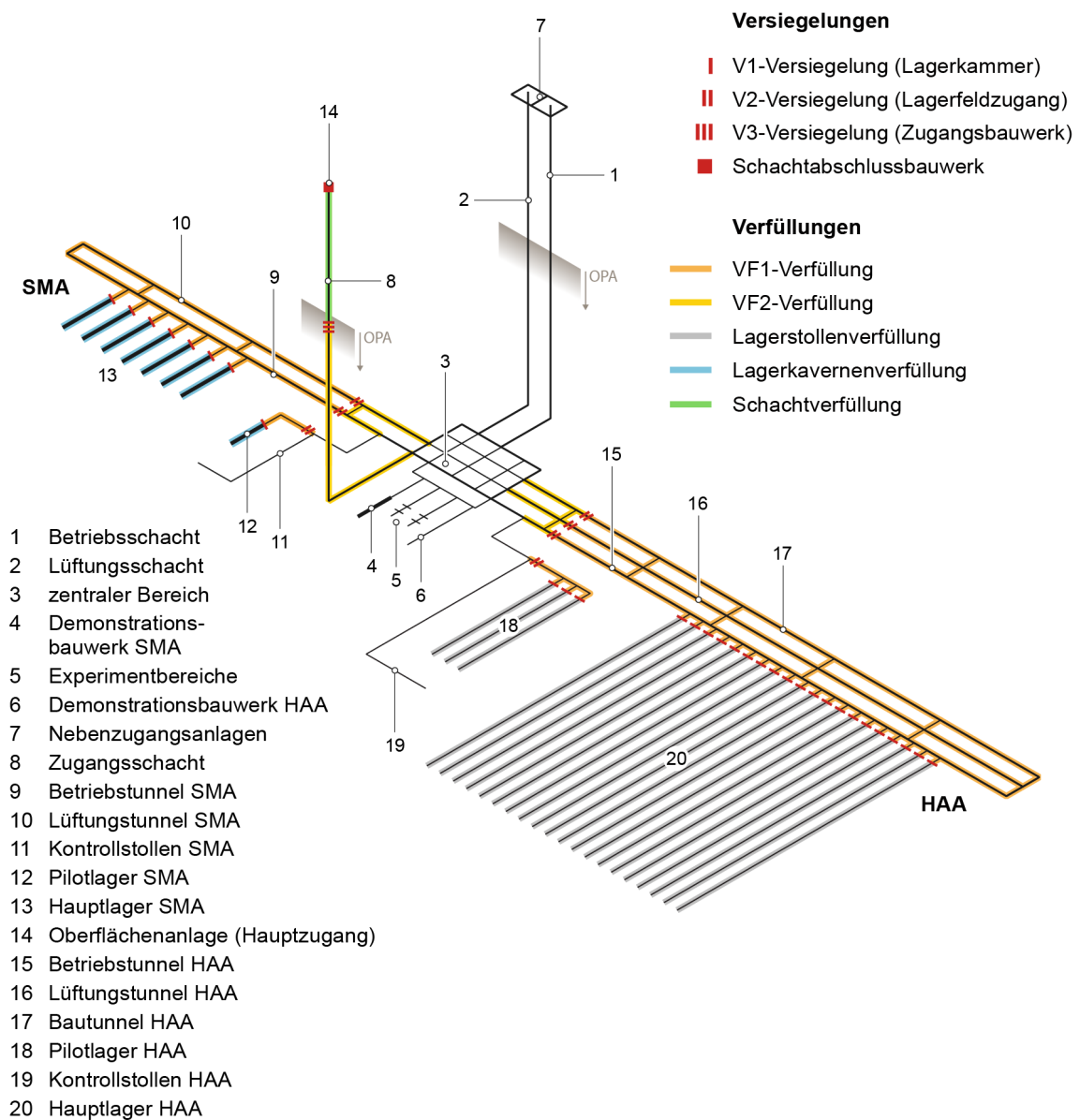


Fig. 4-1: Zustand des Kombilagers zum Zeitpunkt vor dem Verschluss des Gesamtlagers

4.2 Randbedingungen des Strahlenschutzes bei der Rückholung

Die allfällige Rückholung erfolgt, wie die Einlagerung, auf der Basis eines entsprechenden Strahlenschutzkonzepts. Dazu gehört insbesondere die Einrichtung eines Überwachungsbereichs. Das Strahlenschutzkonzept der Rückholung wird, wie bei der Einlagerung, durch die zuständige Behörde geprüft und freigegeben.

Strahlenschutztechnische Bedingungen bei der HAA-Rückholung

Bei der HAA-Rückholung ist heute von den gleichen Anforderungen an die Strahlenschutzkonzepte auszugehen wie in der Betriebsphase für die HAA-Einlagerung.

Eine Aktivierung des Bentonits im Nahfeld der HAA-ELB ist für die Rückholung vernachlässigbar, da die Neutronendosisleistung ausserhalb des ELB zu gering ist.

Eine potenzielle Kontamination des Nahfelds der HAA-ELB ist ebenfalls vernachlässigbar, da die Dichtigkeit der HAA-ELB vor der Einlagerung geprüft wurde und im betrachteten Zeitraum bis zur Rückholung auch bei unerkannten Mängeln kein Materialversagen zu erwarten ist. Zudem werden die Handhabungsprozesse und -vorgänge so gestaltet, dass die Integrität der Behälter erhalten bleibt (Belastungen bei Abweichungen und Störfällen sind begrenzt).

Analog zum Einlagerungsprozess muss die Rückholung der HAA-ELB aufgrund der Strahlenexposition im Lagerstollen ferngesteuert erfolgen. Für den Fall von Abweichungen und Störungen sind organisatorische und technische Massnahmen vorzusehen, so dass eine ferngesteuerte und damit strahlenschutztechnische Bewältigung umsetzbar ist. Der HAA-ELB muss nach der Rückholung aus dem Lagerstollen ferngesteuert in einen Transportbehälter (Abschirmung der Direktstrahlung) verpackt werden, bevor er den Schleusenbereich für den Transport zur Oberfläche verlassen darf (Kapitel 5.2). Aus Gründen des Strahlenschutzes werden analog zur Einlagerung nur einzelne HAA-ELB rückgeholt, in Transportbehälter verpackt und an die Oberfläche transportiert.

Strahlenschutztechnische Bedingungen bei der SMA-Rückholung

Auch bei den SMA-Kavernen ist davon auszugehen, dass dieselben Anforderungen an den Strahlenschutz erfüllt werden müssen wie bei der Einlagerung.

Die Integrität der SMA-ELB ist zum betrachteten Zeitpunkt ebenfalls noch vorhanden. Aufgrund des schwach- und mittelaktiven Inventars ist ein Personaleinsatz möglich. Der generelle Aufenthalt und die Aufenthaltsdauer von Personal in den SMA-Lagerkavernen werden von der vorliegenden Ortsdosisleistung bestimmt, so dass die Dosisgrenzwerte der strahlenexponierten Personen gemäss Strahlenschutzverordnung (Art 56. Kap. 5 StSV 2017) zu keiner Zeit überschritten werden und die Sicherheit des Personal gewährleistet ist. Für die SMA-Rückholung werden für den Bedarfsfall (z. B. für mittelaktives Inventar oder für den Störfall einer Schädigung / Verlust der Behälterintegrität) entsprechende Transportbehälter vorgehalten. Es werden jeweils nur einzelne SMA-ELB rückgeholt und ggf. in Transportbehälter verpackt, bevor diese die physische Trennung (z. B.: Tor oder Schleuse) des Überwachungsbereichs verlassen zum Transport an die Oberfläche.

4.3 Relevante Zustandsgrößen während der Rückholung

In diesem Kapitel wird beschrieben, welche Zustände der für die Rückholung relevanten Elemente zum betrachteten Zeitpunkt der Rückholung angenommen werden. Diese Planungsannahmen beruhen auf den umfangreichen Arbeiten der Nagra zur Entwicklung des Nahfelds der Abfälle (Phänomenologie) über die Zeit (vgl. Nagra 2021d). Da der Zeitpunkt der Rückholung unmittelbar vor dem Verschluss des Gesamtlagers (siehe Kapitel 4.1) gewählt wurde, sind diese Zustände konservative Annahmen für alle früheren Zeitpunkte im Sinne einer abdeckenden Planung. Die Reduktion der Dosisleistung aufgrund des radioaktiven Zerfalls wird für den betrachteten (kurzen) Zeitraum vernachlässigt. Tab. 4-1 fasst die Planungsannahmen der Zustände zusammen.

Tab. 4-1: Planungsannahmen zum Lagerzustand relevanter Elemente

Element im Lager	Lagerteil	Planungsannahme Zustand inkl. Erläuterungen
Endlagerbehälter (ELB)	HAA	Mechanischer Zustand Die HAA-ELB sind zum Rückholungszeitpunkt intakt und transportfähig. Annahme zur Lage der Behälter Die HAA-ELB wurden bei der Einlagerung auf die vorgefertigten Bentonit-Auflager platziert. Geringe Abweichungen (max. 20 cm) von der Ursprungsposition sind zu berücksichtigen. Temperatur Aufgrund ihrer Wärmeleistung von 1'500 W kann die Oberflächentemperatur der HAA-ELB bis zu 140 °C betragen. An der Stollenwand erreicht die Temperatur bis zu 90 °C. Gasbildung Keine relevante Gasbildung zu erwarten.
	SMA	Mechanischer Zustand Die SMA-ELB sind zum Rückholzeitpunkt intakt und transportfähig. Ein Heben über die ISO-Ecken der einzelnen Behälter, wie bei der Einlagerung, wird nicht vorausgesetzt. Annahme zur Lage der Behälter Die Position der SMA-Behälter kann von der Lage bei der Einbringung um wenige Zentimeter (< 5 cm) abweichen. Annahme zur Anhaftung von Mörtel an SMA-ELB Der Mörtel haftet nicht an horizontalen Flächen zwischen gestapelten SMA-ELB. Dies ist durch geeignete Massnahmen bei der Einlagerung sicherzustellen. Temperatur Es wird keine relevante Temperaturerhöhung aufgrund einer Wärmeleistung der Abfälle erwartet. Gasbildung Keine relevante Gasbildung in diesem Zeitraum zu erwarten.

Tab. 4-1: Fortsetzung

Element im Lager	Lagerteil	Planungsannahme Zustand inkl. Erläuterungen
Nahfeldverfüllung Verfestigungsgrad und Anhaftungen an ELB	HAA-Lagerstollen	Das Verfüllmaterial (Bentonit) wird zum Rückholungszeitpunkt eine gewisse Menge Wasser aufgenommen haben. Der Sättigungsgrad kann dabei entlang der Lagerstollen lokal variieren. Je nach Sättigungsgrad kann das Verfüllmaterial somit als Lockermaterial oder mit unterschiedlichen Verfestigungsgraden vorliegen. Bei vollem Sättigungsgrad erreicht der Bentonit nur geringe Festigkeiten. Durch teilgequollenen Bentonit ist mit leichten adhäsiven Anhaftungen des Bentonits auf den HAA-ELB zu rechnen. Diese lassen sich z. B. beim Umladen durch eine Reinigung entfernen. Eine relevante Erschwernis des Lösens der Behälter aus dem Bentonit wird dadurch nicht erwartet.
	SMA-Lagerkavernen	Die Lagerkavernenverfüllung ist vollständig ausgehärtet. Der Porenraum des Mörtels wird im betrachteten Zeitraum noch luftgefüllt sein (Porosität von mindestens 20 %). Die Zementleimmenge des Mörtels ist so bemessen, dass gerade eine Verkittung der Zuschläge des M1-Mörtels stattfindet, ohne dass die Haufwerks-Poren des Korngemischs sich verfüllen (Jacobs et al. 1994). Daher haftet der Mörtel auch schlecht⁵ an den SMA-ELB aus glattem Beton.
Verfüllung Verfestigungsgrad	HAA-/SMA-Lagerfeldzugänge (VF1)	Die Verfüllung der Lagerfeldzugänge liegt überwiegend als Lockermaterial vor. Punktuell kann es zu leichten Verfestigungen gekommen sein.
Versiegelungen Verfestigungsgrad	HAA-/SMA-Versiegelung Lagerkammer (V1)	Die Widerlager sind vollständig ausgehärtet und das Dichtelement aus Bentonit-Baustoff liegt je nach Sättigungsgrad als Lockermaterial oder teilweise gequollen bzw. verfestigt vor.
	HAA-/SMA-Versiegelung Lagerfeldzugänge (V2)	Die Widerlager sind vollständig ausgehärtet und das Dichtelement aus Bentonit-Baustoff liegt je nach Sättigungsgrad als Lockermaterial oder teilweise gequollen bzw. verfestigt vor. Es ist davon auszugehen, dass die Aufsättigung der Dichtelemente der Lagerfeldzugänge aufgrund ihrer späteren Errichtung geringer ist als die der Lagerkammerversiegelungen.

⁵ Insbesondere in vertikalen Spalten. An horizontalen Spalten haftet dieser aufgrund des Eigengewichts (Pressung) besser.

Tab. 4-1: Fortsetzung

Element im Lager	Lagerteil	Planungsannahme Zustand inkl. Erläuterungen
Tragwerkszustand	HAA-Lagerstollen	Es wird davon ausgegangen, dass der Ausbau des HAA-Lagerstollens intakt ist (Sicherheitsfaktor > 1). Nachsicherungen sind aus Gründen der Arbeits- und Betriebssicherheit vorzusehen.
	SMA-Lagerkavernen	Es wird davon ausgegangen, dass der Ausbau der SMA-Kavernen noch intakt ist. Aufgrund des Auftretens einer mechanischen Einwirkung auf das Tragwerk beim Entfernen des Mörtels, kann dies zu Beschädigungen des Ausbaus führen. Instandsetzungen sind daher aus Gründen der Arbeits- und Betriebssicherheit systematisch vorzusehen.
Tragwerkszustand	HAA-/SMA-Zugangsbauwerke (Schächte) Offene untertägige Bauten	Der Zugangsschacht wurde zeitgleich mit dem Verschlusses der Lagerfeldzugänge verfüllt und versiegelt. Das Schachtbauwerk, welches zur Einlagerung der ELB genutzt wurde, steht somit zum betrachteten Zeitpunkt für die Rückholung nicht mehr zur Verfügung. Der Betriebschacht, der Lüftungsschacht sowie einzelne Bauten des zentralen Bereichs sind zum Rückholungszeitpunkt noch verfügbar (Fig. 4-1). Der regelmässige Unterhalt der noch offenen Infrastrukturen und Anlagen, welche für die Beobachtungsphase genutzt wurden, gewährleistet die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit.
Tragwerkszustand	HAA-/SMA-Lagerfeldzugänge (verfüllt)	Der Ausbau der verfüllten Lagerfeldzugänge ist intakt. Während des Wiederauffahrens für die Rückholung (Kapitel 5.1) sind Sicherungs- und Instandsetzungsarbeiten erforderlich, um die Arbeits- und Betriebssicherheit für die Rückholung zu gewährleisten.
Auflager der Kranbahnen in Lagerkavernen	SMA	Es wird davon ausgegangen, dass die Auflager der Kranbahnen instandgesetzt und für die Rückholung genutzt werden können.
Versiegelungsstrecke	HAA/SMA Im Bereich der Dichtelemente	Aufgrund der während des Einbaus der Versiegelungen geraubten Gebirgsstützung in den Bereichen der Dichtelemente ist mit Konvergenzen zu rechnen. Das erforderliche Lichtraumprofil muss wieder hergestellt werden und ein flächenhafter Ausbau muss aus Gründen der Arbeits- und Betriebssicherheit hergestellt werden.

5 Konzept für die Durchführung der Rückholung

Die Rückholung der radioaktiven Abfälle erfolgt aus den verfüllten Lagerkammern und endet im Schachtportal an der Oberfläche. Die notwendigen Prozesse und Infrastruktur für die übertägige Annahme, Konditionierung und Zwischenlagerung der Abfälle sind Stand der Technik (z. B. Zwiilag) und daher in Übereinstimmung mit den Vorgaben der Richtlinie ENSI 2020a hier nicht weiter zu betrachten.

In Kapitel 5.1 werden die wichtigsten vorbereitenden Arbeiten einer Rückholung beschrieben. Kapitel 5.2 (HAA) und 5.3 (SMA) beschreiben das Vorgehen des Freilegens und der Rückholung der ELB aus den verfüllten Lagerkammern.

5.1 Vorbereitende Arbeiten

Die vorbereitenden Arbeiten umfassen alle Schritte, welche notwendig sind, um eine Rückholung der radioaktiven Abfälle aus den verfüllten Lagerkammern beginnen zu können.

Diese bestehen – je nach Zustand des Tiefenlagers (Fig. 4-1) zum Rückholungszeitpunkt – aus dem Rückbau der Verschlussbauwerke und Ausräumen der Verfüllungen bis zu den Lagerkammern sowie aus der Wiedereinrichtung der notwendigen Infrastruktur (z. B. Lüftung, Kühlung, Elektrifizierung). Zudem wird eine Zustandserfassung⁶ der für die Rückholung benötigten Elemente des geologischen Tiefenlagers fortlaufend mit der «Wiederauffahrung» vorgenommen. Auftretende Abweichungen von erwarteten Zuständen werden erfasst und entsprechende Massnahmen für die Umsetzung der Rückholung getroffen. Bevor die ELB in den Lagerkammern freigelegt werden können, müssen zudem Massnahmen zum Strahlenschutz und zur nuklearen Betriebssicherheit umgesetzt werden.

Die Arbeiten zur Erstellung des erforderlichen Lichtraumprofils finden weitestgehend innerhalb des verbliebenen Tunnelausbaus statt. Zur Gewährleistung der Arbeits- und Betriebssicherheit sind bei Bedarf Instandsetzungen des vorhandenen Tunnelausbaus vorzusehen. Lediglich in den Strecken der Dichtelemente der Versiegelungen liegt nach dem Ausräumen kein flächenhafter Tunnelausbau mehr vor. Daher müssen diese Flächen für die Rückholung neu gesichert und ausgebaut werden. Alle diese Arbeiten sind im Untertagebau gängige Praxis. In Tab. 5-1 werden die notwendigen Gerätschaften für die vorbereitenden Arbeiten aufgeführt.

⁶ Für den Entscheid zur Rückholung hat im Vorfeld eine erste Zustandserfassung stattgefunden. Hier geht es darum, durch Fortsetzung der Aufnahmen die Datenlage weiter zu verbessern.

Tab. 5-1: Anlagen und Gerätschaften für die vorbereitenden Arbeiten

Gerät (Einsatzort)	Funktion
<u>Schachtförderanlage(n)</u> (Betriebsschacht)	Transport sämtlicher Güter und Personen zwischen Oberfläche und untertag. Dazu gehört insbesondere der Transport der Gerätschaften, des Abbruchmaterials sowie der ELB.
<u>Bagger mit Abbruchhammer, Schrämkopf und Schaufelarm</u> (Lagerfeldzugänge, Abzweigertunnel inkl. V1-Versiegelungen)	Abbrechen von unbewehrten Betonwiderlagern und ggf. Lösen von verfestigten Verfüllmaterialien. Entfernen von Verfüllmaterial der Lagerfeldzugänge und der Dichtelemente sowie Beladen des Dumpers für den Abtransport des gebrochenen Abraums.
<u>Untertagedumper</u> (Lagerfeldzugänge)	Transport von Abraum zur Schachtförderanlage.
<u>Ankerbohrgerät und Spritzbetongerät</u> ⁷ (Dichtelementbereiche der Versiegelungen und bei Bedarf in Lagerfeldzugängen)	Einbau / Ertüchtigung einer Gebirgsstützung zur Gewährleistung der Arbeits- und Betriebssicherheit während der Rückholung.
<u>Bohrgeräte</u> (Abzweiger – Umladebereich)	Erstellen von Erkundungsbohrungen aus den Abzweigern in die Umladebereiche.

