

Arbeitsbericht NAB 21-14

**Konzept erdwissenschaftliche
Untersuchungen untertag (EUU)**

November 2021

Arbeitsbericht NAB 21-14

**Konzept erdwissenschaftliche
Untersuchungen untertag (EUU)**

November 2021

STICHWÖRTER

Erdwissenschaftliche Untersuchungen, EUU,
Demonstrationen, in-situ Experimente

**Nationale Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle**

Hardstrasse 73
Postfach 280
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 © 2021 by Nagra, Wettingen (Schweiz) / Alle Rechte vorbehalten.

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Tabellenverzeichnis.....	II
Figurenverzeichnis.....	II
Abkürzungsverzeichnis.....	III
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Bauten für die erdwissenschaftlichen Untersuchungen untertag.....	3
2.1 Infrastruktur für EUU	3
2.2 Bauten für EUU auf Lagerebene	5
2.2.1 Experimentbereiche	7
2.2.2 Verteilte Nischen	7
2.2.3 Demonstrationsbauwerk SMA.....	7
2.2.4 Demonstrationsbauwerk HAA.....	7
3 Umsetzung der erdwissenschaftlichen Untersuchungen untertag	9
3.1 Zeitlicher Ablauf der erdwissenschaftlichen Untersuchungen untertag	9
3.2 Geplante Umnutzung der EUU Infrastruktur.....	13
4 Mögliches Arbeitsprogramm für die erdwissenschaftlichen Untersuchungen untertag	15
4.1 Aufgaben der EUU	15
4.2 Anforderungen für die Bestätigung der Eignungskriterien und die Erhärtung des Sicherheitsnachweises	16
4.3 Erdwissenschaftliche Erkundungsarbeiten untertag	18
4.3.1 Erkundung während des Baus der Zugangsbauwerke EUU	18
4.3.2 Erkundung auf Lagerebene.....	19
4.4 Experimente zum standortspezifischen Sicherheitsnachweis.....	21
4.4.1 Charakterisierung der Auflockerungszone (EDZ)	22
4.4.2 Gastransport-Kapazität des intakten Wirtgesteins	22
4.4.3 Selbstabdichtung und Gastransport-Kapazität der EDZ	23
4.4.4 Thermischer Einfluss auf das Wirtgestein.....	23
4.4.5 Diffusions- und Retentionsverhalten	23
4.5 Demonstrationen.....	24
4.5.1 Einbringung und Verfüllung.....	24
4.5.2 Rückholung.....	26
4.5.3 Versiegelung.....	27
4.5.4 Temporärer Verschluss.....	27
4.6 Dokumentation und Datenmanagement.....	28
5 Zusammenfassung und Ausblick.....	29

6	Literaturverzeichnis	31
Anhang A:	Beantwortung der Bundesratsaufgabe 5.6 für das Entsorgungsprogramm 2021	A-1
Anhang B:	Einbettung in das Realisierungsprogramm gemäss EP21	B-1
Anhang C:	Zusammenstellung der Vorgaben in Gesetzen, Verordnungen und behördlichen Dokumenten für die Realisierung der erdwissenschaftlichen Untersuchungen untertag	C-1

Tabellenverzeichnis

Tab. B-1:	Zusammenfassung eines möglichen Programms für erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag und damit verbundener Phasen.	B-1
Tab. C-1:	Vorgaben und Hinweise in Gesetzen sowie in behördlichen Dokumenten und geplante Massnahmen zu deren Erfüllung im Rahmen der EUU.....	C-1

Figurenverzeichnis

Fig. 2-1:	Schematische Darstellung des generischen Lagerprojekts der untertägigen Infrastruktur, die während der Phase "Bau und Beginn EUU" erstellt wird (schwarze Linien) sowie der weiteren Lagerteile des späteren Kombilagers (Hauptlager, Pilotlager und Kontrollen für den SMA- und HAA-Lagerteil; graue Linien).	4
Fig. 2-2:	Konzeptionelle Darstellung der BEUU mit Experimentbereichen und Demonstrationsbauwerken SMA und HAA in einer standortunabhängigen Realisierung.....	5
Fig. 2-3:	Schematische Anordnung der BEUU mit Experimentbereichen und Demonstrationsbauwerken SMA und HAA.	6
Fig. 3-1:	Phasenweise Gliederung der Arbeiten EUU für ein Kombilager entsprechend des generischen Lagerprojektes zur Erlangung der nuklearen Bau- und Betriebsbewilligungen.....	11
Fig. 4-1:	Räumliche Zuordnung der Erkundung der Zugangsbauwerke, der Lagerebene sowie der Arbeiten in den BEUU.....	18
Fig. 4-2:	Verfüllung eines Heizers mit den Dimensionen eines Endlagerbehälters auf einem Sockel aus Bentonit-Blöcken beim FE-Experiment	25
Fig. 4-3:	Konzeptionelle Darstellung der Rückholung von HAA ELB aus einem verfüllten Lagerstollen.....	26
Fig. 4-4:	Konzeptionelle Darstellung der Versiegelung einer SMA Lagerkaverne	27

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
BEUU	Bauten für erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag
EDZ	Auflockerungszone (Excavation Damaged Zone)
ELB	Endlagerbehälter
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
EP	Entsorgungsprogramm
EUU	Erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag
gTL	Geologische(s) Tiefenlager
HAA	Hochaktive Abfälle
HEB	Haupterschliessungsbereich
KEG	Kernenergiegesetz
NAB	Nagra Arbeitsbericht
nBaB	Nukleare Baubewilligung
nBaBG	Nukleares Baubewilligungsgesuch
nBeB	Nukleare Betriebsbewilligung
nBeBG	Nukleares Betriebsbewilligungsgesuch
NTB	Nagra Technischer Bericht
NZA	Nebenzugangsanlage
OFA	Oberflächenanlage
OFI	Oberflächeninfrastruktur
OPA	Opalinuston
QBO	Quartärbohrung
RB	Rahmenbewilligung
RBG	Rahmenbewilligungsgesuch
RD&D	Research, Development & Demonstration
RN	Radionuklid
SGT	Sachplan geologische Tiefenlager
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle
TBO	Tiefbohrung
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation

1 Einleitung und Zielsetzung

Das vom Bundesrat verabschiedete Konzept Sachplan geologische Tiefenlager SGT (BFE 2008) legt das Vorgehen für die Wahl von Standorten für die geologischen Tiefenlager (Kombilager oder SMA- und HAA-Lager) fest. Das Verfahren umfasst drei Etappen, wobei Etappen 1 und 2 abgeschlossen sind. Als Abschluss von SGT Etappe 2 hat der Bundesrat Ende 2018 der Fokussierung auf Opalinuston (OPA) als Wirtgestein für alle Lagertypen zugestimmt und entschieden, dass die geologischen Standortgebiete Jura Ost, Nördlich Lägern, Zürich Nordost in der dritten Etappe weiter untersucht werden sollen.

Im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch hat die Nagra als wesentliche Felduntersuchungen 3D-Seismikmessungen, Tiefbohrungen und Quartäruntersuchungen in den drei verbleibenden Gebieten durchgeführt. Die Tiefbohrungen dienen insbesondere der Eichung der 3D-Seismik (v.a. Tiefenlage und Mächtigkeit der Wirt- und Rahmengesteine) sowie der Erfassung der relevanten Gesteinseigenschaften und Zustandsparameter. Untersuchungen quartärer Lockergesteine liefern Beiträge zur Langzeitentwicklung der geologischen Standortgebiete. Die laufende Auswertung und Integration der Felduntersuchungen bildet zusammen mit erdwissenschaftlichen Systemanalysen und weiteren Studien zum Prozessverständnis die Basis für den sicherheitstechnischen Vergleich der Standortgebiete und die Begründung der Standortwahl. Die heute vorliegenden Ergebnisse bestätigen die Eignung aller Standortgebiete für den Bau eines Tiefenlagers mit einem ausreichenden Platzangebot für ein Kombilager oder zwei Einzellager.

Gestützt auf vertiefte erdwissenschaftliche Untersuchungen in den verbleibenden geologischen Standortgebieten und auf weitere Erkenntnisse wird die Nagra 2022 die Auswahl der Standorte für die Vorbereitung der Rahmenbewilligungsgesuche gemäss Konzept Sachplan geologische Tiefenlager (BFE 2008) bekannt geben. Nach der Ankündigung wird die Nagra die erforderlichen Unterlagen für das RBG ausarbeiten kann. So erfolgt die Dokumentation der Standortwahl gemäss Vorgaben der Kernenergiegesetzgebung (Art. 62 KEV) und (ENSI 2018) als Bestandteil der Unterlagen zum Rahmenbewilligungsgesuch (RBG).

Nach Rechtsgültigkeit der Rahmenbewilligung (RB) für ein geologisches Tiefenlager (gTL) muss der Sicherheitsnachweis spezifisch für den gewählten Standort hinsichtlich nuklearen Baubewilligungsgesuchs (nBaBG) und später des nuklearen Betriebsbewilligungsgesuchs (nBeBG) stufengerecht weiter erhärtet werden. Wesentliche Beiträge hierzu liefern die geplanten erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag (EUU).

Die EUU schliessen an die umfangreichen Untersuchungen im Rahmen des Sachplans an und dienen der untertägigen Überprüfung der Übertragbarkeit der standortunabhängig bzw. von der Oberfläche gewonnenen Erkenntnisse auf die in-situ-Bedingungen untertag am gewählten Standort. Die EUU stellen einen Bewilligungsschritt dar, um die Aussagen aus dem RBG zu bestätigen und im Hinblick auf den Bau und Betrieb des gTL entsprechende Grundlagen zu erarbeiten und Nachweise durchzuführen.

Anhand untertägiger Untersuchungen, Experimente und Demonstrationen werden weitergehende und ergänzende Erkenntnisse bezüglich der sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Wirtgesteins sowie für den Bau und Betrieb des gTL gewonnen. Es werden die bautechnischen Verfahren und die Eignungskriterien im Hinblick auf den Erhalt der nuklearen Bau- und Betriebsbewilligung geprüft. Ein wesentlicher Meilenstein ist die standortspezifische Erhärtung des Sicherheitsnachweises und die Bestätigung der Übertragbarkeit der wissenschaftlichen Erkenntnisse des wissenschaftlichen Programms (z.B. im Felslabor Mont Terri) auf den gewähl-

ten Standort. Die Nagra kann dazu auf ein jahrzehntelanges Forschungs- und Erkundungsprogramm bezüglich der sicheren Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle zurückblicken. Die in einem gTL ablaufenden Prozesse wurden in zahlreichen Experimenten und Untersuchungen im Wirtgestein Opalinuston (OPA) im Felslabor Mont Terri eingehend erforscht (Leupin et al. 2016)

Weiterhin dienen die EUU der Nachweisführung hinsichtlich der Funktionstüchtigkeit sicherheitsrelevanter Techniken und Einlagerungskonzepte, insbesondere zum Einbringen und Entfernen von Verfüllmaterial, zur Versiegelung von Kavernen und Stollen sowie zu einer allfälligen Rückholung von Abfallgebinden.

Berichtsziel

Im vorliegenden Bericht präsentiert die Nagra ein erstes Konzept für die EUU. Es wird eine Realisierung der EUU gemäss derzeitigem generischen Lagerprojekt (Nagra 2021a) dargestellt. Dieses ist standortunabhängig und sieht ein Kombilager zur Einlagerung von SMA und HAA in getrennten Lagerfeldern vor. Nach der Einreichung des RBG erfolgt eine weitergehende, stufengerechte Konkretisierung der Konzepte für die EUU.

Der vorliegende Bericht stellt auch einen Hintergrundbericht zum Entsorgungsprogramm 21 (Nagra 2021a) dar, mit dem die Auflage 5.6 des Bundesrats zum Entsorgungsprogramm 16 (Bundesrat 2018) beantwortet wird (Anhang A). Es werden die verschiedenen Nutzungsphasen der EUU und der dafür benötigten Bauten dargelegt und erläutert sowie generisch aufgezeigt, wie und wann die technischen Nachweise erfolgen sollen, um eine spätere Umnutzung der Bauten zu erreichen.