Die vorbereitenden Arbeiten umfassen überwiegend die folgenden sechs Schritte:

1. Ertüchtigung der Infrastruktur

Ertüchtigung / Installation der Schachtförderanlage, Ertüchtigung des zentralen Bereichs und Bereitstellen der Gerätschaften

In den Betriebsschacht wird eine Schachtförderanlage eingebaut oder die vorhandene so ertüchtigt, dass diese für die Rückholung (Transport ELB) eingesetzt werden kann. Die Gerätschaften für die Wiederauffahrung der Lagerfeldzugänge werden ebenfalls über diese Schachtförderanlage untertag transportiert.

2. Rückbau der V2-Versiegelung (Lagerfeldzugänge)

Abbrechen der Widerlager, Rückbau der Übergangsschichten und des Dichtelements

Der Abbruch der unbewehrten Betonwiderlager und der Rückbau der Übergangsschichten erfolgt durch Bagger mit Abbruchhammer, Schrämkopf und Schaufelarm. Ebenso erfolgt der Rückbau des Dichtelements. Das Ausbruchmaterial wird mit Untertagedumpfern vom Abbruchort zur Schachtförderanlage zur Förderung an die Oberfläche transportiert.

Parallel zu Abbruch / Rückbau wird fortlaufend eine Ausbruchsicherung (aus gesicherten Bereichen) entlang dieser Tunnelabschnitte eingebaut (z. B. in Form von Gitternetzen, Ankern und/oder bewehrtem Spritzbeton). Anschliessend wird eine befahrbare Betonsohle eingebaut. Siehe dazu auch Fig. 5-2.

⁷ Je nach Einsatzort montiert auf Sicherungsmodul.

3. Entfernen der Lagerfeldverfüllung (VF1)

Die Entfernung der Verfüllung der Lagerfeldzugänge erfolgt im Schutz der (neu) ausgebauten Tunnel. Zum Einsatz kommen ein Untertagedumper und ein Bagger. Im Bedarfsfall kann der Bagger auf verschiedene Hilfsmittel umgerüstet werden (z. B. Abbruchhammer oder Schräm Kopf bei Verfestigungen). Instandsetzungsmassnahmen des Ausbaus gewährleisten die Arbeits- und Betriebssicherheit während der Rückholung.

Die Lagerfeldverfüllung (VF1) wird parallel aus mindestens zwei Lagerfeldzugängen (vgl. Fig. 3-5) pro Lagerteil entfernt. Mit dieser Vorgehensweise können eine ausreichende Bewetterung und zwei Fluchtwege gewährleistet werden. Während der Wiederauffahrung werden Sonderbewetterungen entlang der Tunnelstrecken installiert. Sobald die Lagerfeldzugänge vollständig wiederaufgefahren sind, wird eine umläufige Bewetterung über den Lüftungs- und den Betriebsschacht eingerichtet. Das Vorgehen ist analog zum Lüftungs- und Kühlungskonzept geologischer Tiefenlager während der Phase Bau. Eine ausführliche Beschreibung findet sich in (Kap 3.3.1 Nagra 2022b).

4. Rückbau der V1-Versiegelung (Lagerkammer)

Dieser Arbeitsschritt ist äquivalent zum Abbrechen der V2-Versiegelungen der Lagerfeldzugänge (siehe Schritt 2). Bei den Versiegelungen der Lagerkammern wird vor dem Rückbau zur Zustandserfassung eine Erkundungsbohrung (Fig. 5-1) erstellt (z. B. Temperaturmessung, Messung der Luftzusammensetzung, usw.).

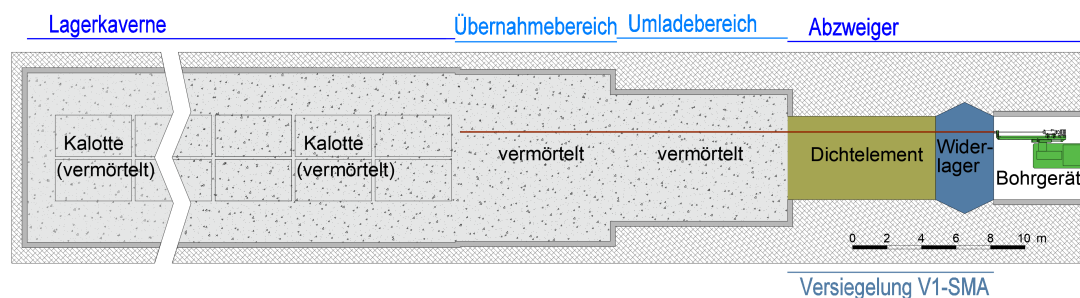


Fig. 5-1: Erstellung einer Erkundungsbohrung am Beispiel einer SMA-Kaverne
(HAA erfolgt analog)

Der Bereich wird mit dem Rückbau der Versiegelung sukzessive flächenhaft gesichert (Fig. 5-2).

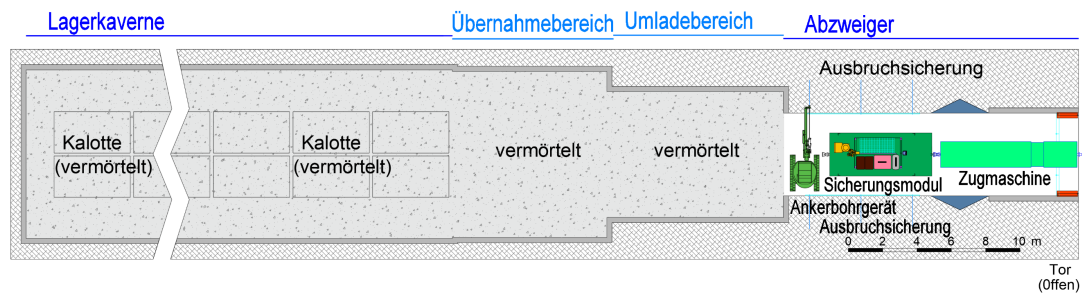


Fig. 5-2: Fortlaufender Einbau einer Ausbruchsicherung im Bereich des geräumten Dichtelements

5. Installation der notwendigen Infrastruktur und Bereitstellung des notwendigen Equipments

Zur Gewährleistung der Arbeits- und Betriebssicherheit für Personal (z. B. Klimaverhältnisse) und der Funktionstüchtigkeit der Gerätschaften (z. B. Temperatur im Lagerstollen) während der Rückholung der Abfälle aus den Lagerkammern, müssen die Betriebspunkte entsprechend ausgestattet werden.

Dies umfasst die Installation der notwendigen Infrastruktur für die Sonderbewetterung und Kühlung der Lagerkammern. Zudem müssen die entsprechenden Betriebspunkte für die Entnahme der ELB aus den Lagerkammer eingerichtet werden. Dazu zählt z. B. die Strom- und Pressluftversorgung, die Beleuchtung und die Entstaubung. Zudem müssen die erforderlichen Gerätschaften (siehe Kapitel 5.2 und Kapitel 5.3) untertag bereitgestellt und einer Funktionsprüfung unterzogen werden.

6. Einrichtung des Strahlenschutzes und der nuklearen Betriebssicherheit

Bei einer Rückholung müssen dieselben Anforderungen an den Strahlenschutz und die nukleare Betriebssicherheit umgesetzt werden wie beim Einlagerungsbetrieb (siehe Kapitel 4.2). Dazu zählt z. B. die Einrichtung von konventionellen Bereichen und Überwachungsbereichen mittels physischer Trennung (z. B. Tore oder Schleuse).

5.2 Rückholung der HAA-Endlagerbehälter

Prinzipiell sind die Abläufe der Rückholung ähnlich wie diejenigen der Einlagerung (siehe Nagra 2022a), finden jedoch in umgekehrter Reihenfolge statt. Zahlreiche Gerätschaften, die für die Einlagerung entwickelt und verwendet werden, können so auch für die Rückholung zum Einsatz kommen. Das Entfernen der Verfüllung unterscheidet sich jedoch deutlich von deren Einbringung.

Alle Arbeiten in den HAA-Lagerstollen haben aus Gründen des Strahlenschutzes ferngesteuert zu erfolgen. Strahlenempfindliche Steuerungskomponenten müssen, wie bei der Einlagerung, vor Strahlung geschützt werden.

Die Geräte für die Rückholung der HAA-Endlagerbehälter (Rückholmodul und Umladegeräte siehe Kapitel 5.2.1) müssen einer Behälteraussentemperatur von bis zu 140 °C standhalten (siehe Kapitel 4.3). Die Massnahmen zur Kühlung der Lagerstollen müssen so ausgelegt werden, dass

die Lufttemperatur auf ein Mass reduziert wird, welches die Funktion und Zuverlässigkeit der Maschinen gewährleistet. Mögliche Massnahmen bzw. Massnahmenkombinationen sind z. B.:

- Auslegung der Bewetterung (maximal)⁸
- Auslegung der Gerätschaften auf hohe Umgebungstemperaturen (> 40 °C)
- Anpassung der Rückholungssequenzen und Berücksichtigung von Kühlungsperioden
- Einsatz von zusätzlichen Massnahmen zum Abführen der Wärme, wie z. B. Kühlungsbohrungen parallel zu den Lagerstollen und/oder Kühlung mit anderen Kühlungsmedien als Luft

5.2.1 Gerätschaften für die HAA-Rückholung

Im Rahmen des Rückholungskonzepts wird vorausgesetzt, dass sämtliche Gerätschaften auf Pneus fahren. Andere Fahrwerke (z. B. Schienen- oder Raupenfahrwerke) sind ebenfalls möglich. Tab. 5-2 listet die benötigten Geräte auf und beschreibt ihre Funktionen in Stichworten.

Fig. 5-3 bis Fig. 5-5 zeigen Konzeptskizzen der jeweiligen Gerätschaften. Bei den Umlade- und Transportgeräte aus Fig. 5-4 handelt es sich um (bau-)gleiche Geräte wie bei der Einlagerung. Für die nachfolgenden Gerätschaften (Tab. 5-2) werden u.a. folgende grundlegende Randbedingungen und Annahmen für das heutige Konzept berücksichtigt:

- Die verwendete Technik und die Prozesse aus der Einlagerung sind, soweit sinnvoll, auch für die Rückholung zu verwenden. Damit können der Entwicklungsaufwand reduziert, von Erfahrungen aus dem Einlagerungsbetrieb profitiert und eine bereits erprobte Technik verwendet werden.
- Die notwendigen Techniken und Systeme sind bereits heute verfügbar.
- Einige der Gerätschaften werden als Sonderanfertigungen hergestellt.
- Gerätschaften sind so auszulegen, dass allfällige Betriebsstörungen von ausserhalb der Lagerstollen behoben werden können (z. B. Ausfahren der Gerätschaften aus den Lagerstollen ohne eigene Antriebe).

Tab. 5-2: Zusammenfassung der erforderlichen Gerätschaften für die Rückholung der HAA-ELB

Gerät (Einsatzort)	Funktion
<u>Windenfahrzeug</u> (ferngesteuert, in Schleuse) (Fig. 5-5)	Bewegen und Sichern aller Geräte / Module, die in den Lagerstollen einfahren. Die Module werden im geneigten Lagerstollen per Gewichtskraft (einfahrend) und mit Seilwinde (ausfahrend) bewegt. Das Windenfahrzeug verfügt über einen eigenen Antrieb.
<u>Zugmaschine</u> (unter- oder übertag) (Fig. 5-5)	Bewegung der Plattformwagen im geologischen Tiefenlager und übertag sowie Rangierfahrten von Arbeitsmodulen und anderen nicht motorisierten Geräten untertag.

⁸ In Abhängigkeit der Zeit. Gilt nur für einen kurzen Zeitraum nach Einlagerung (ca. wenige Jahre bis ein Jahrzehnt).

Tab. 5-2: Fortsetzung

Gerät (Einsatzort)	Funktion
<u>Antriebsmodul</u> (ferngesteuert, im Lagerstollen) (Fig. 5-3)	Bewegen abwärts (unterstützend) und technische Schnittstelle für Versorgungsleitungen der Arbeitsmodule im Lagerstollen.
<u>Baggermodul</u> (ferngesteuert, im Lagerstollen) (Fig. 5-3)	Räumen des Lagerstollens, Herstellen der Befahrbarkeit und Gewährleistung des Abtransports des Materials. Das Baggermodul ist mit einer Schaufel ausgerüstet und kann zudem das Ausbruchmaterial aufnehmen.
<u>Bohrmodul (optional)</u> (ferngesteuert, im Lagerstollen) (Fig. 5-3)	Das Bohrmodul ist für unterstützende Arbeiten (verfestigte Verfüllung) beim Räumen des Lagerstollens mit einem Bohrer ausgerüstet. Alternativ auch z. B. mit Abbruchhammer oder Schrämkopf ausrüstbar.
<u>Rückholmodul</u> (ferngesteuert, im Lagerstollen) (Fig. 5-3)	Aufnahme und Transport eines HAA-ELB in die Schleuse zur Übergabestelle am Umsetzgerät.
<u>Felssicherungsmodul</u> (ferngesteuert, im Lagerstollen) (Fig. 5-3)	Bei Bedarf einer Instandsetzung des Lagerstollenausbaus kann das Modul eingesetzt werden. Es besitzt z. B. ein Ankerbohrgerät, eine Mörtelpumpe für Spritzbeton und einen Spritzroboter.
<u>Umsetzgerät (inklusive Hilfgestell)</u> (ferngesteuert, in Schleuse) (Fig. 5-4)	Umladen eines HAA-ELB vom Rückholmodul in den Shuttle-Overpack-Behälter (SOB).
<u>Teleskopzylinderwagen (2 Stück)</u> (ferngesteuert, in Schleuse) (Fig. 5-4)	Ausgestattet mit horizontal ausfahrbarem Hydraulikzylinder (teleskopartig). Der lagerstollenseitige Teleskopzylinderwagen schiebt den im Umsetzgerät liegenden HAA-ELB in den SOB. Der portalseitige Teleskopzylinderwagen kann zur genauen Positionierung (resp. Korrektur) genutzt werden.
<u>Plattformwagen</u> ⁹ (unter- und übertag) (Fig. 5-4)	Transport der SOB (beladen und unbeladen) auf Lagerebene und an der Tagesoberfläche.
<u>Shuttle-Overpack-Behälter</u> (auf dem Plattformwagen)	(Strahlen-)Schutzbehälter für die weitere Handhabung der HAA-ELB. Er ist baugleich zu denen, die bei der Einlagerung verwendet wurden.

⁹ Auch als selbstfahrend realisierbar. Dann entfällt die Notwendigkeit einer Zugmaschine.

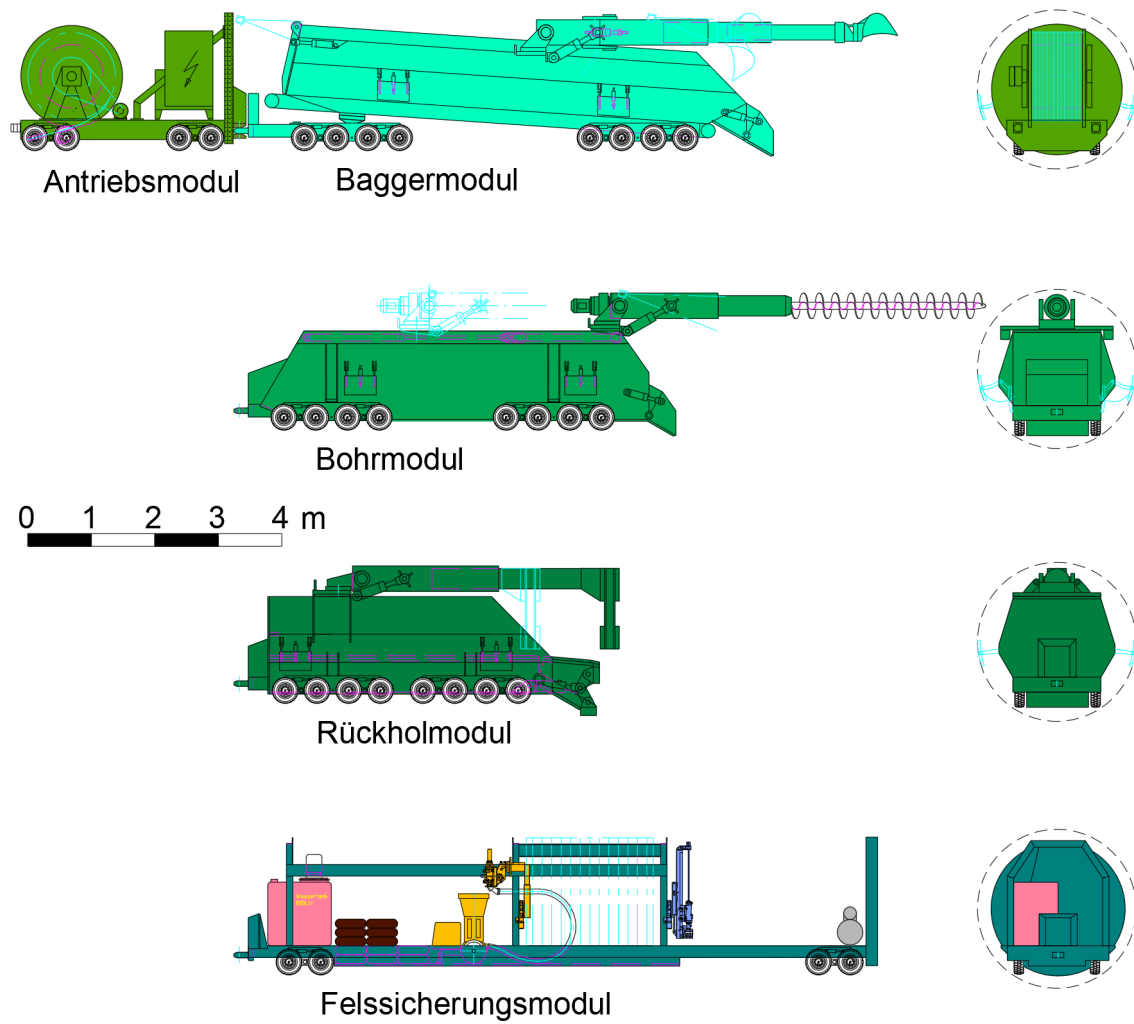
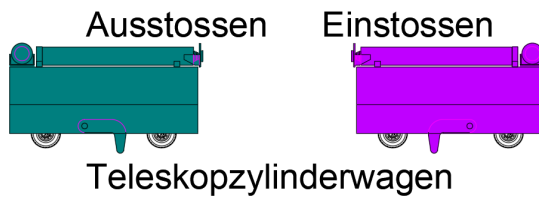


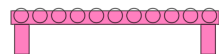
Fig. 5-3: Übersicht der Arbeitsmodule (inkl. Antriebsmodul) für die Rückholung im HAA-Lagerstollen
(Dargestellte Schnitte gelten für den Lagerstollen.)