Das hier vorgestellte Konzept wird stufengerecht weiter konkretisiert. Es werden keine spezifischen Unterschiede, die sich aus den möglichen Standorten ergeben, erläutert. Dem Bericht wird ein generisches Lagerprojekt eines Kombilagere zu Grunde gelegt, ohne dabei die Realisierung von zwei Einzellagern auszuschliessen. Es lassen sich aus dem Konzept für das Kombilager auch die entsprechenden Arbeitsprogramme zu den EUU der Einzellager ableiten. Gleichfalls sind in schematischen Abbildungen Zugangsbauwerke als zwei Schächte dargestellt. Je nach Standort und Lagertyp können diese jedoch auch als Zugangstunnel ausgeführt werden.

2 Bauten für die erdwissenschaftlichen Untersuchungen untertag

2.1 Infrastruktur für EUU

Für die Durchführung der EUU werden eine Reihe von untertägigen sowie obertägigen Bauwerken benötigt (s. Fig. 2-1). Diese Bauwerke werden als Infrastruktur EUU bezeichnet. Die Infrastruktur EUU umfasst diverse Anlagen an der Oberfläche (z.B. Nebenzugangsanlagen (Ziffer 7) und weitere Elemente der Oberflächeninfrastruktur wie z.B. Energieversorgungsgebäude und Lüftungsgebäude, Anlieferungsstrukturen für Strassen- und ggf. Bahntransporte, Administrationsgebäude und Servicegebäude, Besucherzentrum, Sicherungsstrukturen sowie Standorte für die Verwertung und Ablagerung von Ausbruch- und Aushubmaterial). Ebenso sind für die Durchführung der EUU die Zugangsbauwerke EUU (z.B. Betriebsschacht EUU (1), Lüftungsschacht EUU (2)) zu realisieren und es wird ein sog. Zentraler Bereich (3) benötigt, in dem untertägige Betriebsinfrastrukturanlagen für Ver- und Entsorgung angeordnet werden und der der Transportlogistik und dem Betrieb EUU dient.

Im vorliegenden Bericht beschränken wir uns auf die konzeptionelle Beschreibung der Bauten für erdwissenschaftliche Untersuchungen (BEUU) (4), (5), (6) und der in diesen untertägigen Bauwerken vorgesehenen Arbeiten. Der Bericht legt u.a. die hierzu erforderlichen Anforderungen dar, damit sich die Arbeiten plangemäss umsetzen lassen. Technische Details zu Umsetzung, Anlagenplanung und Betriebskonzepte sind in anderen Berichten zu finden.

Der aktuelle Stand des generischen Lagerprojektes eines Kombilagers wird in (Nagra 2021a) beschrieben und dient als Basis für diesen Bericht. Die Unterschiede eines Kombilagers gegenüber zwei getrennten Einzellagern für HAA und SMA wurden in (Nagra 2020) beschrieben. Für Details zur Oberflächeninfrastruktur wird auf (Nagra 2019b) verwiesen. (Nagra 2016a) beschreibt Konzepte von Schachtkopfanlagen, die zur Erschliessung des Untergrundes notwendig werden. Eine Beschreibung verschiedener Konzepte für Lagerkammern sind in (Nagra 2016b) zu finden. Im Rahmen der Berichterstattung zum RBG werden gemäss (Schaub 2019) u.a. auch Berichte zur Beschreibung der Module der Lagerarchitektur eines geologischen Tiefenlagers, bzw. den Betriebskonzepten erstellt.

Die Auslegung der Infrastruktur EUU wird im Hinblick auf die Erarbeitung des Gesuchs EUU auf Stufe Bauprojekt konkretisiert. Die für die EUU benötigten Bauten werden so angeordnet und ausgelegt, dass sie die Charakterisierung der geologischen Situation untertag und damit die Beurteilung der Sicherheit des gTL ermöglichen, ohne die Eignung des Standorts für ein gTL zu beeinträchtigen (Art. 35 KEG). Es werden zuerst zwei getrennte Zugänge nach untertag erstellt (Fig. 2-1). Anschliessend wird der zentrale Bereich erstellt. In diesem werden die notwendigen Einrichtungen für den sicheren Betrieb und Bau der untertägigen Anlagen eingerichtet. Für die Durchführung der Experimente zur Erhärtung des Sicherheitsnachweises sowie die technischen Demonstrationen werden gesonderte Bereiche erstellt – die Bauten für erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag (BEUU). Diese Bereiche sollen später in die Testbereiche des gTL überführt werden. Die Lage dieser Bereiche wird so gewählt werden, dass die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf die Lagerfelder gegeben ist.

Um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten, sind bei der Planung der untertägigen Bauten entsprechende Flucht-, Rettungs-, Evakuations- und Interventionsmöglichkeiten vorzusehen. Während der Phase EUU werden keine radioaktiven Materialien verwendet. Es sind somit keine strahlenschutztechnischen Massnahmen unmittelbar zu berücksichtigen.

Die Infrastruktur EUU wird grundsätzlich so ausgelegt, dass sie nach erfolgter Baubewilligung umgenutzt (Abschnitt 3.2) und somit einen Teil einer Kernanlage darstellen können. Allfällige Umrüstungen werden in den entsprechenden Baubewilligungsgesuchen beschrieben.

Weiterhin muss die gesamte Anlage verschiedene bauliche, technische, organisatorische und administrative Anforderungen an die Anlagensicherung gemäss externen Vorgaben erfüllen.

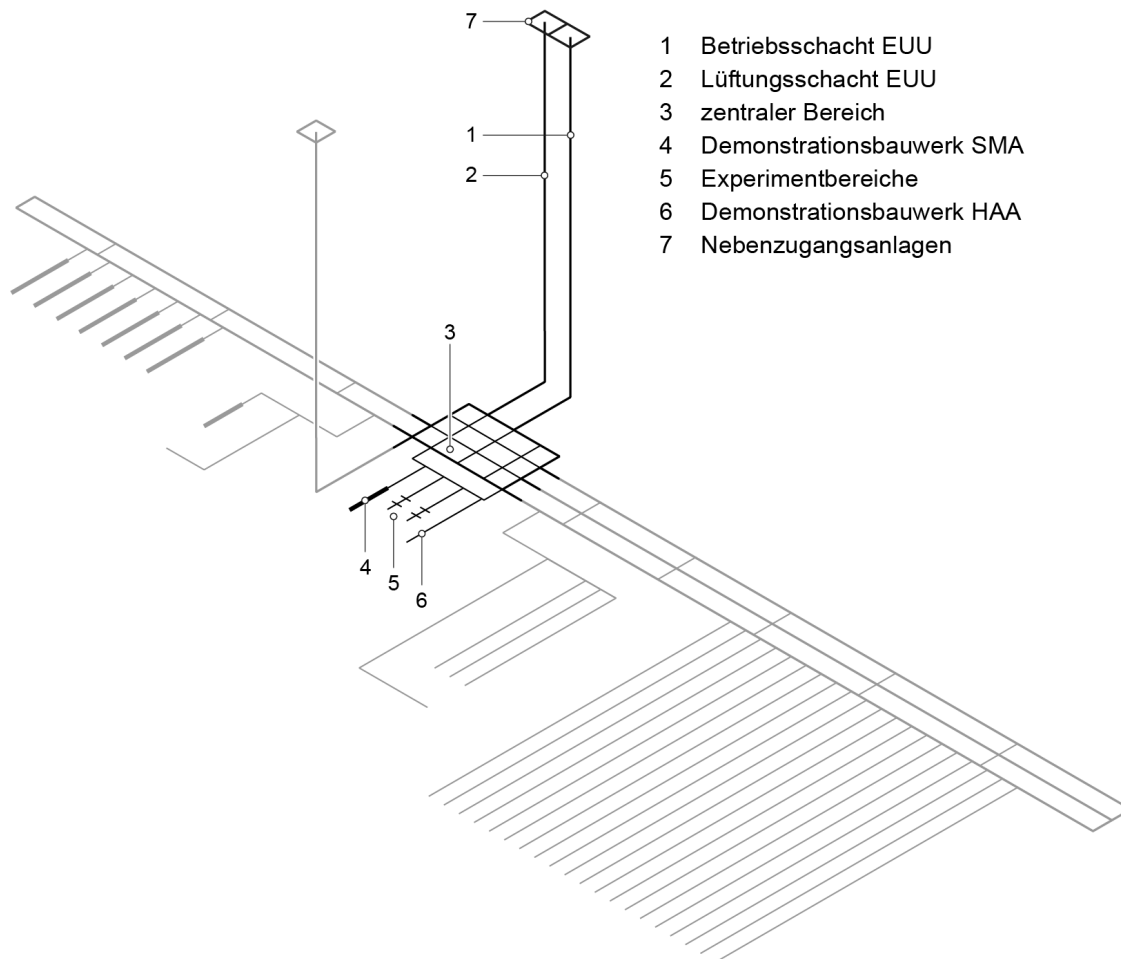


Fig. 2-1: Schematische Darstellung des generischen Lagerprojekts der untertägigen Infrastruktur, die während der Phase "Bau und Beginn EUU" erstellt wird (schwarze Linien) sowie der weiteren Lagerteile des späteren Kombilagers (Hauptlager, Pilotlager und Kontrollen für den SMA- und HAA-Lagerteil; graue Linien).

Am Standortgebiet Jura Ost würde der Betriebsschacht EUU durch einen Zugangstunnel EUU ersetzt werden. Für eine Beschreibung aller Lagerteile wird auf (Nagra 2021a) verwiesen.

2.2 Bauten für EUU auf Lagerebene

Die BEUU bezeichnen diejenigen Bauten auf Lagerebene, die ausschliesslich für die Durchführung der EUU erstellt werden. Dies sind die Bereiche in denen die Experimente bezüglich des Sicherheitsnachweises sowie die technischen Demonstrationen durchgeführt werden (Ziffern 4 – 6 in Fig. 2-1). Die BEUU werden in räumlicher Nähe der Zugangsbauwerke EUU in einem für die Lagerfelder repräsentativen Bereich errichtet. Dadurch wird gewährleistet, dass die für die Langzeit-Experimente notwendige Infrastruktur rasch geschaffen wird und besonders zeitkritische Experimente zügig begonnen werden können.

Die BEUU bestehen gemäss dem aktuellen Konzept aus Zugangstunnels, Betriebsräumen, Experimentbereichen sowie einem Demonstrationsbauwerk je Lagerteil, die in den projektierten Querschnitten der Lagerbauwerke beider Lagerteile, und mit vergleichbaren Bauverfahren, erstellt werden. Die Abstände der einzelnen Bereiche zum zentralen Bereich, zu den späteren Zugangsbauwerken der Lagerfelder, sowie zueinander werden so gewählt, dass die Einflüsse aus deren Bau und Betrieb auf die Experimente der EUU minimal sind. Die Experimentbereiche werden so angeordnet und aufgeföhren, dass sie möglichst ungestörte Volumen des WG erschliessen. Fig. 2-2 und 2-3 zeigen eine mögliche Anordnung der Experimentbereiche und Demonstrationsbauwerke und den entsprechenden Platzbedarf für die mögliche Experimente und Demonstrationen. Die Angaben entsprechen der derzeitigen Planung auf Stufe Konzept. Eine weitere Konkretisierung dieser Bauwerke erfolgt im Rahmen des Gesuch EUU.

Durch den Verschluss der späteren Lagerfelder und somit baulicher Trennung durch entsprechende Siegel werden die BEUU von den Lagerfeldern getrennt. Dadurch können negative Auswirkungen durch die EUU auf die Langzeitsicherheit ausgeschlossen werden.