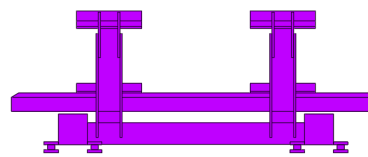
SOB auf Plattformwagen



Teleskopzylinderwagen



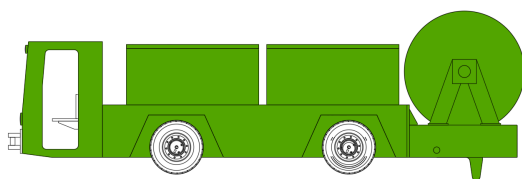
Hilfsgestell



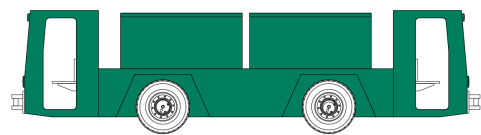
Umsetzgerät



Fig. 5-4: Übersicht der Geräte für das Umladen und den Transport von HAA-ELB



Windenfahrzeug



Zugfahrzeug

Fig. 5-5: Motorisierte Fahrzeuge zum Bewegen von Geräten, Modulen und Plattformwagen

Die Rückholung eines HAA-ELB aus einem Lagerstollen teilt sich in fünf teilweise parallel ablaufende Schritte mit jeweiligen Teilschritten auf. Die nachstehenden Betriebsabläufe setzen den Abschluss der vorbereitenden Arbeiten und den Zugang zu den Einlagerungsstollen (siehe Kapitel 5.1) sowie die Bereitstellung der benötigten Maschinenteknik (Tab. 5-2) voraus. Die hier beschriebenen Prozesse beginnen nach der Entfernung der V1-Versiegelung des Lagerstollens und der Einrichtung der Infrastruktur der physischen Trennung (z. B. Schleuse oder Tor) für den Überwachungsbereich. Fig. 5-6 (unterster Stollen) zeigt die Ausgangssituation in der Übersicht.

Vorbemerkung zur Logistik

Von den verschiedenen Arbeitsmodulen für den Lagerstollen und die Schleuse kommen jeweils nur wenige zeitgleich zum Einsatz, im Lagerstollen kann immer nur ein Arbeitsmodul operieren. Aufgrund der begrenzten Platzverhältnisse ist es daher erforderlich, verschiedene Module an anderer Stelle abzustellen. Es steht ausreichend Platz für das Abstellen und Rangieren der Module im Bereich der Schleuse und in den Abzweignern der benachbarten Lagerstollen zur Verfügung (Fig. 5-6). In der Schleuse ist für Module auf zwei parallelen Fahrspuren Platz.

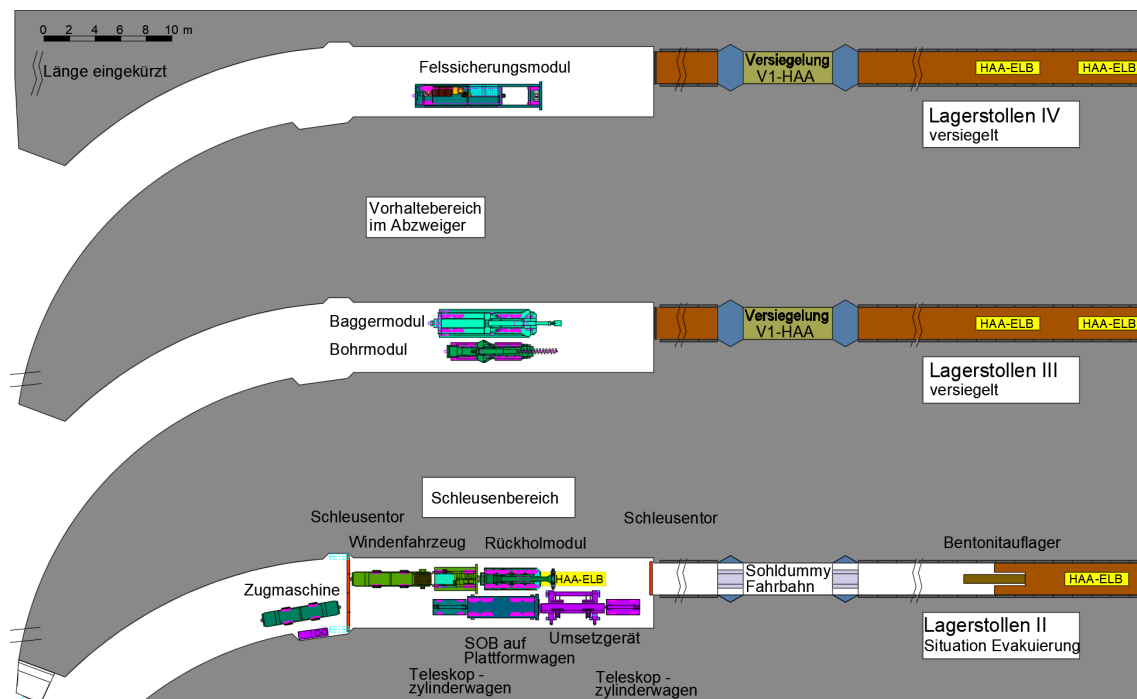


Fig. 5-6: Beispielhafte Darstellung der Logistikflächen während der HAA-Rückholung

Der (Bentonit)-Abraum aus den Lagerstollen kann direkt an die Oberfläche transportiert werden oder unter in einem erstellten oder verfügbaren Raum (z. B. ab der Rückholung in der zweiten Lagerkammer in bereits geräumten Lagerstollen) (zwischen-)gelagert werden.

5.2.2 Freilegen und Entnahme der HAA-ELB aus den verfüllten Lagerstollen

1. Räumzyklus der Lagerstollen und Freilegen der HAA-ELB

1.1. Einfahren des Baggermoduls

Das Windenfahrzeug fährt das abzulassende Gespann (Fig. 5-7) aus Bagger- und Antriebsmodul in die Schleuse. Es verbleibt innerhalb der Schleuse und wird dort verankert. Das Bagger- und das Antriebsmodul werden lagerstollenseitig in der Schleuse positioniert. Das Verankern des Windenfahrzeugs ermöglicht das sichere Ablassen des Gespanns in den Lagerstollen, nachdem das Baggermodul zusammen und mit Hilfe des Antriebsmoduls durch das lagerstollenseitige Schleusentor in den Lagerstollen eingefahren ist. Im geneigten Teil des Lagerstollens unterstützt die Gewichtskraft das Einfahren. Etwaige Widerstände lassen sich mit dem Motor des Antriebsmoduls überwinden, so dass das Gespann immer bis zum Arbeitsort abgelassen werden kann. Parallel entrollt das Antriebsmodul die Versorgungsleitungen und legt diese hinter sich auf der Sohle ab.

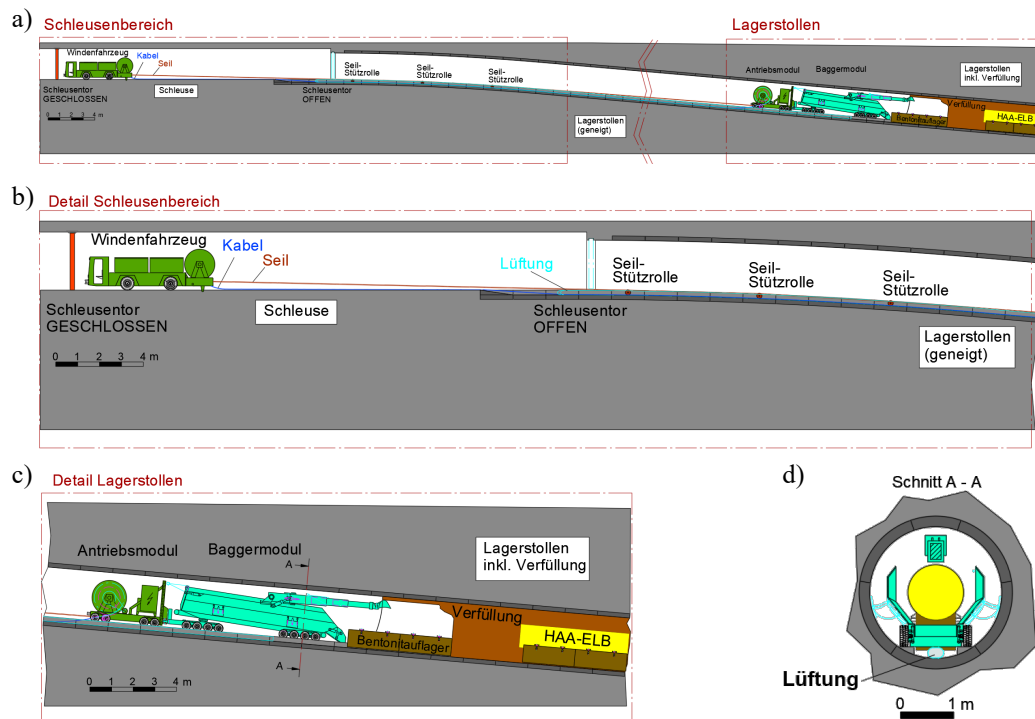


Fig. 5-7: Situationsansicht von Windenfahrzeug, Antriebsmodul und Baggermodul im Lagerstollen¹⁰

- a) Schleusenbereich und Lagerstollen
- b) Detail Schleusenbereich
- c) Detail Lagerstollen
- d) Querschnitt A – A

¹⁰ Lüftung wird auf folgenden Grafiken nicht mehr dargestellt.

1.2. Baggern

Ist das Gespann an der Lagerstollenverfüllung angekommen, wird zunächst die aktuelle Lage des HAA-ELB erfasst (z. B. Radarmessung). Dadurch kann eine ggf. vorhandene Soll-Abweichung der Lage festgestellt werden. Nach der Erfassung der Lage kann mit dem ferngesteuerten Abbaggern begonnen werden (Fig. 5-8). Mit der Schaufel wird das Material aufgenommen und die Ladefläche des Baggermoduls beladen. Ist ein HAA-ELB erreicht, wird dieser teilweise freigelegt (ca. $\frac{1}{3}$ seiner Länge), jedoch nur so weit, dass sich seine Lage nicht verändert.

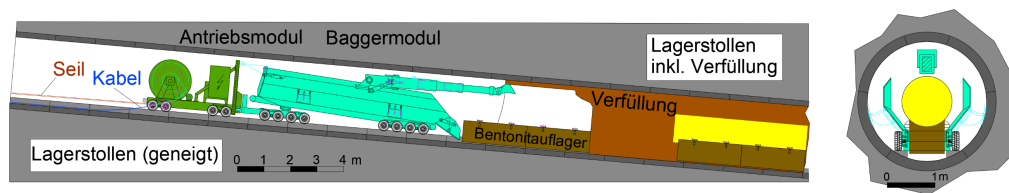


Fig. 5-8: Abbaggern der Lagerstollenverfüllung zum Freilegen der HAA-ELB

1.3. Zurückziehen des Baggermoduls

Ist das Baggermodul vollständig beladen oder ist ein Wechsel zu einem anderen Arbeitsmodul (z. B. Bohrmodul) notwendig, wird es mithilfe der Seilwinde des Windenfahrzeugs gegen das Gefälle des Lagerstollens zurück zur Schleuse gezogen.

1.4. Ausfahren des Windenfahrzeugs und Arbeitsmodulwechsel

Das lagerstollenseitige Tor wird geschlossen und das portalseitige Tor wird geöffnet. Anschliessend fahren Windenfahrzeug und Antriebsmodul aus der Schleuse zu einer Vorhalteposition. Das Baggermodul verbleibt in der Schleuse und wird in Schritt 1.5 entladen.

Je nach Fortschritt wird das nächste Arbeitsmodul (Modulwechsel) eingefahren (Schritte 1.5 – 2).

1.5. Entladung und erneute Bereitstellung des befüllten Baggermoduls

Es erfolgt ggf. die Kontrollmessung des Materials. Ladungen, die sich (wider Erwarten) nicht freimessen lassen, werden in der Schleuse in geeignete Strahlenschutztransportbehältern geladen und nach übertag verbracht. Sonst zieht das Windenfahrzeug das befüllte Baggermodul aus der Schleuse zum Entladeort. Am Entladeort angekommen, wird das Baggermodul geleert. Nach der Entladung fährt das Windenfahrzeug das Baggermodul zu einer Vorhalteposition oder zurück zur Schleuse zur anschliessenden Wiedereinfahrt in den Lagerstollen (siehe Schritt 1.1).

1.6. Einsatz eines Bohrmoduls¹¹

Das Bohrmodul kommt bei Bedarf zum Einsatz, sollte die Lagerstollenverfüllung für einen Schaufeleinsatz zu fest sein und zunächst gelockert werden müssen. Es kann auch zum Einsatz kommen, um die Aufnahme durch das Rückholmodul zu erleichtern (Auflockerung des nahen Umfelds eines ELB siehe Fig. 5-9). Das Bohr- und das Antriebsmodul werden dabei analog zu Schritt 1.1. ein- und zu Schritt 1.3 wieder ausgefahren.

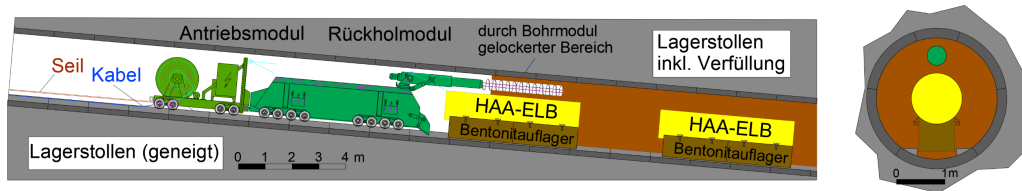


Fig. 5-9: Einsatz des Bohrmoduls zur Auflockerung des Bentonits

2. Entnahme der freigelegten HAA-ELB aus dem HAA-Lagerstollen

Während aller weiteren Betriebsabläufe der Schritte 2 und 3 (nach Schritt 2.1) bleibt das Schleusentor zum Betriebstunnel geschlossen und alle Arbeiten finden ferngesteuert statt. Betriebszustände, bei denen das lagerstollenseitige Schleusentor geschlossen ist und kein unverpackter HAA-ELB in der Schleuse vorhanden ist, können der Kontrolle, der Wartung und gegebenenfalls der Reparatur von Geräten in der Schleuse dienen.

2.1. Bereitstellung von Fahrzeugen und Modulen

In einem Rangierbereich (z. B. benachbarter Abzweiger) wird das Baggermodul oder Bohrmodul gegen das Rückholmodul ausgetauscht. Bereits jetzt müssen die für das Umladen eines rückgeholten HAA-ELB notwendigen Gerätschaften (Umsetzgerät, SOB auf Plattformwagen, Teleskopzylinderwagen), auf der anderen Spur in der Schleuse bereitgestellt werden.

2.2. Einfahren des Rückholmoduls

Das Rückholmodul und das Antriebsmodul werden analog zu Schritt 1.1 als Gespann in den Lagerstollen eingefahren. Das Windenfahrzeug bleibt in der Schleuse und sichert den Vorgang.

2.3. Greifen, Lösen und Ziehen des HAA-ELB

Der Greifarm des Rückholmoduls packt den ELB im vorderen freigelegten Drittel. Er lässt sich mit Greifern von Holzverladefahrzeugen vergleichen.

Durch Heben und gegebenenfalls notwendige anfängliche Dreh- und Horizontalbewegungen wird der HAA-ELB gelöst und anschliessend auf die Ladefläche des Rückholmoduls gezogen.

¹¹ Das Bohrmodul kann auch mit anderen Applikationen (z. B. Bohrhammer) ausgestattet werden



Die Seilwinde des Windenfahrzeugs zieht das Rückholmodul (inkl. Antriebsmodul) aus dem Lagerstollen zurück in die Schleuse. Das Schleusentor zum Lagerstollen wird verschlossen und das Umladen des HAA-ELB kann beginnen.

Das Umsetzgerät setzt hinter dem Rückholmodul das Hilfsgestell der Schleuse ab (siehe Fig. 5-11). Anschliessend schiebt der Greifer des Rückholmoduls den HAA-ELB auf das Hilfsgestell.



Das Umsetzgerät hebt anschliessend den HAA-ELB vom Hilfgestell auf seinen Übergabetisch (siehe Fig. 5-12). Der Vorgang entspricht dem Einlagerungsbetrieb, nur umgekehrt.

3.4. Umladen des HAA-ELB

Der HAA-ELB wird auf den Plattformwagen verladen. Dazu schiebt ihn der Stempel des stollenseitigen Teleskopzylinderwagens vom Übergabetisch des Umsetzgeräts in den Shuttle-Overpack-Behälter auf dem Plattformwagen (Fig. 5-12).

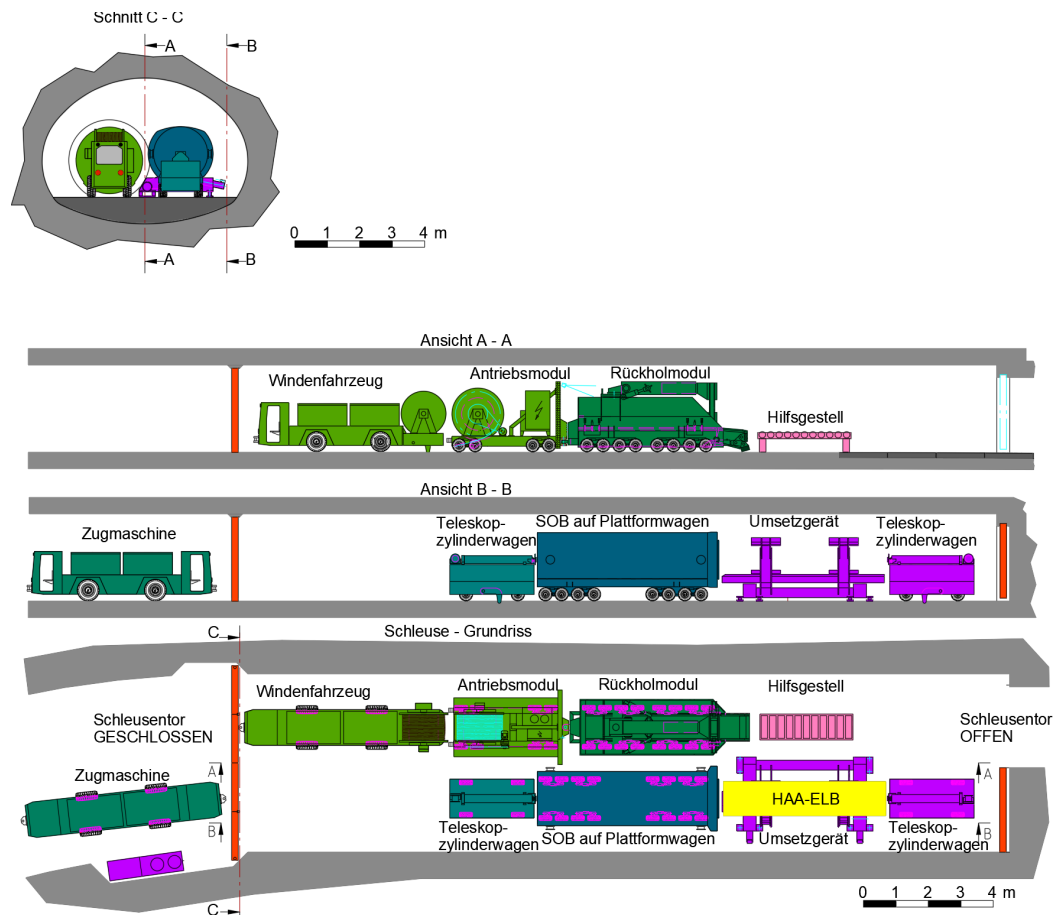


Fig. 5-12: Umladen des HAA-ELB in den SOB auf den Plattformwagen mittels Teleskopzylinderwagen

3.5. Korrektur der Positionierung (optional)

Der portalseitige Teleskopzylinderwagen kann allenfalls die Position des HAA-ELB im SOB korrigieren oder diesen zurück auf das Umsetzgerät stossen.

3.6. Verschiessen des SOB

Ist der HAA-ELB korrekt positioniert, wird der SOB ferngesteuert geschlossen (vgl. Fig. 5-13), so dass alle Voraussetzungen für den Abtransport erfüllt sind.

4. Abtransport zum Schacht und Förderung nach übertag sowie Bereitstellung eines anderen Plattformwagens

Der Transport des SOB von der Schleuse übertag erfolgt identisch wie bei der Einlagerung, jedoch in umgekehrter Reihenfolge.

4.1. Transport zum Schacht

Nach dem Schliessen des SOB kann die Schleuse zum Betriebstunnel geöffnet werden. Die Zugmaschine fährt in die Schleuse (Fig. 5-13) und zieht den portalseitigen Teleskopzylinderwagen sowie den Plattformwagen heraus. Danach fährt die Zugmaschine den Plattformwagen mit HAA-ELB im SOB zum Schacht.

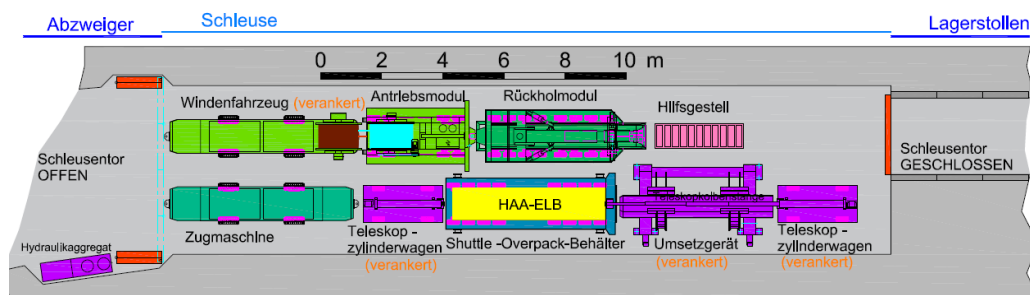


Fig. 5-13: Zugmaschine im Umladebereich für den Abtransport des HAA-ELB im SOB auf Plattformwagen

4.2. Verladen des Plattformwagens auf das Fördermittel

Am Schachtanschlag angekommen, schiebt oder zieht die Zugmaschine den Plattformwagen auf das Fördermittel, den Korb. Dort erfolgt eine Arretierung, um Bewegungen des Plattformwagens während des anschliessenden Schachttransports zu vermeiden (Nagra 2022a).

4.3. Förderung des Plattformwagens an die Oberfläche

Über den Schacht wird der Plattformwagen mit SOB an die Oberfläche gefördert. Hat der Schachtkorb die Oberfläche erreicht, wird die Arretierung gelöst und der Plattformwagen von einer anderen Zugmaschine übernommen. Sie fährt ihn an seinen vorgesehenen Bestimmungsort.

Ein Abtransport über eine Rampe ist ebenfalls möglich. In diesem Fall wird der HAA-ELB über die Rampe bis zur Oberfläche weitergefahren resp. der leere SOB über die Rampe zum Abzweiger der Lagerstollen untertag gefahren. Die Schritte 4.2 und 4.3 entfallen.

5. Vorbereitung nächster Räumzyklus

5.1. Vorbereitung nächster Räumzyklus

Es folgen Rangierarbeiten zum Bereitstellen bzw. Vorhalten der Module für Schritt 1.1, um den nächsten Räumzyklus zu beginnen.

Danach werden die Schritte 1 – 4 so lange wiederholt, bis der Lagerstollen geräumt ist.

5.3 Rückholung der SMA-Endlagerbehälter

Beim vorliegenden Rückholungskonzept wird beispielhaft angenommen, dass sämtliche Gerätschaften des Fuhrparks mit Pneus oder Raupenfahrwerken bzw. Schiene (Kran) ausgestattet werden. Andere Fahrwerke (z. B. Schreitwerke) sind ebenfalls möglich. Die Aufenthaltszeiten und Arbeitsbedingungen von Personal in den SMA-Lagerkavernen werden so festgelegt, dass diese allen Vorschriften entsprechen (Grenzwerte für Strahlung, Lärm, Staub usw.). Ferngesteuerte Prozesse werden bei der SMA-Rückholung nicht zwingend benötigt, bieten aber in Zukunft im Sinne des langen Zeithorizonts weitere Handlungsoptionen.

5.3.1 Gerätschaften für die SMA-Rückholung

Tab. 5-3 listet die benötigten Gerätschaften auf und beschreibt ihre Funktionen. Fig. 5-14 bis Fig. 5-16 zeigen Darstellungen der jeweiligen Gerätschaften. Alle verwendeten Geräte sind bereits heute in gleicher oder ähnlicher Bauart auf dem Markt verfügbar. Die Gerätschaften der Fig. 5-15 und Fig. 5-16 entsprechen denen der Einlagerung.

Für die nachfolgend dargestellten Gerätschaften werden folgende grundlegenden Randbedingungen und Annahmen für das heutige Konzept berücksichtigt:

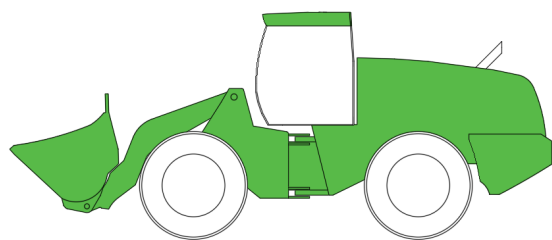
- Die verwendete Technik und die Prozesse aus der Einlagerung sind, so weit sinnvoll, auch für die Rückholung zu verwenden. Damit kann der Entwicklungsaufwand reduziert, aus Erfahrungen aus dem Einlagerungsbetrieb profitiert und eine bereits erprobte Technik verwendet werden (z. B. Einlagerungskran).
- Eine Neuentwicklung von Technik ist nicht erforderlich. Die eingesetzten Gerätschaften beruhen mehrheitlich auf konventioneller Technik, die sich im Berg- und Untertagebau bewährt hat (Ausnahme Schwertsäge z. B. im Strassenbau; hier: modifizierte Grabenfräse).
- Die Gerätschaften sind, wenn notwendig, auch als Sonderanfertigungen (z. B. ferngesteuerte Bedienung) herstellbar.

Tab. 5-3: Zusammenfassung der erforderlichen Gerätschaften für die Rückholung SMA

Gerät (Einsatzort)	Funktion
<u>Bagger mit Abbruchhammer und Schaufel</u> (Umladebereich bis Lagerkaverne) (Fig. 5-14)	Entfernen der Verfüllung im Umladebereich, Übernahmebereich und in der Kaverne sowie Materialabtransport.
<u>Schwertsäge</u> (Kaverne) (Fig. 5-14)	Aufsägen von etwa 10 – 20 cm breiten, mit Mörtel verfüllten vertikalen Spalten zwischen den SMA-ELB.
<u>Saug-Modul</u> (Lagerkaverne) (Fig. 5-14)	Absaugen von Auswurfmaterial der Schwertsäge und losem Verfüllmaterial. Das Modul wird an einem Bagger befestigt und dient der kontinuierlichen Reinigung des Sägeschnitts der Schwertsäge.
<u>Felssicherungsgeräte</u> (Lagerkaverne und Übernahmebereich) (Fig. 5-14)	Geräte zur systematischen Sicherung des Kavernengewölbes und des Umlade- und Übernahmebereichs. Dazu gehören z. B. ein Ankerbohrgerät und eine Spritzbetonpumpe mit Spritzroboter.

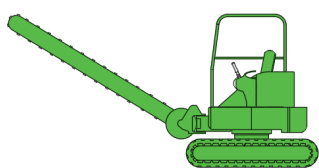
Tab. 5-3: Fortsetzung

Gerät (Einsatzort)	Funktion
<u>Kavernenkran</u> (Lagerkaverne und Übernahmebereich) (Fig. 5-15)	Anheben und Transport eines SMA-ELB aus der Kavernenstrosse über das Greifmodul. Der Kavernenkran hebt einen SMA-ELB an der Oberseite und transportiert ihn aus der Kaverne bis in den Übernahmebereich. Bei Bedarf steht ein Greifgehänge zur Verfügung, um den SMA-ELB von der Unterseite anheben zu können (vgl. Fig. 5-23).
<u>Übernahmekran</u> (Übernahme- und Umladebereich) (Fig. 5-15)	Ein Portalkran zum Umladen eines SMA-ELB auf den Plattformwagen. Der Übernahmekran ist mit einem Greifgehänge ausgestattet und nimmt den SMA-ELB im Übernahmebereich entweder vom Rückholungstrolley oder vom Boden auf und setzt ihn im Umladebereich auf den Plattformwagen.
<u>Greifgehänge</u> (an Übernahmekran und Kavernenkran) (Fig. 5-15)	Anheben und Transport eines SMA-ELB an dessen Unterseite durch rotierbare Stabelemente. Das Greifgehänge besteht aus vier Vertikalrohren, welche jeweils mit einem horizontalen Tragelement ausgestattet sind. Die Vertikalrohre werden an den vier Ecken eines SMA-ELB bis auf Niveau seiner Unterkante parallel in den freigesägten Spalten (zu den benachbarten SMA-ELB) heruntergefahren. Dort heraus rotieren horizontale Tragelemente unter den entsprechenden SMA-ELB.
<u>Rückholungstrolley</u> (Lagerkavernenkalotte) (Fig. 5-16)	Aufnehmen und Transportieren eines SMA-ELB aus der Kavernenkalotte. Der Rückholungstrolley entspricht technisch dem bereits während der Einlagerung verwendeten Einlagerungstrolley.
<u>Plattformwagen</u> (unter- und übertag) (Fig. 5-16)	Transport des SMA-ELB untertag und an der Oberfläche.
<u>Zugmaschine</u> (unter- und übertag) (Fig. 5-16)	Transport des Plattformwagens zum Schacht. Die motorisierte Zugmaschine kommt zum Einsatz, wenn der Plattformwagen keinen eigenen Antrieb besitzt. Sie wird auch zum Verschieben anderer, antriebsloser Geräte (z. B. Felssicherungsmodul) untertag verwendet.

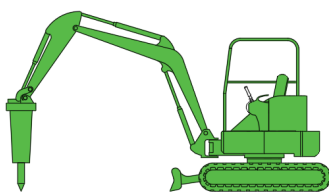


0 1 2 3 4 m

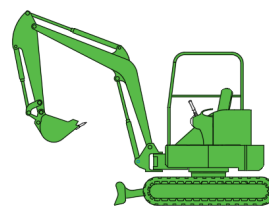
Radlader



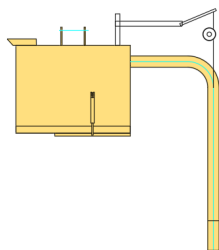
Bagger mit Schwertsäge



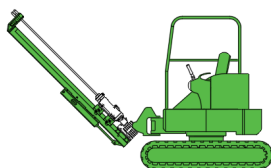
Bagger mit Abbruchhammer



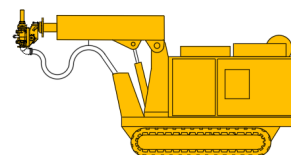
Bagger mit Schaufel



Saug-Modul

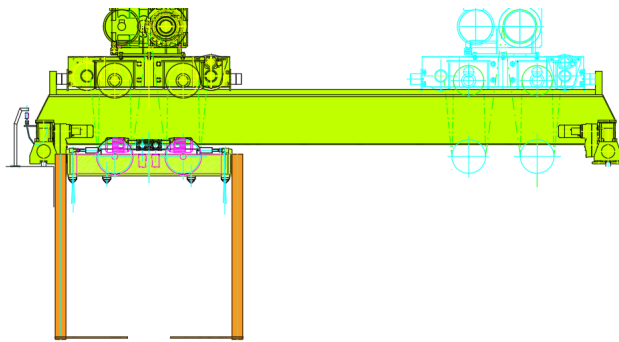


Bagger mit Ankerbohrgerät

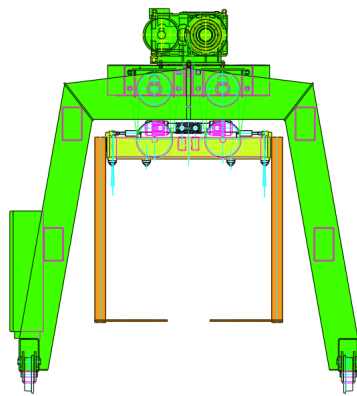
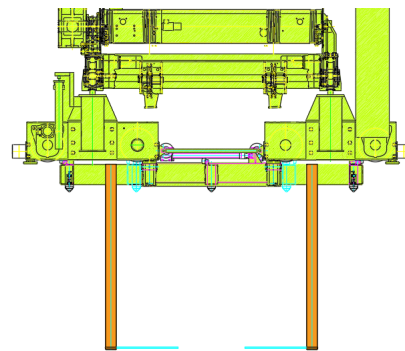


Spritzbetonpumpe

Fig. 5-14: Gerätschaften für die Rückholung der SMA-ELB (Arbeitsgeräte)



Kavernenkran mit Greifgehänge



Übernahmekran mit Greifgehänge

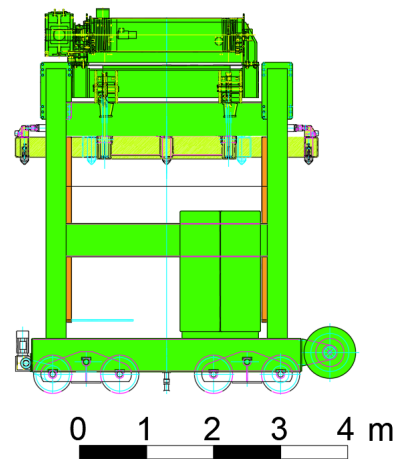


Fig. 5-15: Gerätschaften für die Rückholung der SMA-ELB (Transport Teil 1)
Krantransportgeräte Strosse und Übernahmebereich

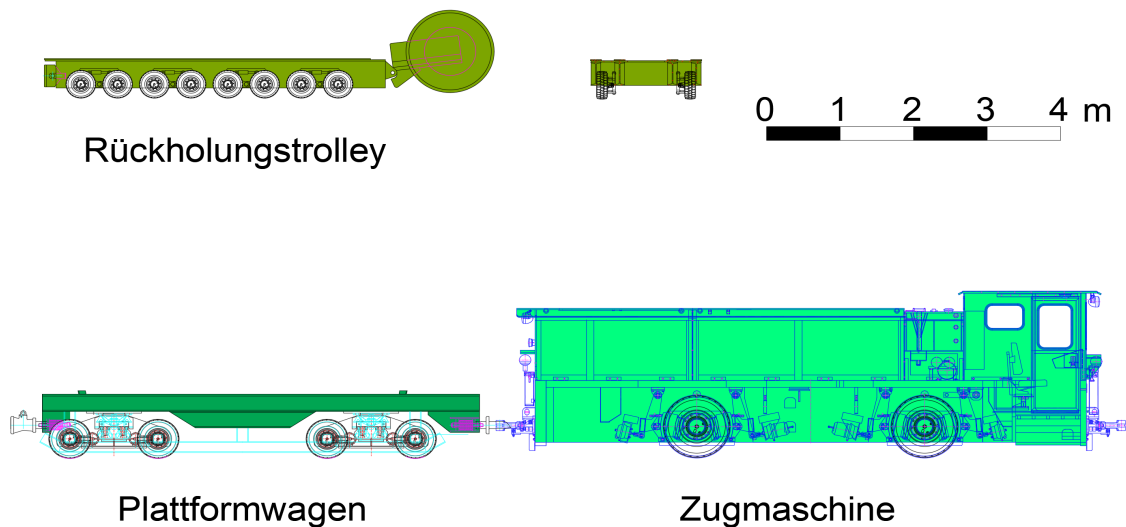


Fig. 5-16: Gerätschaften für die Rückholung der SMA-ELB (Transport Teil 2)
Transportgeräte Kalotte und ausserhalb der Kavernen

Aktuell ist für die Einlagerung ein Kavernen- und Umladekran für den Transport der SMA-ELB in der Lagerkaverne und für das Umladen der SMA-ELB vor der Lagerkaverne vorgesehen (Nagra 2022a). Es sind jedoch auch andere Lösungen, wie z. B. Greifstapler, technisch möglich. Die SMA-Rückholung greift auf Techniken zurück, welche bereits bei der Einlagerung eingesetzt wurden (z. B. fahrbarer Grund in der Strosse, Krantransporte, usw.).

In den SMA-Kavernen stehen grosse Querschnitte zur Verfügung, die für die Betriebsabläufe der Rückholung genügend Platz bieten. Fig. 5-18, Fig. 5-21, und Fig. 5-28 zeigen beispielhaft die Platzverhältnisse in den verschiedenen Bereichen der Lagerkaverne und der Übernahmebereiche.

Die Rückholung der SMA-ELB aus den SMA-Lagerkavernen läuft gemäss den folgenden übergeordneten Schritten mit jeweiligen Teilschritten ab. Die nachstehenden Betriebsabläufe setzen den Zugang zu den SMA-Lagerkavernen (Kapitel 5.1), die Bereitstellung der benötigten Maschinentechnik (Tab. 5-3) sowie den Abschluss aller erforderlichen, vorbereitenden Arbeiten voraus. Letztere umfassen neben punktuellen Ertüchtigungen des Ausbaus auch die Installation der Bewetterung, die bautechnische Einrichtung des Betriebspunkts (u.a. Strom- und Pressluftversorgung, Beleuchtung, Entstaubung) und die Einrichtung einer Schleuse bzw. einer physischen Trennung mittels Tore. Der Bereich der Schleuse kann im Abzweiger realisiert werden. In den Abbildungen (siehe z. B. Fig. 5-17) wird der Beginn dieses Bereichs mit einem Tor gekennzeichnet. Die hier beschriebenen Prozesse beginnen nach dem Rückbau der V1-Versiegelung.

Vorbemerkung zur Logistik

Der Abraum der Lagerkavernen kann direkt an die Oberfläche abtransportiert werden oder in einen erstellten oder verfügbaren Raum untertag (z. B. ab der Rückholung in der zweiten Lagerkammer in bereits geräumten Lagerkavernen) (zwischen-) gelagert werden.

1. Räumen von Ablade- und Übernahmebereich zwischen Abzweigertunnel und erster ELB-Querreihe in der SMA-Lagerkavernenkalotte

1.1. Lösen und Ausfahren des Mörtels

Ein mit einem Abbruchhammer ausgestatteter Bagger spitzt den Mörtel im Umlade- und Übernahmebereich sowie in der Kavernenkalotte bis zur ersten ELB-Querreihe ab. Ein Zweiter mit einer Schaufel ausgerüsteter Bagger transportiert und verlädt das Abbruchmaterial auf einen Lader im Abzweiger zum Abtransport.

1.2. Einbau der Gewölbesicherung

Sobald über eine vorher festgelegte Abschlagslänge der Mörtel abgebrochen wurde, erfolgt die Sicherung des entsprechenden Gewölbeabschnitts. Die Sicherung kann beispielsweise aus einer Kombination von Systemankerung, Netzen und Spritzbeton bestehen. Zur Gewährleistung der Arbeitssicherheit wird die Massnahme systematisch – unabhängig davon, wie stark das Gewölbe tatsächlich beschädigt ist – umgesetzt. Die folgende Abbildung (Fig. 5-17) zeigt den Einbau der Gewölbesicherung (letzte Sequenz) nach vollständigem Abbruch des M1-Mörtels im Übernahmebereich.