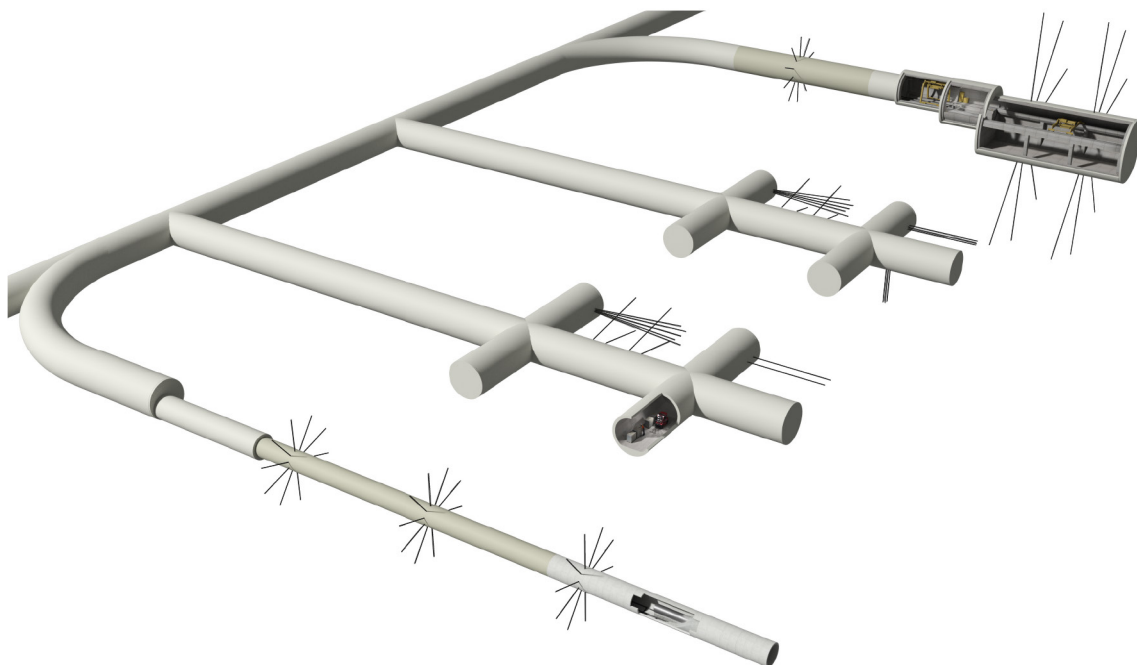


Fig. 2-2: Konzeptionelle Darstellung der BEUU mit Experimentbereichen und Demonstrationsbauwerken SMA und HAA in einer standortunabhängigen Realisierung

Mögliche Bohrungen zur Durchführung von Experimenten und zur Untersuchung der Auflockerungszone sind durch schwarze Linien angedeutet.

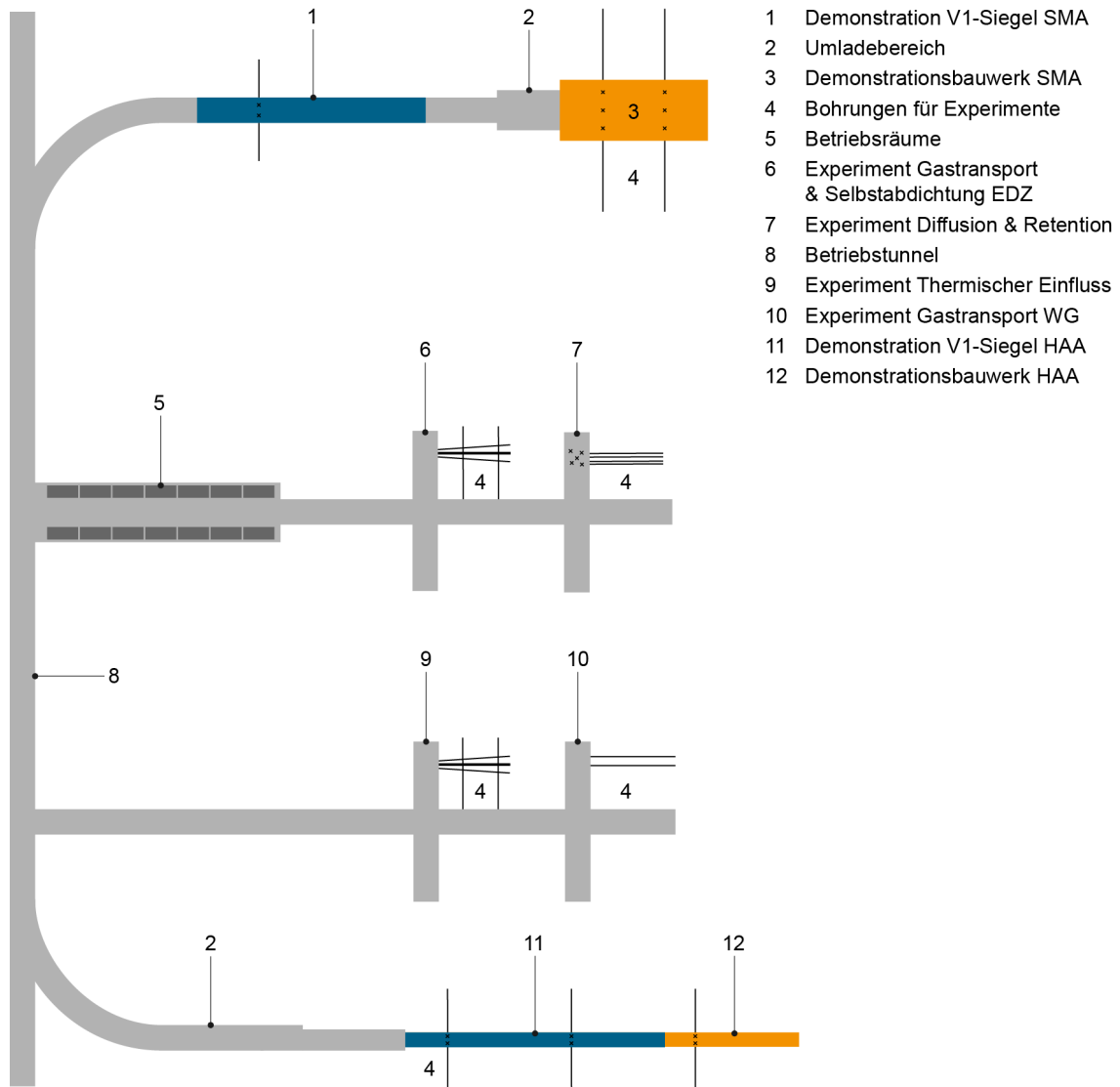


Fig. 2-3: Schematische Anordnung der BEUU mit Experimentbereichen und Demonstrationsbauwerken SMA und HAA.