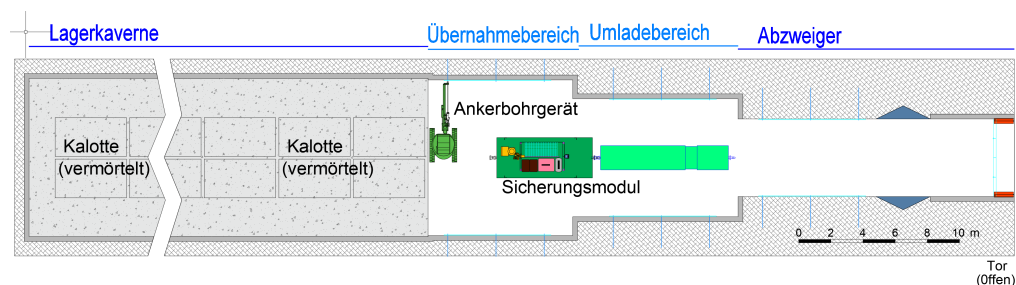


Fig. 5-17: Darstellung Einbau Ausbruchsicherung: Sequenz vollständig geräumter Übernahmebereich

5.3.2 Freilegen und Entnahme der SMA-ELB aus den verfüllten Lagerkavernen (Kalotte)

Fig. 5-18 zeigt die Platzverhältnisse in der Kalotte (oberes Drittel der Kaverne). Anschliessend werden im Konzept mehrheitlich Situationsansichten (z. B. Fig. 5-18) gezeigt, die die jeweilige Situation bei der SMA-Rückholung in der Kalotte zeigen. In den Situationsansichten der Kalotte werden zur besseren Übersicht die Behälter der SMA-Strosse, die sich unterhalb befinden, nicht dargestellt (z. B. Fig. 5-25). Diese werden erst wieder ab Kapitel 5.3.4 dargestellt. Siehe dazu z. B. Fig. 5-30.

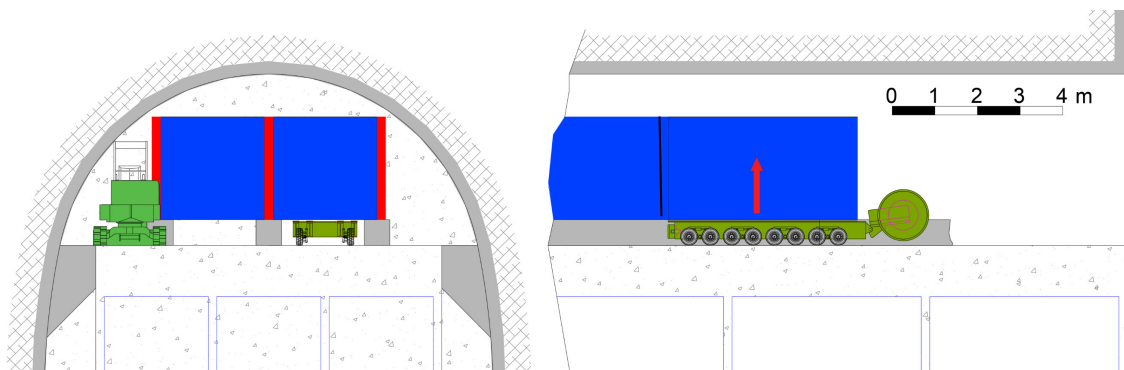


Fig. 5-18: Beispielhafte Darstellung eines Geräteinsatzes in der Kalotte (Platzverhältnisse)
Profil und Längsschnitt

2. Räumzyklus der SMA-Lagerkavernenkalotte und dortiges Freilegen der SMA-ELB

2.1. Lösen und Ausfahren des Mörtels in Kalottenstössen und Firste

Ein Bagger mit einem Abbruchhammer spitzt den Mörtel im Querschnitt entlang der aktuell rückzuholenden SMA-ELB-Querreihe ab (Firste und Stösse). Ein weiterer mit einer Schaufel ausgerüsteter Bagger transportiert den abgebrochenen Mörtel auf einen Lader im Abzweiger (Fig. 5-18) zum Abtransport.

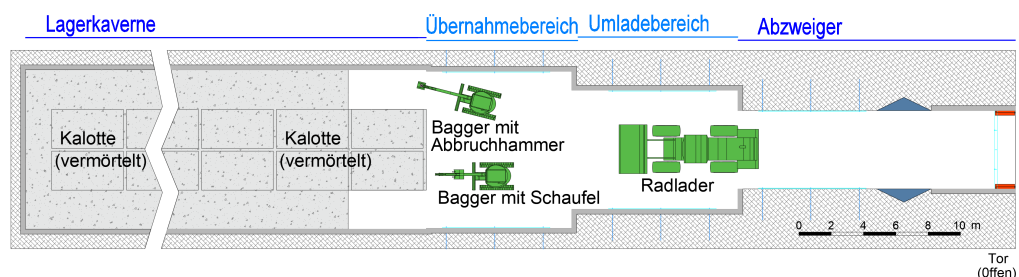


Fig. 5-19: Darstellung Freilegen der SMA-ELB in der Kalotte: Abbruch Mörtel Firste und Stösse

2.2. Lösen des SMA-ELB aus dem Mörtelverbund

Mit der Schwertsäge wird der Spalt zwischen den SMA-ELB bzw. zwischen den SMA-ELB und dem seitlichen Mörtel (Kavernenwand) freigelegt, um auf diese Weise den Verbund zwischen SMA-ELB und Mörtel zu lösen (Fig. 5-20).

Ein unbeabsichtigter Anschnitt der SMA-ELB kann, aufgrund der deutlich unterschiedlichen Materialfestigkeiten (inkl. Armierung des SMA-ELB) von SMA-ELB und Verfüllmörtel, der guten Steuerbarkeit der Schwertsäge und durch Einsatz speziell geschulten Personals, ausgeschlossen werden.

An ihrer Rückseite (Seite zur nächsten ELB-Querreihe) grenzt die aktuell rückzuholende ELB-Querreihe direkt an die nächste ELB-Querreihe an, so dass dort kein Spalt freigeschnitten werden muss. Mit dem Saug-Modul wird das Auswurfmaterial entfernt. Anschliessend wird das Verfüllmaterial unterhalb der SMA-ELB (z. B. saugend) entfernt. Die SMA-ELB sind nun freigelegt.

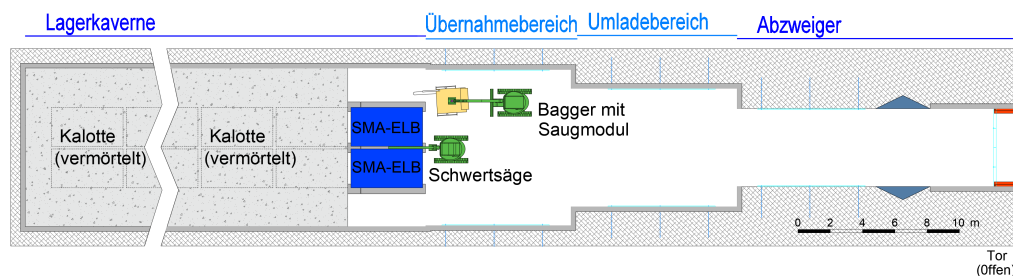


Fig. 5-20: Darstellung Freilegen der SMA-ELB in der Kalotte: Sägen des Spalts zwischen SMA-ELB

3. Vorbereiten Übernahmekran

Die folgende Abbildung (Fig. 5-21) zeigt eine Übersicht der Platzverhältnisse der Kräne in der Lagerkaverne und im Umladebereich bis zur Verladung auf den Plattformwagen. Im Schritt 3 wird die Installation des Übernahmekrans beschrieben. Die Installation des Kavernenkrans erfolgt erst später in Schritt 8.6 bei der Rückholung in der Strosse.

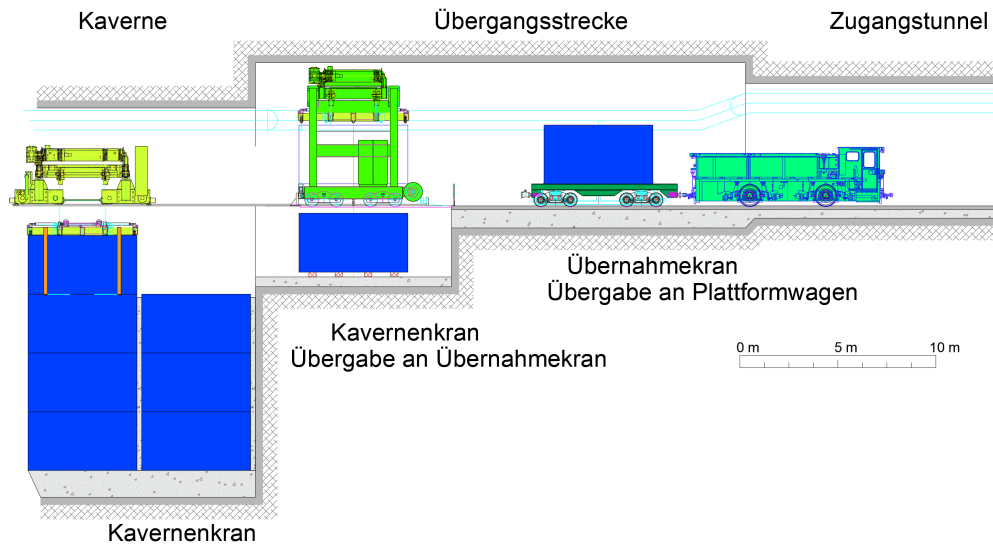


Fig. 5-21: Darstellung Überblick Platzverhältnisse Kräne (Längsschnitt)

3.1. Installation Übernahmekran im Übernahme- und Umladebereich

Der Übernahmekran wird in den Übernahme- und Umladebereich gefahren und aufgebaut (Fig. 5-22). Sein Aktionsradius wird so erstellt, dass er räumliche Überschneidungen mit dem zu einem späteren Zeitpunkt eingebauten Kavernenkrane (Schritt 8.6) sowie zum Aktionsradius des Plattformwagens hat. Das Greifgehänge wird am Übernahmekran installiert (Fig. 5-23), um die SMA-ELB an deren Unterseite anheben zu können.

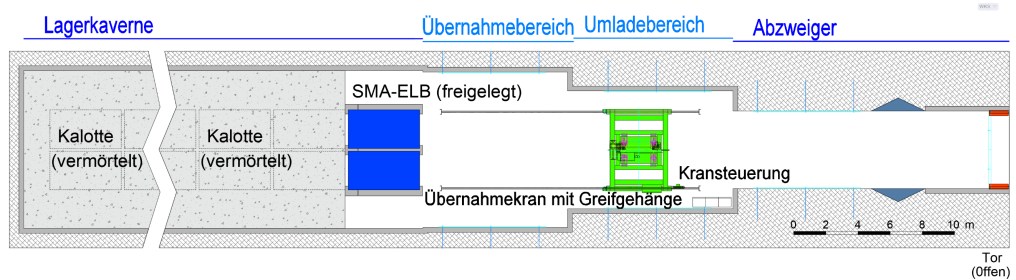


Fig. 5-22: Installation Übernahmekran im Übernahme- und Umladebereich

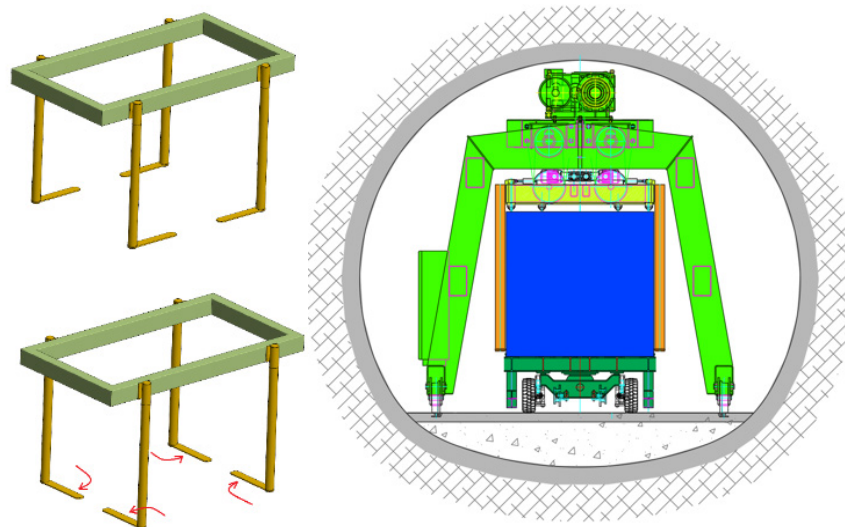


Fig. 5-23: Darstellung Greifgehänge am Übernahmekran im Umladebereich
Verladen SMA-ELB auf Plattformwagen

4. Entnahme der freigelegten SMA-ELB aus der Kalotte der Lagerkaverne

4.1. Einfahrt von Rückholungstrolley, Plattformwagen und Zugmaschine

Der Rückholungstrolley fährt aus dem Abzweiger in die Lagerkaverne bis unter den rückzuholenden SMA-ELB ein. Er nutzt dafür den Freiraum zwischen den Betonauf-lagern des SMA-ELB. Das Gespann aus Plattformwagen und Zugmaschine fährt rück-wärts in den Übernahmebereich ein, so dass sich die Zugmaschine portalseitig vom Plattformwagen befindet (Fig. 5-24).

4.2. Anheben und Transport des SMA-ELB

Der Rückholungstrolley wird unter den SMA-ELB gefahren, ähnlich einem Gabel-stapler, und der SMA-ELB wird angehoben. Anschliessend wird der SMA-ELB auf dem Rückholungstrolley in den Übernahmebereich transportiert (Fig. 5-24).

4.3. Umladen des Behälters im Übernahmebereich

Der Portalkran im Übernahmebereich lädt den Behälter vom Rückholungstrolley auf den Plattformwagen (Fig. 5-24).

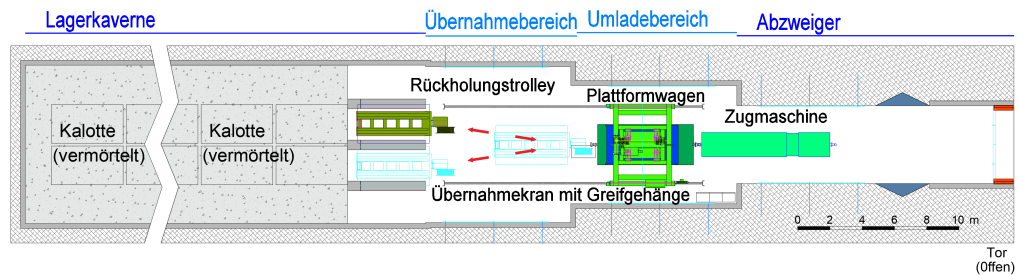


Fig. 5-24: Entnahme SMA-ELB in der Kalotte und Umladen im Übernahmebereich

5.3.3 Transport von SMA-ELB an die Oberfläche (Kalotte), Sicherung des Kavernengewölbes und Wiederholung der Schritte zur vollständigen Räumung (Kalotte)

Der Transport des SMA-ELB (mit oder ohne Transportbehälter; siehe Kapitel 4.2) nach übertag erfolgt identisch wie bei der Einlagerung, jedoch in umgekehrter Reihenfolge. Er wird hier zur Vollständigkeit beschrieben.

5. Transport nach übertag

5.1. Transport zum Schacht

Eine Zugmaschine übernimmt den Plattformwagen und fährt ihn mit dem SMA-ELB zum Schacht (Fig. 5-25).

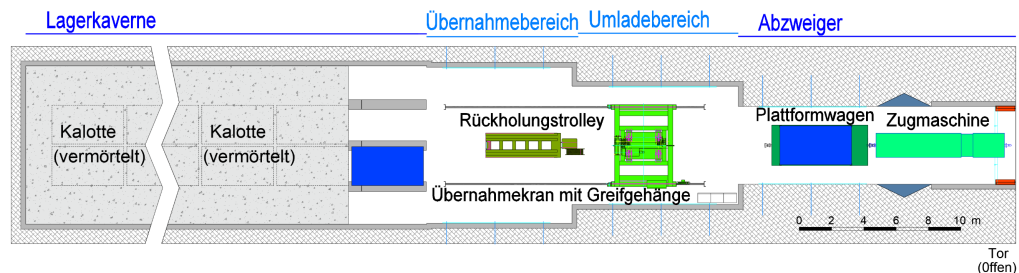


Fig. 5-25: Transport von SMA-ELB zum Schacht

5.2. Verladen des Plattformwagens auf das Fördermittel

Am Schachtfuss angekommen, schiebt oder zieht die Zugmaschine den Plattformwagen auf das Fördermittel, den Korb. Dort erfolgt eine Arretierung, um Bewegungen des Plattformwagens während dem anschliessenden Schachttransport zu vermeiden.

5.3. Förderung des Plattformwagens übertag

Über den Schacht wird der Plattformwagen mit Behälter an die Oberfläche gefördert. Hat er die Oberfläche erreicht, wird die Arretierung gelöst und der Plattformwagen von einer weiteren Zugmaschine übernommen. Sie fährt ihn an seinen vorhergesehen Bestimmungsort.

Ein Abtransport über eine Rampe ist ebenfalls möglich. In diesem Fall wird der SMA-ELB lediglich über die Rampe bis zur Oberfläche weitergefahren (Schritte 5.2 und 5.3 entfallen).

6. Sicherung Kavernengewölbe

6.1. Einbau Gewölbesicherung (sukzessive mit Schritt 4 und 5)

Sobald eine SMA-ELB-Querreihe aus der Kalotte rückgeholt wurde, erfolgt die Sicherung des entsprechenden Gewölbeabschnitts. Die Sicherung kann beispielsweise aus einer Kombination von Systemankerung, Netzen und Spritzbeton bestehen (Fig. 5-26). Zur Gewährleistung der Arbeits- und Betriebssicherheit wird die Massnahme systematisch umgesetzt, unabhängig davon, wie stark das Gewölbe tatsächlich beschädigt ist. Diese Arbeiten können parallel zum Transport des zweiten SMA-ELB pro Querreihe zum Schachtbauwerk stattfinden.

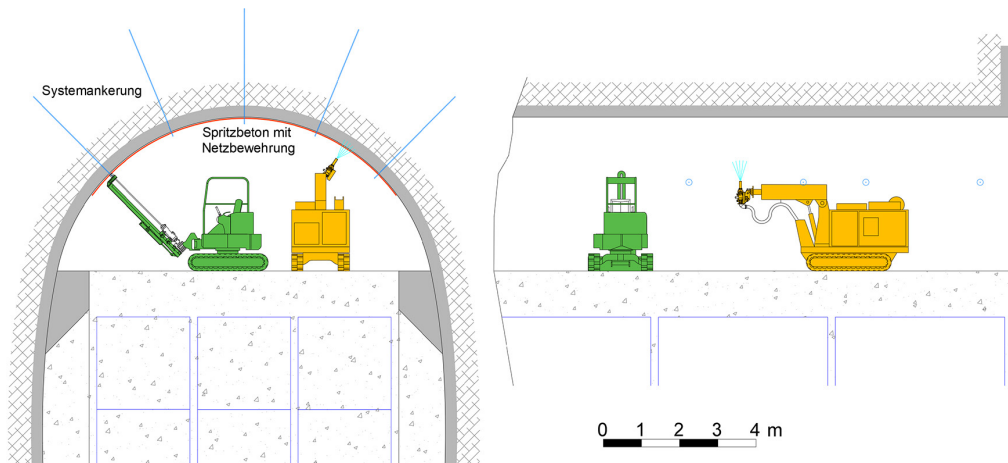


Fig. 5-26: Darstellung Sicherung des Kavernengewölbes
Profil und Längsschnitt

7. Wiederholung der Schritte 2 bis 6

Die Schritte 2 bis 6 (ausgenommen 3) werden so oft wiederholt, bis die gesamte Kalotte geräumt ist (Fig. 5-27). Anschliessend beginnt die Rückholung aus der Kavernenstrosse.

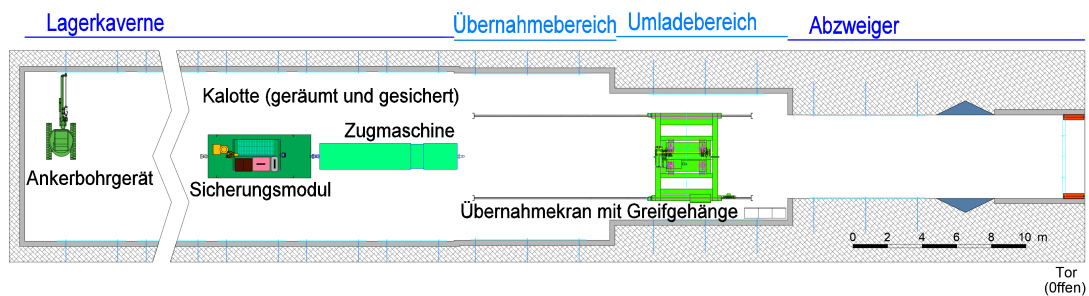


Fig. 5-27: Endzustand nach der SMA-Rückholung in der Kalotte

5.3.4 Freilegen und Entnahme der SMA-ELB aus den verfüllten Lagerkavernen (Strosse)

Fig. 5-28 zeigt beispielhaft die Platzverhältnisse in der Strosse (unteres Zwei-Drittel der Kaverne). Anschliessend werden im Konzept auch z.T. Situationsansichten gezeigt, die die jeweilige Situation bei der SMA-Rückholung in der Strosse zeigen.

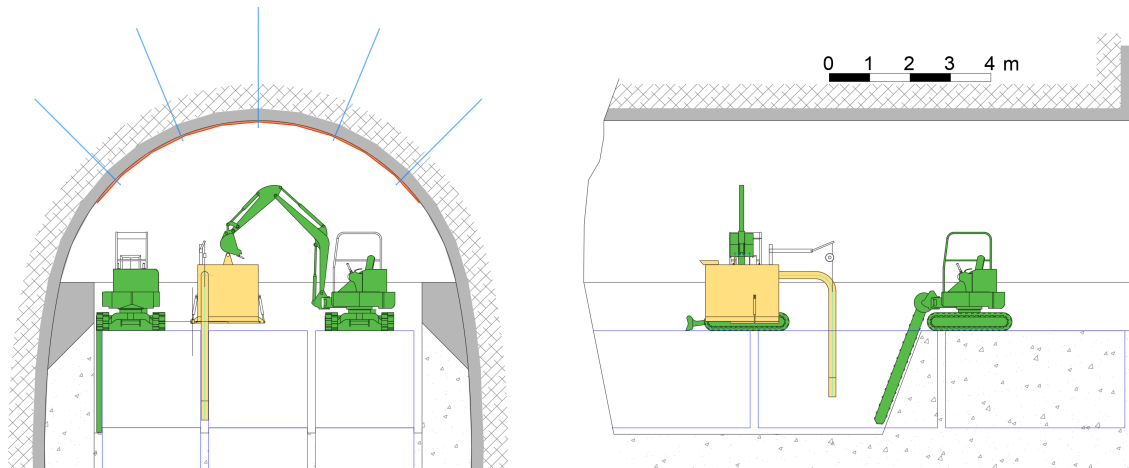


Fig. 5-28: Beispielhafte Darstellung eines Geräteinsatzes in der Strosse (Platzverhältnisse)
Profil und Längsschnitt

8. Vorbereitung Kavernenstrosse und Freilegen der SMA-ELB

8.1. Lösen und Ausfahren des Mörtels

Wie in Schritt 2.1 erfolgt der Abbruch und Abtransport des Mörtels mittels Bagger mit Schaufel und Abbruchhammer. Dabei wird der Mörtel über die gesamte Kavernenfläche von oben nach unten abgebrochen, bis eine ebene Fläche auf Höhe Oberkante der rückzuholenden ELB-Lage in der Strosse entsteht (Fig. 5-29).

Wenn eine Lage von SMA-ELB rückgeholt wurde (siehe Schritt 8.3) kann der Mörtel unter dem Kranaufleger ebenfalls durch einen Bagger mit Abbruchhammer bis auf das Niveau Oberkante der unteren ELB-Reihe abgebrochen werden. Ab dieser Lage ist ein Abtransport des Mörtels auch mittels Förderkörben am Kavernenkran möglich.

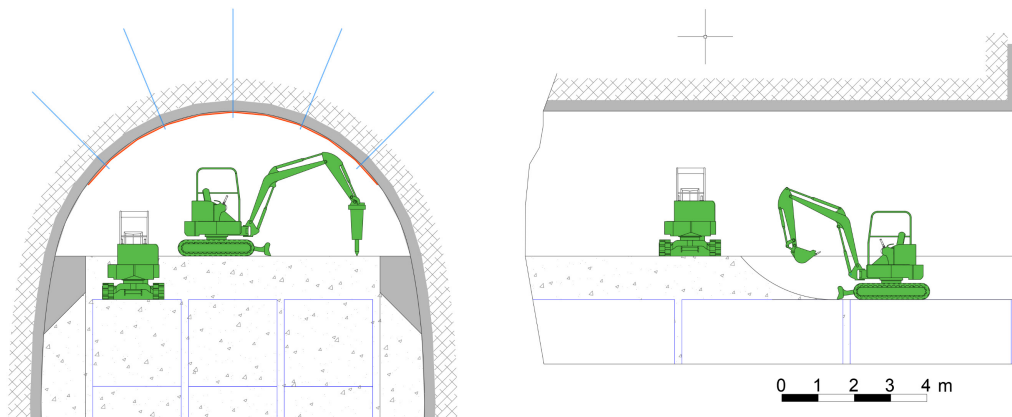


Fig. 5-29: Abbruch Mörtelschicht zum Freilegen der obersten ELB-Reihe (Strosse)
Profil und Längsschnitt

8.2. Einbau Sicherung Kranbahnauflager

Das Ankerbohrgerät fährt in die Kaverne ein. Es bohrt, über die gesamte Länge der Kranbahnauflager, Anker in zu definierenden Abständen, welche die Auflager und den Portalkran im späteren Betrieb sichern. (Fig. 5-30). Die Anker werden gemäss der engen Platzverhältnisse horizontal oder so weit wie möglich nach oben geneigt durch das Kranbahnauflager und das Kavernengewölbe in das Gebirge gebohrt.

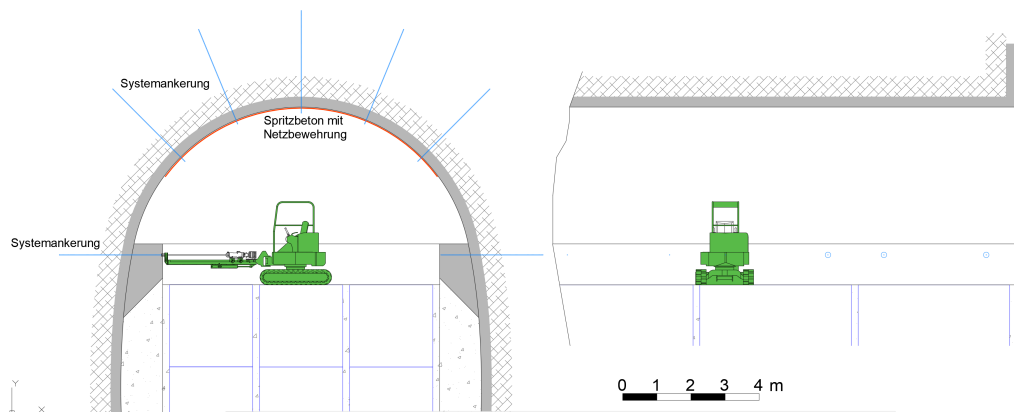


Fig. 5-30: Bohrung der Systemankerung für die Sicherung der Kranbahnauflager
Profil und Längsschnitt

8.3. Freischneiden der SMA-ELB

Die Schwertsäge wird auf die aktuell rückzuziehende ELB-Lage gefahren. Anschliessend werden die SMA-ELB dieser Lage aus dem Mörtelverbund gesägt. Dazu dienen in einem ersten Schritt vier Schnitte in Längsrichtung, jeweils über die komplette Kavernenlänge. Danach folgen Schnitte zwischen den ELB in Querrichtung. Die Schnitttiefe deckt die Gesamthöhe der rückzuziehenden ELB-Lage ab. Einen Gesamtüberblick zeigt Fig. 5-31. In dieser Abbildung ist bereits die Grube aus Schritt 8.4 abgesenkt und der Kavernenkrane aus Schritt 8.6 installiert.

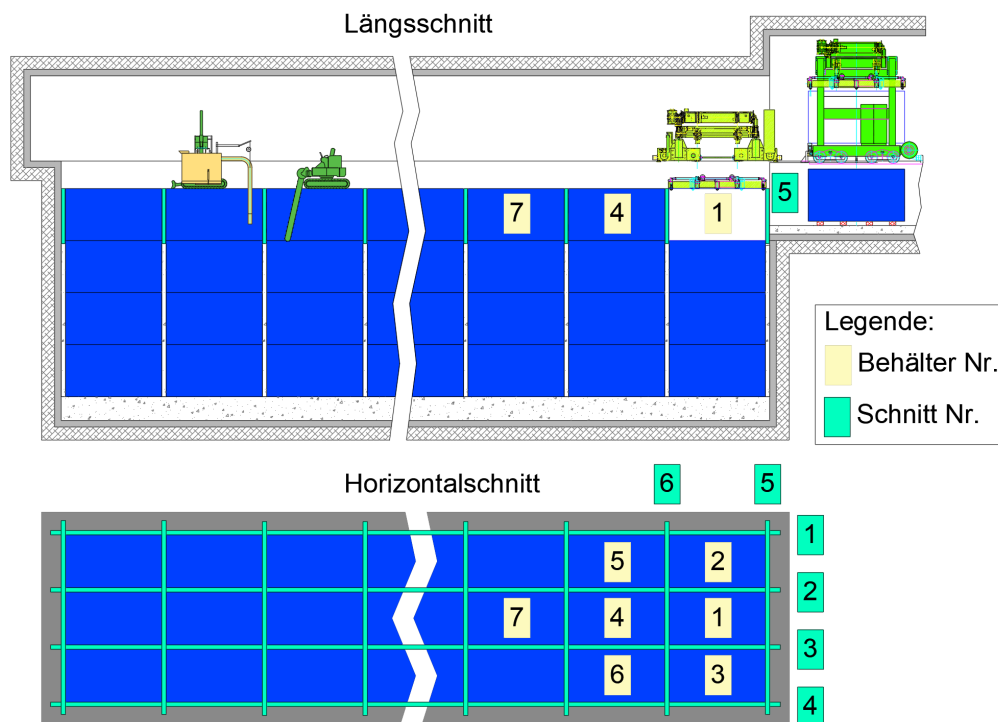


Fig. 5-31: Darstellung Abfolge der Schnitte durch Mörtel und Reihenfolge der Rückholung

Die Anzahl der SMA-ELB ist nur beispielhaft dargestellt.

Die Sägeschnitte werden während der Sägearbeiten kontinuierlich mit dem Saug-Modul gereinigt (Fig. 5-32). Eine Darstellung aus verschiedenen Perspektiven zeigen Fig. 5-28 und Fig. 5-31). Auch das rollige Material (Sägeklein), welches sich ggf. zwischen den horizontalen Spalten der ELB befindet, wird saugend entfernt, um den Greifern das Einfahren des Greifgehänges in diesen Spalt zu ermöglichen.

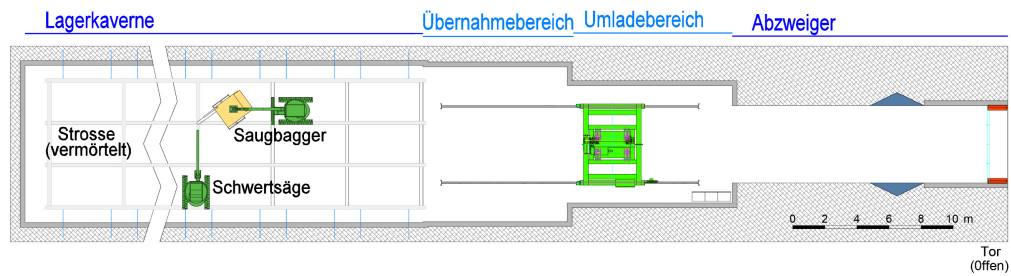


Fig. 5-32: Durchführen der Sägearbeiten in den Spalten zwischen den SMA-ELB in der Strosse

8.4. Absenken einer Grube unterhalb des Portalkrans im Übernahmebereich

Dieser Schritt kann frühestens erfolgen, wenn die Schwertsäge und das Saug-Modul die Sägearbeiten der obersten ELB-Lage in der Strosse (siehe Schritt 8.3) abgeschlossen und die Kaverne wieder verlassen haben.

Die zwei Bagger mit Schaufel und Abbruchhammer fahren in den Übernahmebereich ein. Der Bagger mit dem Abbruchhammer spitzt eine rechteckige Grube unterhalb des Übernahmekrans im Übernahmebereich in den Verfüllmörtel (Fig. 5-33). Die Grube dient später der Übergabe eines SMA-ELB vom Kavernenkran an den Übernahmekran im Übernahmebereich. Die Grube wird bis auf Niveau Unterkante oberste ELB-Lage in der Kavernenstrosse abgeteuft. Gegebenenfalls sind statische Sicherungsmassnahmen an den Grubenwänden vorzusehen, um die Nutzbarkeit des Portalkrans nicht zu beeinträchtigen.

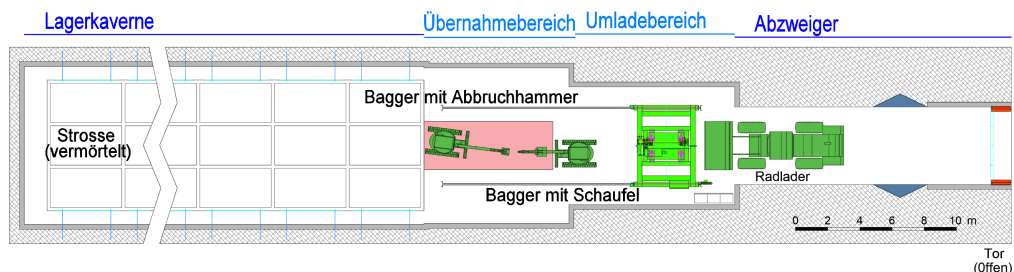


Fig. 5-33: Absenken einer Grube im Übernahmebereich

8.5. Lösen und Ausfahren des Mörtels bis zur ersten ELB-Querreihe

Der Bagger mit Abbruchhammer spitzt den Mörtel am Anfang der Kavernenstrosse bis zur ersten ELB-Querreihe ab. Er bricht den Mörtel dabei bis auf Niveau Oberkante der ELB-Reihe unterhalb der aktuell rückzuziehenden ELB-Reihe ab. Das Ausbruchmaterial wird mit dem Übernahmekran über Förderkörbe in den Umladebereich gehoben. Ein Bagger mit Schaufel transportiert den abgebrochenen Mörtel auf einen Lader im Abzweiger zum Abtransport.

8.6. Einbau Kavernenkrane mit Greifgehänge auf Kranbahnauflagern

Nachdem die Kranbahnauflager gesichert und die Schnitte zwischen den SMA-ELB in der obersten Lage durchgeführt sind, wird der Kavernenkrane inkl. Führungssystem (Schienen) in die Kaverne gefahren und dort auf bzw. zwischen den Auflagern installiert (Fig. 5-34). Ist er fertig aufgebaut, wird er in Betrieb genommen und aus platz-technischen Gründen an das Kavernenende gefahren.

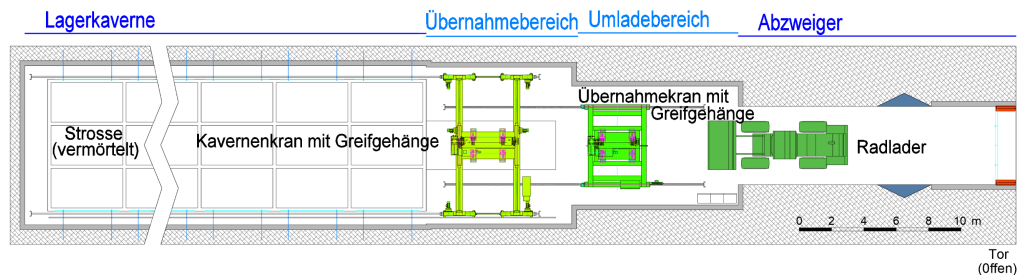


Fig. 5-34: Einbau und Installation Kavernenkrane

9. Rückholung der SMA-ELB aus der Strosse

Prinzipiell werden die ELB-Querreißen sukzessive in Kavernenlängsrichtung pro ELB-Lage rückgeholt. Die Arbeiten beginnen pro ELB-Lage auf Seite des Kavernenportals.

9.1. Anheben und Transport des ELB

Der Kavernenkrane fährt mit dem Greifmodul über den rückzuziehenden SMA-ELB. Das Greifmodul wird in den freigelegten Spalten zwischen den SMA-ELB nach unten gelassen, bis die horizontalen Tragelemente unter den rückzuziehenden SMA-ELB rotiert werden können. Der ELB wird aus der aktuell rückzuziehenden ELB-Lage herausgehoben und mit dem Kavernenkrane in den Übernahmebereich gefahren. Dort wird der Behälter abgestellt (Fig. 5-35).

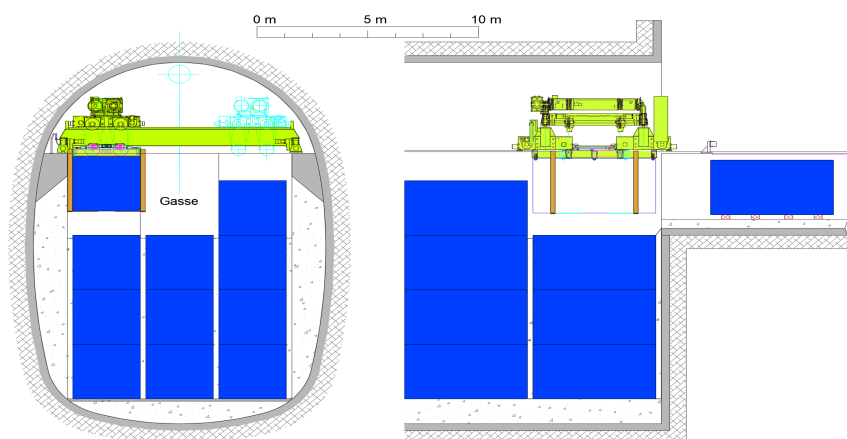


Fig. 5-35: Darstellung Abtransport der SMA-ELB aus der Strosse
Profil und Längsschnitt

9.2. Umladen des Behälters im Übernahmebereich

Im Übernahmebereich wird der SMA-ELB mit dem Übernahmekran auf den bereitstehenden Plattformwagen im Abladebereich verfrachtet. Siehe dazu Fig. 5-21.

5.3.5 Transport von SMA-ELB an die Oberfläche und Wiederholung der Schritte zur vollständigen Räumung (Strosse)

10. Abtransport zum Schacht und Förderung zur Oberfläche (Wiederholung Schritt 5)

Der Abtransport der SMA-ELB aus den Kavernen zur Oberfläche über den Schacht erfolgt analog zu Schritt 5.

11. Wiederholung der Schritte 8.1, 8.3, 9 und 10

Im Folgenden werden die oben genannten Schritte sukzessive pro ELB-Querreihe der jeweiligen rückzuholenden ELB-Lage wiederholt, bis die Kaverne vollständig geräumt ist. Die Gerätschaften zum Lösen und Sägen des Mörtels werden dafür mit dem Kavernenkran auf die tieferen ELB-Lagen gehoben.

5.4 Umgang mit Störungen (Ausblick)

Alle zur Rückholung benötigten Geräte und Maschinen werden ihren Aufgaben entsprechend dimensioniert, gefertigt und vor der eigentlichen Rückholung einer Einsatzprüfung unterzogen. Details der vorgesehenen Betriebsabläufe werden im Einsatzfall ausgearbeitet. Trotzdem muss den vom Regelfall abweichenden Prozessen (Betriebsstörungen) vorbeugend begegnet werden. Der Umgang mit Betriebsstörungen wird in späteren Planungsschritten konkretisiert. Dabei wird das Hauptaugenmerk auf die Reduktion von Betriebsstörungen, die allfällige Interventionsmassnahmen in Lagerstollen und -kavernen sowie in Umladebereichen erfordern, gelegt.