Dünne Linien stellen mögliche Bohrungen für verschiedener Experimente sowie der notwendigen Instrumentierung und Erkundung dar. Abstände zwischen den einzelnen Komponenten sind nicht massstäblich. Die Demonstrationsbauwerke sind parallel zur maximalen Hauptspannung ausgerichtet.

2.2.1 Experimentbereiche

Für die Experimente zur Erhärtung des Sicherheitsnachweises (Abschnitt 4.4) werden Nischen benötigt, die ausreichend Platz für die jeweiligen Experimente bieten. Typischerweise bestehen Experimente aus einer Reihe von Bohrungen von mehreren Metern Länge. Die Orientierung der Bohrungen und Nischen müssen abhängig von der Orientierung des Spannungsfeldes, des Einfallens der Schichtung des Wirtgesteins, seiner Anisotropie-Achsen sowie den Anforderungen der jeweiligen Experimente realisiert werden. Die Anordnung der Experimentbereiche in Fig. 2-3 zeigt beispielhaft, wie diese Anforderungen für die geplanten Experimente erfüllt werden können. Das Lichtraumprofil der Experimentnischen muss die Erstellung von entsprechenden Bohrungen und den Zugang zu den BEUU mit Fahrzeugen erlauben.

2.2.2 Verteilte Nischen

Während der Phase Bau EUU können im zentralen Bereich verteilt Nischen für die EUU eingerichtet werden. In diesen Nischen können Untersuchungen zur räumlichen Variabilität des Wirtgesteins vorgenommen werden (siehe Abschnitt 4.3.2).

2.2.3 Demonstrationsbauwerk SMA

Im Demonstrationsbauwerk SMA werden die Demonstrationen der sicherheitsrelevanten Technologien für die SMA Einlagerung durchgeführt. Es besteht aus einem Abzweigertunnel (inklusive Siegelstrecke), dem Umladebereich, sowie einer nachgebildeten SMA Lagerkaverne. Die Lagerkaverne wird mit gleichem Ausbau wie er für die Lagerkavernen des SMA Lagers vorgesehen ist, jedoch mit einer geringeren Länge, realisiert werden. Die Länge wird so bemessen werden, dass sie ausreichend lang ist, um das mechanische Systemverhalten des Gebirges zu beurteilen und eine geringe Menge an Dummy-Gebinden (ohne SMA-Abfälle) einzulagern.

In der ersten Phase wird das Demonstrationsbauwerk SMA genutzt, um das Systemverhalten beim Vortrieb und der dabei entstehenden Veränderungen z.B. durch die Auflockerungszone (EDZ) um die Kaverne aufzunehmen. In der zweiten Phase werden die Demonstrationen der sicherheitsrelevanten Technologien (Einlagerung, Verfüllung, Rückholung sowie Versiegelung) durchgeführt (Abschnitt 4.3).

2.2.4 Demonstrationsbauwerk HAA

Im Demonstrationsbauwerk HAA werden die Demonstrationen der sicherheitsrelevanten Technologien für die HAA Einlagerung durchgeführt. Es besteht aus einem Abzweigertunnel (inklusive Siegelstrecke), dem Umladebereich, sowie einem nachgebildeten HAA Lagerstollen mit vergleichbarem Ausbau wie er für die Lagerstollen des HAA Lagers vorgesehen ist, jedoch mit einer geringeren Länge. Die Länge wird so festgelegt werden, dass eine geringe Anzahl von Dummy-Endlagerbehälter (ohne Abfälle) eingelagert werden kann.

In der ersten Phase wird das Demonstrationsbauwerk HAA genutzt, um das Systemverhalten beim Vortrieb und der dabei entstehenden Veränderungen z.B. durch die EDZ um den Stollen aufzunehmen. In der zweiten Phase werden schliesslich die sicherheitsrelevanten Technologien (Einlagerung, Verfüllung, Rückholung sowie Versiegelung) demonstriert (Abschnitt 4.5).

3 Umsetzung der erdwissenschaftlichen Untersuchungen untertag

Mit der Umsetzung der EUU am gewählten Standort sollen die standortspezifischen Verhältnisse in-situ untersucht werden. Die Untersuchungen sollen sich dabei auf ein notwendiges Mass beschränken. So sollen Platzbedarf und Störungen des Wirtgesteins durch entsprechende Anlagen und Experimente minimiert werden. Das hier vorgestellte Konzept für die Umsetzung der EUU entspricht dem aktuellen Stand des Nagra Research, Development and Demonstration Plans (Nagra 2021b).

Im Rahmen des Nagra RD&D-Programms werden parallel zu den EUU Entwicklungen vorangetrieben, welche die geplanten Arbeiten für EUU unterstützen (Nagra 2021b). Dazu gehören u.a. die Weiterführung von Langzeitexperimenten in Felslaboren, die Weiterentwicklung des Systems der technischen Barrieren, sowie die Entwicklung und Erprobung von Technologien zur Einlagerung, Verfüllung, Rückholung und Versiegelung. Letztere dienen der Vorbereitung der technischen Demonstrationen, die im Rahmen der EUU in den BEUU durchgeführt werden. Experimente zu einlagerungsbedingten Prozessen, die nicht standortspezifisch sind, sowie technische Versuche, die ohne Verlust der Übertragbarkeit anderswo durchgeführt werden können, werden anderweitig (beispielsweise in bestehenden Felslabors) durchgeführt und sind nicht Teil der EUU.

Die Ergebnisse der EUU fliessen als wichtige Komponente in die nuklearen Bau- und Betriebsgesuche ein. Das Verfahren für die Bau- und Betriebsfreigabe des gTL nach der Rahmenbewilligung ist in Anhang 4, KEV geregelt und sieht eine Hierarchisierung der Unterlagen vor (Hierarchiestufen H1 – H4). H1 entspricht der erforderlichen Dokumentation für die nukleare Baubewilligung. Das Erbringen von experimentellen Nachweisen aus den EUU für den Bau erfolgt auf Hierarchiestufe H2. Nachweise zur Erhärtung des Sicherheitsnachweises und bezüglich sicherheitsrelevanter Technologien für die Betriebsphase erfolgen im Rahmen des nuklearen Betriebsbewilligungsgesuchs, respektive vor Inbetriebnahme des Tiefenlagers (H3 und H4).