6 Fazit und Ausblick

Das Rückholungskonzept zeigt, wie eine Rückholung der radioaktiven Abfälle aus dem geologischen Tiefenlager bis zu *einem allfälligen Verschluss ohne grossen Aufwand* (Art. 37. Abs. 1 Bst. b KEG 2003) mit heutiger Technik erfolgen kann, wenn z. B. *der Sicherheitsnachweis nicht mehr erbracht werden kann* (Kap. 7.4.1 ENSI 2020b). Stufengerecht beschreibt es die dafür notwendigen planerischen, logistischen, baulichen und überwachungstechnischen Schritte in den Grundzügen. Der Bericht bildet eine Grundlage für die spätere Entwicklung des mit dem Baugesuch zu aktualisierenden Rückholungskonzepts.

Der betrachtete Rückholungszeitpunkt ist abdeckend gewählt in dem Sinn, dass die für die Rückholung relevanten Elemente der längsten zeitlichen Entwicklung ausgesetzt sind. Die Rückholung der eingelagerten Abfälle aus den verfüllten Lagerkammern ist zu diesem Zeitpunkt im Nachweiszeitraum für die Konzeptentwicklung am anspruchsvollsten umzusetzen. Gleichzeitig ist die Anzahl der für die Rückholung rückzubauenden Verschlussbauwerke zu diesem Zeitpunkt am grössten.

Das Konzept für die Rückholung der HAA zeigt, wie unter den beengten Platzverhältnissen mit heute verfügbarer Technik weitestgehend ferngesteuert eine Rückholung umgesetzt werden kann. Die grösste Herausforderung gegenüber dem Einlagerungsbetrieb stellt die hohe Temperatur im aufgeheizten Lagerstollen dar. Daher muss die Bewetterung zusätzlich um Kühlungsmassnahmen erweitert werden, die ein gefordertes Raumklima herstellen können. Die Konkretisierung dieser Massnahmen ist Teil der zukünftigen planerischen Schritte.

Das Konzept für die Rückholung der SMA kann aufgrund der geringeren Strahlenexposition im Wesentlichen durch Personal mit konventioneller Technik des Untertagebaus durchgeführt werden, wobei entsprechende Strahlenschutzmassnahmen (StSV 2017) umzusetzen sind. Hier ist das Lösen der ELB aus dem Mörtelverbund ohne Beschädigung der ELB die grösste Herausforderung. Mit dem gezeigten Schneidverfahren lassen sich die Behälter zuverlässig und sicher lösen. Die Anpassung der Kavernenverfüllung und die Fernsteuerung der Geräte bieten im Hinblick auf den langen Zeithorizont Optimierungspotenzial für zukünftige Konzepte.

Bis zum Einlagerungsbeginn ins geologische Tiefenlager (ca. 2050) und dessen Verschluss (ca. 2125) wird das Rückholungskonzept stufengerecht weiterentwickelt, erprobt und aktualisiert (Kapitel 2.4). Dabei werden technologische Entwicklungen (z. B. Automatisierung und Robotik) berücksichtigt. Weiterhin werden Erfahrungen einfließen, welche in weiter fortgeschrittenen Programmen in anderen Ländern gemacht werden, z. B. mit Austausch im Rahmen der IGD-TP (Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste - Technology Platform).

Derzeit laufen verschiedene Langzeitexperimente im Massstab 1:1, wie das FE-Experiment (Nagra 2019) im Felslabor Mont Terri oder HotBent (Schneeberger et al. 2021) im Felslabor Grimsel. In diesen Experimenten werden Erkenntnisse, z. B. zu Einlagerung und Einbau der Verfüllung, zur thermischen Entwicklung und dem Sättigungsverhalten der Bentonit-Verfüllung, gewonnen, die in die zukünftigen Rückholungskonzepte einfließen.

Im Baugesuch wird ein erweitertes Konzept mit höherem Detaillierungsgrad eingereicht (siehe zu Kap. 7.4.1 Bst. b ENSI 2020a). Die Rückholung wird u.a. für verschiedene Szenarien und Zustände von Kavernen, Stollen und Endlagerbehältern differenziert betrachtet werden.

Zur weiteren Entwicklung der Verfahren und Geräte für die Einlagerung und Rückholung sind zunächst Laborerprobungen vorgesehen (Fig. A3-13 Nagra 2021d). Zum Erhalt der Betriebsbewilligung hat die Nagra die Funktionstüchtigkeit einer Rückholung nachzuweisen (vgl. Art. 65 KEV 2004). Dafür sieht die Nagra Demonstrationsbauwerke für SMA- und HAA-Lagerkammern untertag (Nagra 2021b) vor. Mit den Nachweisresultaten ist zusammen mit dem Betriebsbewilligungsgesuch das Konzept zur allfälligen Rückholung zu aktualisieren (Art 7.4.2 Bst. c ENSI 2020b).

Mit Beginn der Einlagerung stehen so erprobte und demonstrierte Verfahren und Geräte zur Rückholung zur Verfügung, die anhand von während der Einlagerung gewonnenen Erfahrungen überprüft und kontinuierlich weiterentwickelt werden.

7 Literaturverzeichnis

- BFE (2011): Sachplan geologische Tiefenlager: Ergebnisbericht zu Etappe 1: Festlegungen und Objektblätter. 30. November 2011. Bundesamt für Energie BFE, Bern.
- Eckerle, K., Haker, K. & Hofer, P. (2001): Szenarien zu den Initiativen «Strom ohne Atom» sowie «Moratorium Plus». Prognos, Basel, im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Bern (Forschungsprogramm Energiewirtschaftliche Grundlagen).
- EKRA (2000): Disposal concepts for radioactive waste Final Report. Swiss Federal Office of Energy SFOE, Bern.
- ENSI (2018): Präzisierungen der sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager. Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 3. ENSI 33/649. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- 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.
- HSK (2016): Gesuchsunterlagen für freigabepflichtige Änderungen an Kernanlagen. Revision 1. Richtlinie für die schweizerische Kernanlagen ENSI-A04/d. HSK, Villigen.
- Jacobs, F., Mayer, G. & Wittmann, F.H. (1994): Permeability of backfill material. Corrosion and gas generation in radioactive waste repositories: Proceeding of Post-Conference Seminar No. 10 of the 12th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology SMiRT-12, Wittman F.H. (ed.), Aedificatio Verlag, Unterengstringen, 83-99.
- 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.
- Nagra (2019): Implementation of the Full-scale emplacement Experiment at Mont Terri: Design, Construction and Preliminary Results. Nagra Technischer Bericht NTB 15-02.
- Nagra (2021a): Entsorgungsprogramm 2021 der Entsorgungspflichtigen. Nagra Technischer Bericht NTB 21-01. Nagra, Wettingen.
- 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 (2022a): Betriebskonzept für die geologische Tiefenlagerung. Nagra Arbeitsbericht NAB 21-06.

Nagra (2022b): Lüftungs- und Kühlungskonzept geologisches Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-31.

Nagra (2022c): Module der Lagerarchitektur. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-35.

Schneeberger, R., Kober, F., Dorrer, R., Treuthardt, M., Baer, T. & Dorrer, A.-S. (2021): HotBENT Gallery and site preparation report. Nagra Arbeitsbericht NAB 20-18.

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.

StSV (2017): Strahlenschutzverordnung (StSV) vom 26. April 2017, Stand am 1. Januar 2021. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 814.501, Schweiz.

8 Glossar

Begriff	Bedeutung	Anmerkung
Abschlagslänge	Mögliche Ausbruchslänge (in Tunnel-, Stollen-, oder Kavernenlängsrichtung) ohne Sicherung	Berg- und Tunnelbau
Firste	Decke des Tunnels	Berg- und Tunnelbau
Lagerkaverne	Horizontale Lagerkammer mit grösserem Lichtraumquerschnitt und beschränkter Länge zur Einlagerung von SMA-Endlagerbehältern und ihren radioaktiven Abfällen	gTL
Lagerstollen	Schwach geneigte, langgestreckte Lagerkammern mit kleinem Durchmesser zur Einlagerung von HAA-Endlagerbehältern mit ihren radioaktiven Abfällen	gTL
Kalotte	oberes Drittel des Tunnelquerschnitts	Berg- und Tunnelbau
Ortsbrust	Ausbruchquerschnitt im Gebirge	Berg- und Tunnelbau
Schacht	Überbegriff für vertikale (oder annähernd vertikale) Zugangsbauwerke. Als Schrägschacht wird ein Zugangsbauwerk bezeichnet, das nur mit speziellen Vorrichtungen (z. B. Standseilbahn, Schrägschachtförderung) befahren werden kann.	Bergbau
Shuttle-Overpack-Behälter	Interner Transportbehälter für hochaktive Endlagerbehälter ab dem Umladebereich bis zur Entnahme an der Oberfläche	Strahlenschutz
Stoss/Stösse	Bezeichnung einer im Untertagebau senkrechten oder schrägen Wand. Dabei handelt es sich um eine seitliche Begrenzungsfläche oder Angriffsfläche einer untertägigen Baute (z. B. Tunnel, Stollen oder Kaverne).	Berg- und Tunnelbau
Sohle	Boden des Tunnels	Berg- und Tunnelbau
Strosse	Untere Zwei Drittel des Tunnelquerschnitts	Berg- und Tunnelbau
Tunnel	Langgestreckte, horizontal oder nur wenig geneigt verlaufende unterirdische Hohlräume mit mehr als 25 m ² Querschnitt, vorwiegend als Strassen- oder Eisenbahntunnel	Berg- und Tunnelbau

Anlage A Gesetzliche und regulatorische Grundlagen

A.1 Weitere Erläuterungen zu Kapitel 2.3

In (Art. 37 Abs. 1 Bst. b KEG 2003) wird für das geologische Tiefenlager die Betriebsbewilligung erteilt, wenn [...] die Rückholung der radioaktiven Abfälle bis zu einem allfälligen Verschluss ohne grossen Aufwand möglich ist.

Dabei ist gemäss (Art. 11 Abs. 2 Bst. c KEV 2004) ein geologisches Tiefenlager so auszulegen, dass Vorkehrungen [...] zur Rückholung der Abfälle die passiven Sicherheitsbarrieren nach dem Verschluss des Lagers nicht beeinträchtigen (Art. 11, Abs. 2 Bst. c KEV 2004). Zudem gilt in Anlehnung an (Art 53. Abs 1 KEV 2004) die Pflicht für Personen, die Materialien aus kontrollierten Zonen entfernen wollen, eine qualitätsgesicherte Freimessung durchzuführen und diese zu dokumentieren.¹²

Ferner verlangt (Art. 65 Abs. 2 Bst. c KEV 2004), vor Inbetriebnahme des Tiefenlagers die sicherheitsrelevanten Techniken zu erproben und deren Funktionstüchtigkeit nachzuweisen. Dies betrifft insbesondere [...] das Entfernen des Verfüllmaterials zwecks allfälliger Rückholung von Abfallgebinden und die Technik zur Rückholung von Abfallgebinden.

In (Art. 67 Abs. 1 KEV 2004) wird gefordert, dass der Eigentümer eines geologischen Tiefenlagers nach Einlagerung der Abfallgebinde die Lagerkavernen und -stollen zu verfüllen hat, und in (Art. 67 Abs. 2 KEV 2004), dass er die Verfüllung so vorzunehmen hat, dass die Langzeitsicherheit gewährleistet und eine Rückholung der Abfälle ohne grossen Aufwand möglich ist.

Die Richtlinie ENSI-G03 (ENSI 2020b) definiert Rückholung wie folgt:

Die Rückholung umfasst die Bergung und den Transport von eingelagerten radioaktiven Abfällen aus dem geologischen Tiefenlager zurück an die Oberfläche (siehe Anhang 1 ENSI 2020b).

Zudem stellt (Kap. 7.4.1 ENSI 2020b) bezüglich Rückholung folgende generelle Vorgaben:

- a. Ein geologisches Tiefenlager einschliesslich der Tiefenlagerbehälter ist so auszulegen, dass eine Rückholung der radioaktiven Abfälle bis zum Verschluss ohne grossen Aufwand möglich ist.
- b. Eine Rückholung oder Teilrückholung der Abfälle ist vorzunehmen, falls während der Betriebsphase der Sicherheitsnachweis nicht mehr erbracht werden kann und eine wirksame Instandsetzung der Sicherheitsbarrieren nicht mehr möglich ist.

Im Erläuterungsbericht (ENSI 2020a) zur Richtlinie ENSI-G03. (ENSI 2020b) wird zu Kapitel 7.4. «Rückholung ohne grossen Aufwand» geschrieben:

zu Kapitel 7.4.1 «Generelle Vorgaben»:

Zu Bst. a: Die gesetzlich geforderte Möglichkeit zur Rückholung der radioaktiven Abfälle ohne grossen Aufwand (Art. 37 Abs. 1 Bst. b KEG 2003) und (Art. 67 Abs. 2 KEV 2004) gilt bis zum Lagerverschluss. In der Botschaft des Bundesrats zum Kernenergiegesetz¹³ (S. 2756 Eckerle et al. 2001) wird erläutert, dass die eingelagerten Abfälle vor dem Verschluss ohne grossen Aufwand rückholbar sind, dass sie aber auch nach dem Verschluss, wenn auch mit erhöhtem technischem

¹² Fassung gemäss Ziff. I der V vom 7. Dez. 2018, in Kraft seit 1. Febr. 2019 (AS 2019 183).

¹³ 01.022: Botschaft zu den Volksinitiativen «MoratoriumPlus – Für die Verlängerung des Atomkraftwerk-Baustopps und die Begrenzung des Atomrisikos (MoratoriumPlus)» und «Strom ohne Atom – Für eine Energiewende und die schrittweise Stilllegung der Atomkraftwerke (Strom ohne Atom)» sowie zu einem Kernenergiegesetz vom 28. Februar 2001.

und finanziellem Aufwand, zurückgeholt werden können. Alle zur Sicherstellung der allfälligen Rückholung notwendigen Massnahmen dürfen dabei die passiven Sicherheitssysteme eines geologischen Tiefenlagers und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen (Art. 11 Abs. 2 Bst. c KEV 2004).

Vor Inbetriebnahme eines Tiefenlagers ist nachzuweisen, dass das Entfernen des Verfüllmaterials zwecks allfälliger Rückholung und die Technik zur Rückholung der Abfälle funktionieren (Art. 65 Abs. 2 Bst. b und c KEV 2004). An die konkrete Umsetzung der Rückholung werden mit Ausnahme des Nachweises der Funktionstüchtigkeit der sicherheitsrelevanten Techniken vor Beginn der Einlagerung und der einzureichenden Konzepte (vgl. Kap. 7.4.2 ENSI 2020b) keine weiteren Anforderungen gestellt, da die Rückholung ohne grossen Aufwand kein vorgesehener Bestandteil des Betriebs ist. Die für die Rückholung geltenden Sicherheitsanforderungen müssen jedoch mindestens den in der Betriebsbewilligung festgelegten Anforderungen entsprechen.

Eine allfällige Rückholung der radioaktiven Abfälle wird erleichtert, wenn die Tiefenlagerbehälter bis zum Ende der Beobachtungsphase (Art. 68 KEV 2004) mechanisch intakt und damit transportierbar bleiben.

Bei der Auslegung soll die Dauerhaftigkeit der untertägigen Tragwerke, die für eine allfällige Rückholung verwendet werden sollen, bis zum Verschluss des Tiefenlagers gewährleistet werden.

Zu Bst. b: Während eine Rückholung der radioaktiven Abfälle grundsätzlich nicht nur aufgrund von Sicherheitsüberlegungen erfolgen könnte, sondern auch aufgrund eines sich entwickelnden Standes von Wissenschaft und Technik, gesellschaftspolitischen oder ökonomischen Argumenten, stellt die Richtlinie bewusst nur Anforderungen an eine Rückholung der Abfälle für den Fall eines nicht (mehr) erbringbaren Sicherheitsnachweises. Dieser könnte zum Beispiel aufgrund der Folgen eines Störfalls während der Betriebsphase oder durch ein unerwartetes Versagen des Barrierensystems während der Beobachtungsphase eintreten. Dabei soll die Möglichkeit berücksichtigt werden, dass ein Sicherheitsnachweis auch gestützt auf betriebliche Massnahmen (z. B. durch Umlagerung von Abfällen innerhalb des Lagers) wieder erbracht werden kann (vgl. ENSI G03 – Erläuterungsbericht, Kap. 6.2 ENSI 2020a).

In (Kap. 7.4.2 ENSI 2020b) wird im Konzept zur allfälligen Rückholung der radioaktiven Abfälle gefordert:

- a. Mit dem Rahmenbewilligungsgesuch (RBG) ist ein Konzept zur allfälligen Rückholung der radioaktiven Abfälle einzureichen. Im Konzept muss mindestens dargestellt werden, welche planerischen, logistischen, baulichen und überwachungstechnischen Schritte notwendig sind, um eine allfällige Rückholung bis zum Verschluss des Lagers sicherzustellen (Art 7.4.2 Bst. a ENSI 2020b).
- b. Mit dem Baugesuch ist das Konzept zur allfälligen Rückholung der radioaktiven Abfälle zu konkretisieren und ein Projekt zur Demonstration der Rückholtechnik in den Testbereichen zu erstellen (Art 7.4.2 Bst. b ENSI 2020b).
- c. Mit dem Betriebsbewilligungsgesuch ist das Konzept zur allfälligen Rückholung der radioaktiven Abfälle aufgrund der Resultate in den Testbereichen zu aktualisieren (Art 7.4.2 Bst. c ENSI 2020b).
- d. Das Konzept zur allfälligen Rückholung der radioaktiven Abfälle ist während der Betriebsphase periodisch zu aktualisieren und dem ENSI einzureichen (Art 7.4.2 Bst. d ENSI 2020b).
- e. Bei einer grundlegenden Änderung des Konzepts sind in den Testbereichen erneut Demonstrationsexperimente durchzuführen. Das aktualisierte Konzept ist dem ENSI zur Freigabe einzureichen (Art 7.4.2 Bst. e ENSI 2020b).

Im Erläuterungsbericht (ENSI 2020a) zur Richtlinie ENSI-G03. (ENSI 2020b) wird zu Kapitel 7.4.2 «Konzept zur allfälligen Rückholung der radioaktiven Abfälle» folgendes geschrieben:

Das Rückholungskonzept ist jeweils mit dem Gesuch für die Rahmen-, Bau- und Betriebsbewilligung sowie periodisch über die Beobachtungsphase hinweg an den Stand von Wissenschaft und Technik beziehungsweise an die Ergebnisse der Überwachung anzupassen. [...]

Zu Bst. a: Das mit dem Rahmenbewilligungsgesuch einzureichende Konzept für eine allfällige Rückholung der radioaktiven Abfälle ohne grossen Aufwand beschreibt die Art und Weise des Vorgehens in den Grundzügen. [...]

Zu Bst. b: Das mit dem Baugesuch zu aktualisierende Konzept für eine allfällige Rückholung der radioaktiven Abfälle legt die entsprechende Technik und Organisation in erhöhtem Detaillierungsgrad dar. Die Rückholung soll dabei für die verschiedenen Betriebsphasen, für verschiedene Szenarien der Rückholung und Zustände von Stollen und Tiefenlagerbehältern differenziert betrachtet werden (z. B. das Wiederauffahren verfallter Stollen, das Aufbrechen von Siegelstrecken, das Entfernen von Verfüllungen der Lagerkammern, das Greifen und Sichern der Tiefenlagerbehälter und der Rücktransport zur Oberfläche). [...] Eine Abschätzung der aufgrund der Rückholung resultierenden Strahlenexposition für Personal und Bevölkerung soll vorgenommen und mit den Folgen einer nicht durchgeführten Rückholung verglichen werden.

Das mit dem Baugesuch einzureichende Projekt zur Demonstration der Funktionstüchtigkeit zeigt auf, anhand welcher Demonstrationsversuche und mit welchen Abfallgebinden die Rückholungstechnik und deren Funktionstüchtigkeit unter den später zu erwartenden Bedingungen gezeigt werden soll. [...]

Zu Bst. c: Die Aktualisierung des Rückholungskonzepts soll neben den Erfahrungen, die aus der Demonstration der Funktionstüchtigkeit gemäss Art. 65, Abs. 2 Bst. b und c KEV 2004 resultieren, auch die aktuell vorgesehenen Systeme der Überwachung berücksichtigen, die eine wichtige Grundlage für den Entscheid über eine mögliche Rückholung liefern.

Zu Bst. d: Während der gesamten Betriebsphase soll immer ein gültiges und nachgewiesenermassen funktionierendes Rückholungskonzept vorhanden sein. Die entsprechenden Techniken müssen erprobt sein, die entsprechenden Geräte und Materialien jedoch nicht vorgehalten werden.

Zu Bst. e: Grundlegende Änderungen im Konzept könnten sich etwa ergeben, wenn die Siegel und Verfüllungen im Verlauf der Betriebsphase derart angepasst würden, dass die bis anhin vorgesehenen Geräte und Materialien für eine Rückholung nicht mehr einsetzbar sind und die Resultate der ursprünglichen Demonstrationsexperimente nicht mehr aussagekräftig sind.

Die gesetzlich geforderte Möglichkeit zur Rückholung der radioaktiven Abfälle ohne grossen Aufwand (Art. 37 Abs. 1 Bst. b KEG 2003 und Art. 67 Abs. 2 KEV 2004) gilt bis zum Lagerverschluss. [...] Die für die Rückholung geltenden Sicherheitsanforderungen müssen [...] mindestens den in der Betriebsbewilligung festgelegten Anforderungen entsprechen (ENSI G-03 Erläuterungsbericht, Art. 7.4 Bst a ENSI 2020a).

Anlage B Beobachtung und Verschluss in Etappen

Fig. B-1 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 die Rückholung «ohne grossen Aufwand» massgeblichen Phasen eingegangen: Die Beobachtungsphase (13), den Verschluss des Hauptlagers (14) und den Verschluss des Gesamtlagers (15), wobei die Langzeitüberwachung bereits mit der Einlagerung in die SMA- und HAA-Pilotlager beginnt.

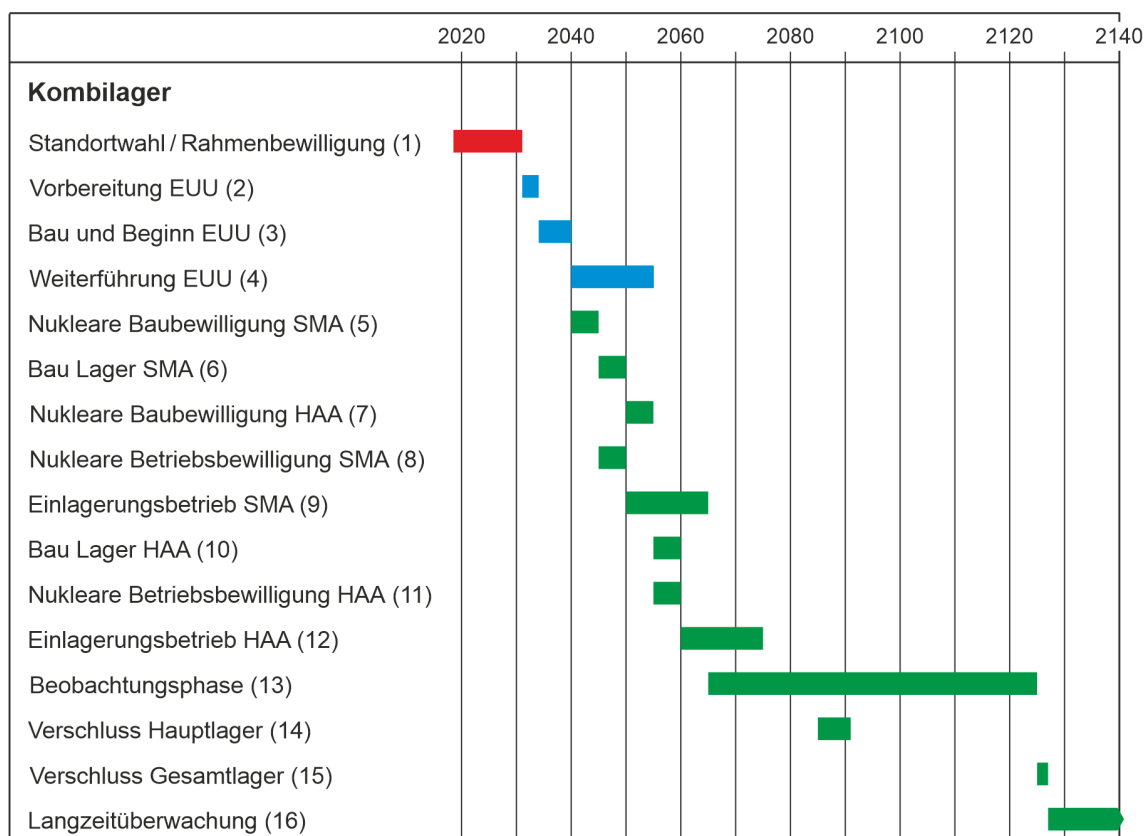


Fig. B-1: Realisierungsplan für ein Kombilager

Nach (Nagra 2021a)

Unmittelbar nach Abschluss der Einlagerung (9 / 12) in jede Lagerkammer werden direkt vor den SMA-Lagerkavernen bzw. im Anfangsbereich der HAA-Lagerstollen die V1-Versiegelungen errichtet. Nach Versiegelung der SMA-Lagerkavernen beginnt die Beobachtungsphase (13). Einige Jahre später sind auch die HAA-Stollen versiegelt und die Beobachtungsphase beginnt auch dort. Für Planungszwecke wird gemäss Art. 3 SEFV 2007 von einer Beobachtungsphase von 50 Jahren nach Abschluss des HAA-Einlagerungsbetriebs ausgegangen. Diese Dauer kann jedoch angepasst werden, sollte sich die Notwendigkeit oder der Bedarf ergeben.

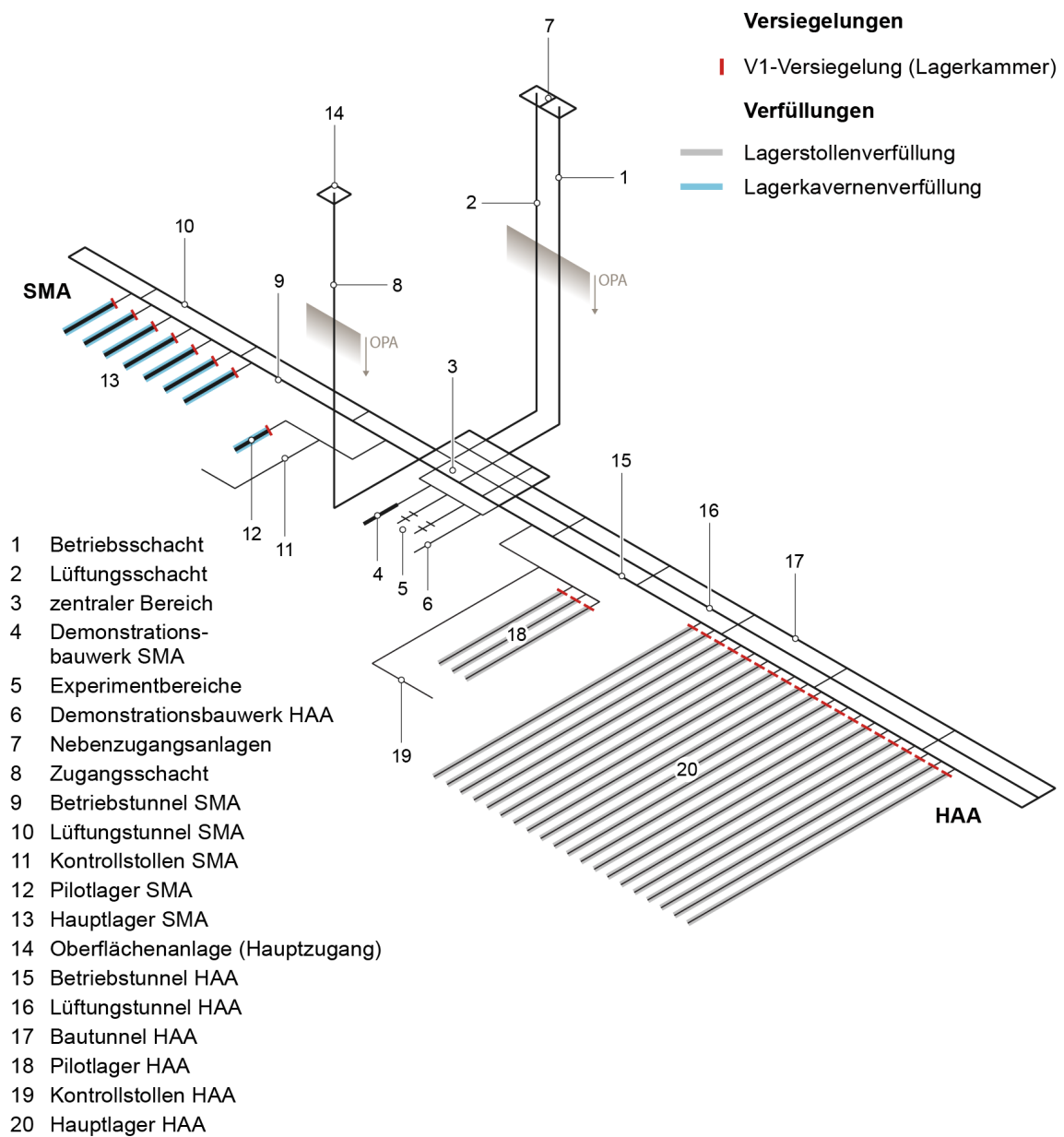


Fig. B-2: Fortschritt Verschluss nach fertiger Einlagerung und Beginn Beobachtungsphase
Teil 1

Nach einer gewissen Beobachtungsdauer¹⁴ endet der erste Teil der Beobachtungsphase¹⁵. Zu diesem Zeitpunkt werden die Zugänge zu den Lagerfeldern zu den Haupt- und Pilotlagern SMA und HAA auf Lagerebene verfüllt und verschlossen (Verschluss Hauptlager, 14). Dazu werden die VF1-Verfüllungen eingebracht und die V2-Versiegelungen (Fig. B-3) gebaut. Zudem wird zu diesem Zeitpunkt einer der Zugänge untertag (z. B. der Zugangsschacht) mit der V3-Versiegelung im Wirtgestein versiegelt, bis an die Oberfläche verfüllt und verschlossen.

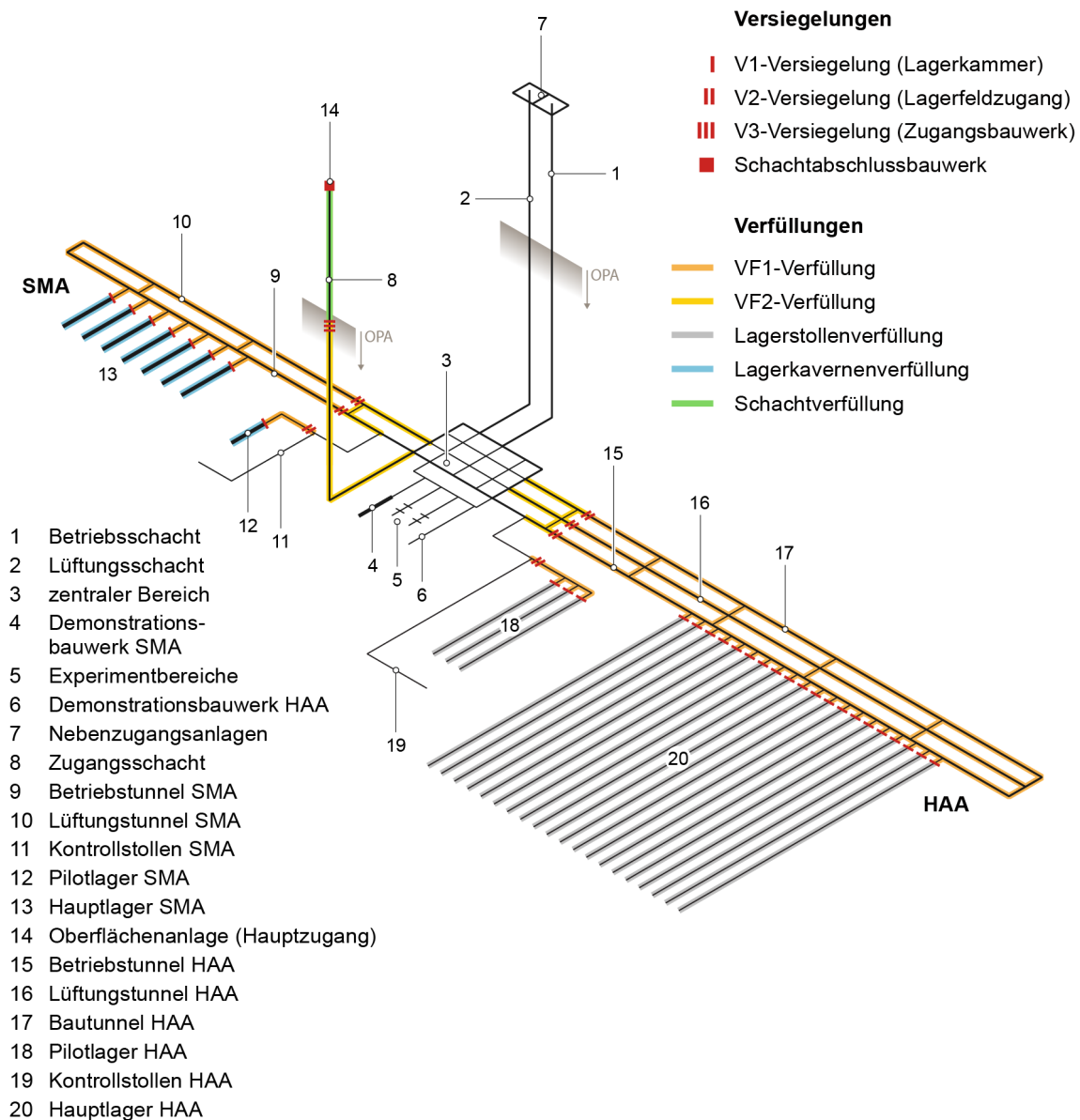


Fig. B-3: Fortschritt Verschluss nach Ende der Beobachtungsphase Teil 1 mit dem Hauptverschluss

¹⁴ Die aktuelle Planung geht für den ersten Teil der Beobachtungsphase von einer Dauer von ~ 10 Jahren aus.

Auch nach Verschluss der Haupt- und Pilotlager bleibt der Zugang zu den Testbereichen sowie den Kontrollstollen HAA und SMA der Pilotlager (Fig. B-3) über die verbleibenden Zugänge (z. B. Betriebs- und Lüftungsschacht) offen. Die Beobachtung wird bis zum Verschluss des Gesamtlagers (15) fortgesetzt.

Nach Ablauf der Beobachtungsphase ordnet der Bundesrat den Verschluss des Gesamtlagers an, sofern 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 sowie aller anderen offenen Untertagbauten inklusive der noch offenen Zugänge.

¹⁵ Diese Beobachtungsphase Teil 1 des in Fig. B-1 dargestellten Realisierungsplans des Kombilagers beginnt nach Einlagerungsende HAA.

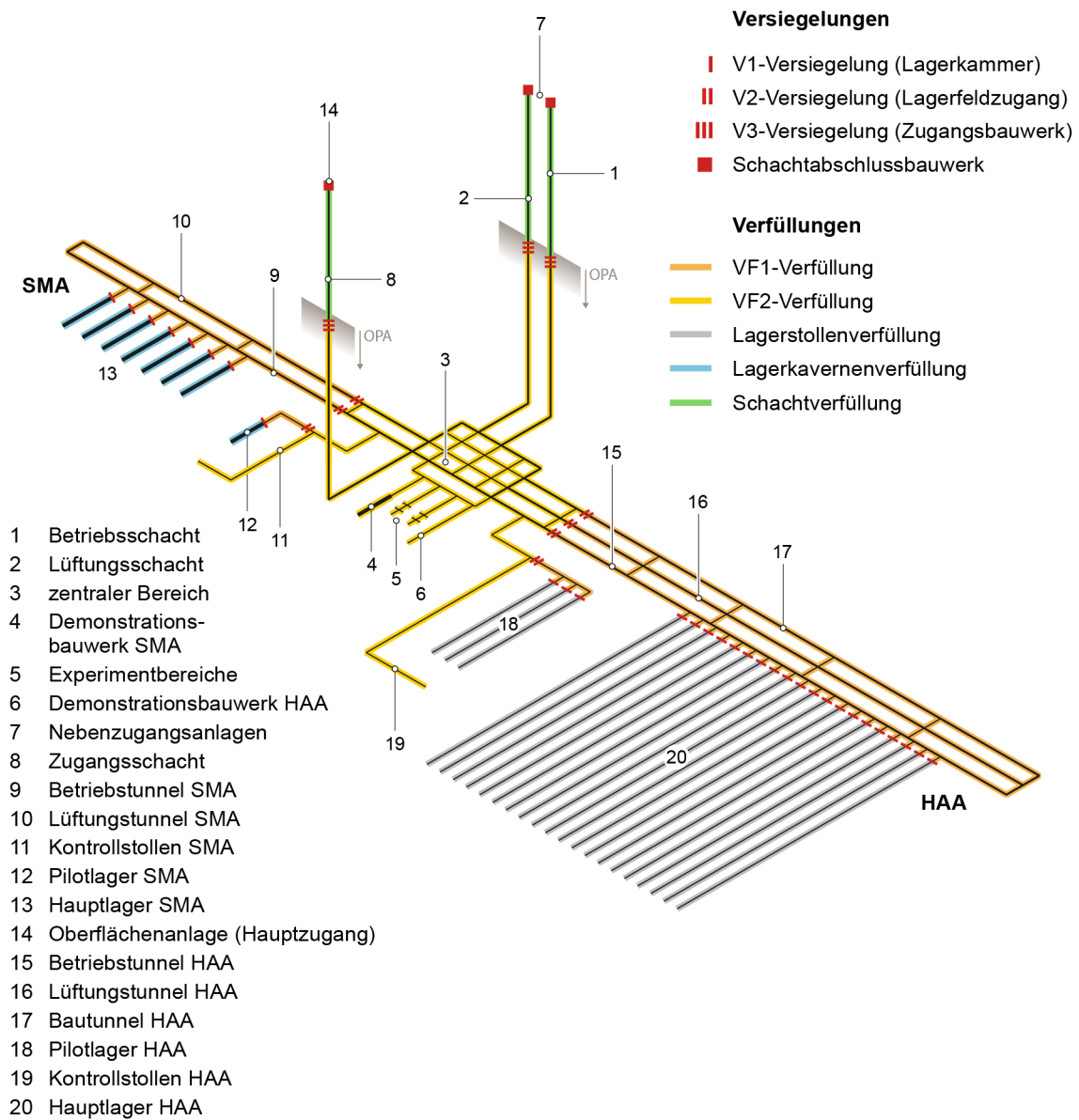


Fig. B-4: Endgültiger Zustand des gTL nach dem Verschluss des Gesamtlagers