3.1 Zeitlicher Ablauf der erdwissenschaftlichen Untersuchungen untertag

Bis zur Einreichung des RBG werden die hier vorgestellten Konzepte zu den EUU weiter ausgearbeitet und präzisiert. Im folgenden Abschnitt werden die geplanten Aktivitäten, sowie die wichtigsten Meilensteine für ein Kombilager auf Planungsstufe Konzept dargestellt. In Tab. B-1 ist zudem ein Überblick, zusammen mit der baulichen und betrieblichen Situation untertags zusammengestellt.

Phase Rahmenbewilligung (bis 2031)

Zur Vorbereitung des Baus der Zugangsschächte werden eine oder mehrere Sondierbohrungen an den vorgesehenen Standorten erstellt. Mit ihr werden die standortspezifischen Gegebenheiten weiter erkundet und die Planung für den Bau der Zugangsbauwerke EUU konkretisiert. Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der Sondierbohrung wird das Gesuch EUU erarbeitet und den zuständigen Fachbehörden zur Prüfung eingereicht. Mit dem Gesuch EUU wird die Infrastruktur für EUU, obertägig und untertägig (Kapitel 2), sowie Art und Umfang der Untersuchungen, Experimente und Demonstrationen (Kapitel 4) beantragt, die in den BEUU durchgeführt werden sollen.

Phase Vorbereitung EUU (2032 – 2034)

Nach Rechtskraft der Rahmenbewilligung und parallel zur Prüfung des Gesuchs EUU erfolgt die Bauvorbereitung für die EUU. Diese Phase hat eine vorgesehene Dauer von 3 Jahren. In ihrer Schlussphase können allfällige Auflagen des UVEK bezüglich der EUU, die sich aus der Prüfung ergeben, bei der Vorbereitung der Aufträge berücksichtigt werden.

Phase Bau und Beginn EUU (2035 – 2039)

Mit dem Beginn des Baus der Zugangsbauwerke EUU beginnt die Ausführung des Arbeitsprogramms EUU. Die zeitliche Umsetzung ist zusammen mit den Realisierungsphasen gemäss (Nagra 2021a) und den Bewilligungsschritten in Fig. 3-1 dargestellt.

Nach Bewilligung des Gesuchs EUU durch das UVEK wird die Infrastruktur EUU erstellt. Alle Bauten werden so konzipiert und ausgelegt, dass sie später für den Betrieb des gTL umgenutzt werden können.

Die vortriebsbegleitende Erkundung beginnt mit dem Abteufen der Lüftungs- und Betriebschächte EUU und setzt sich auf Lagerebene mit der Begleitung des Vortriebs im Wirtgestein fort. Gleichzeitig werden, soweit im Rahmen des Baugeschehens sinnvoll, Messstellen zur Überwachung und allenfalls auch schon möglichen Langzeitmessungen eingerichtet.

Die ersten Experimente und Versuche werden gegen Ende der Phase "Bau und Beginn EUU" in den BEUU gestartet. Dies betrifft insbesondere Experimente bei denen mehrjährige Laufzeiten zum Erbringen des Sicherheitsnachweises vorgesehen sind. Experimente und Versuche, die kürzere Laufzeiten haben, können zeitversetzt gestartet werden und deren Ausführung hat einen gewissen zeitlichen Spielraum (Fig. 3-1). Alle Experimente werden so konzipiert, dass sie nicht vom parallelen Baubetrieb beeinflusst werden.

Die Phase "Bau und Beginn EUU" endet mit Einreichung des nuklearen Baubewilligungsgesuchs SMA, Hierarchiestufe H1 (nBaBG SMA H1). In diesem Gesuch ist bereits eine stufengerechte Aktualisierung des standortspezifischen Sicherheitsnachweises für SMA vorgesehen. Für diesen werden u.a. Erkenntnisse, die sich aus dem Bau der Zugangsbauwerke EUU sowie der BEUU ergeben haben, einbezogen. Weiterhin werden die geotechnischen Erfahrungen beim Bau der Zugänge und der BEUU für das Design der Lagerkavernen und der Versiegelungszonen einbezogen. Zwar werden zum Zeitpunkt der Einreichung des nBaBG bereits erste Experimente im Rahmen der EUU laufen, es ist jedoch zu diesem Zeitpunkt nicht notwendig, dass entsprechende Ergebnisse aus Langzeitexperimenten für die Nachweisführung vorliegen.

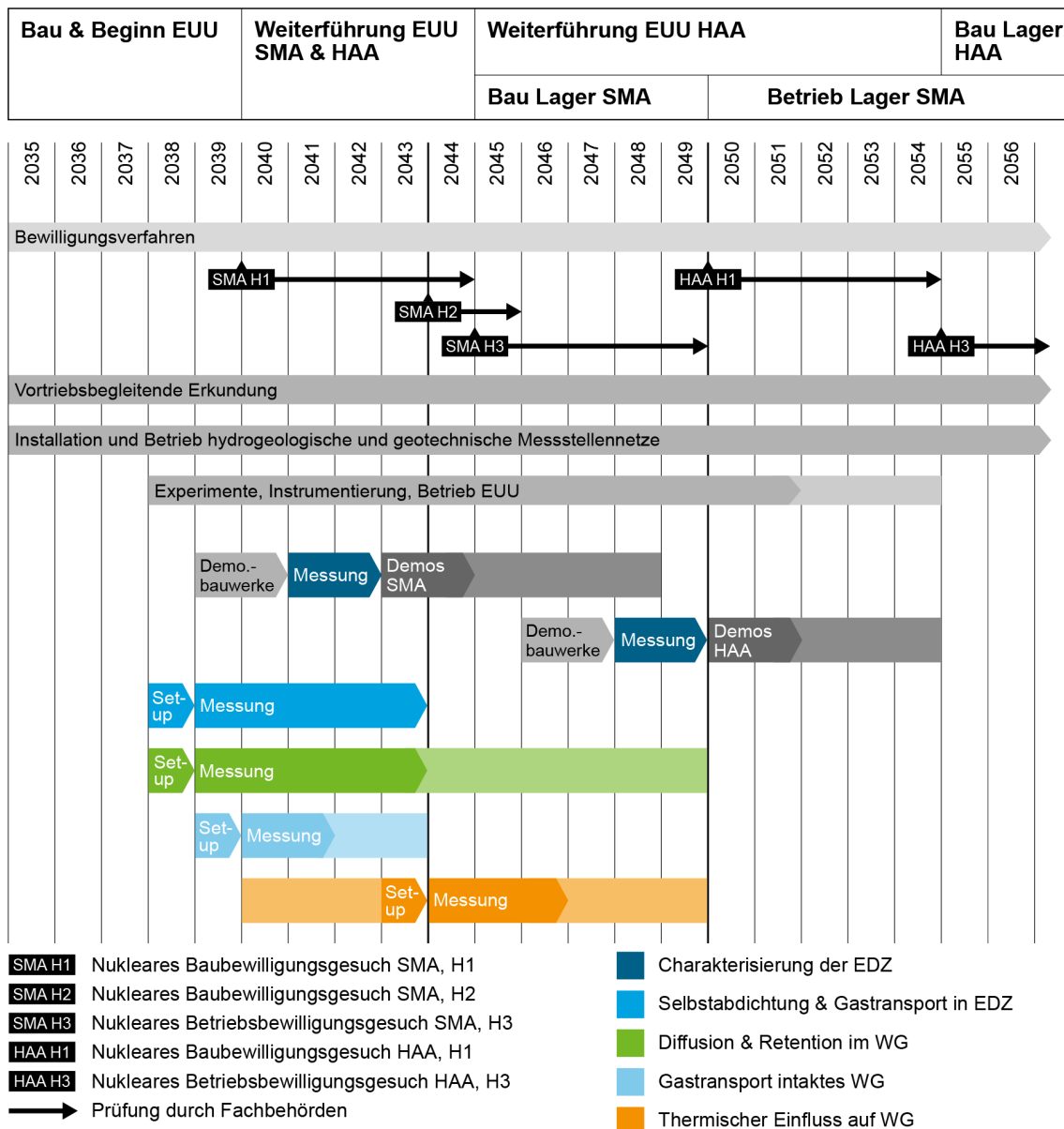


Fig. 3-1: Phasenweise Gliederung der Arbeiten EUU für ein Kombilager entsprechend des generischen Lagerprojektes zur Erlangung der nuklearen Bau- und Betriebsbewilligungen

Helle Erweiterungen der spezifischen Blöcke für Demonstrationen und Experiment deuten einen zeitlichen Spielraum für die jeweilige Umsetzung an.

Phase Weiterführung EUU SMA & HAA (2040 – 2044)

In der Phase "Weiterführung EUU" werden die erdwissenschaftlichen Untersuchungen zur Überprüfung der Lagerzone und der Bestätigung sicherheitsrelevanter Eigenschaften sowie zur Optimierung der Auslegung der Bauwerke auf Lagerebene durchgeführt. Wichtige Meilensteine sind die entsprechenden Sicherheitsnachweise, nötig für das nukleare Baubewilligungsgesuch SMA, Hierarchiestufe H2 (nBaBG SMA H2), das nukleare Betriebsbewilligungsgesuch SMA, sowie die entsprechenden Gesuche für den HAA Lagerbereich (nukleare Baubewilligung HAA, nukleare Betriebsbewilligung HAA). Es ist vorgesehen, die entsprechenden Nachweise und Demonstrationen zu staffeln bzw. für die Experimente Phasen vorzusehen, um die jeweiligen Nachweise stufengerecht zu erbringen.

Die Erstellung des Demonstrationsbauwerks SMA kann etwas zeitversetzt nach der Fertigstellung der BEUU erfolgen und wird zu Beginn dieser Phase abgeschlossen. Anschliessend kann eine etwa zweijährige Phase für die Durchführung von Messreihen genutzt werden. Im Anschluss, vor Erteilung der nuklearen Betriebsbewilligung, werden dann die in Art. 65 KEV geforderten Demonstrationen im Demonstrationsbauwerk SMA erbracht.

Weiterführung EUU HAA (2045 – 2054)

Die EUU-Arbeiten zur Erlangung der nuklearen Betriebsbewilligung SMA enden voraussichtlich mit der Einreichung des entsprechenden Gesuchs. Für den Lagerteil HAA werden jedoch noch Experimente durchgeführt bzw. weitergeführt, die zur Bestätigung der sicherheitstechnischen Eigenschaften für die Einlagerung von HAA notwendig sind. Diese sind z.B. Experimente zum thermischen Einfluss und die Demonstrationen mit Bezug zur Einlagerung von HAA.

Die BEUU werden in dieser Phase in die Testbereiche des gTL überführt. Das im Rahmen der EUU als Langzeit-Beobachtungssystem aufgebaute Sensor-Netzwerk zur Überwachung von z.B. Erschütterungen, Deformationen und Porenwasserdrücken wird in das Monitoring-Programm des operativen gTL überführt werden.

Die entsprechenden Arbeiten zur Erstellung und anschliessender Verifizierung des Demonstrationsbauwerks HAA erfolgen zeitversetzt entsprechend des Realisierungsprogramms HAA. Es sind je zwei Jahre für die Erstellung, der Verifizierung und die Demonstration vorgesehen. Entsprechend sind diese Arbeiten nicht zeitkritisch und es gibt zeitlichen Spielraum für deren Umsetzung (Fig. 3-1).

Es wird derzeit davon ausgegangen, dass mit Erhalt der nuklearen Betriebsbewilligung HAA die EUU enden. Bis zur Betriebsbewilligung wird eine umfangreiche und ausreichende Datengrundlage durch die EUU geschaffen sein. Die für die späteren Aktualisierungen des Sicherheitsnachweises relevanten Erkenntnisse werden anhand der baubegleitenden Erkundung und des Langzeit-Monitorings der Lagerfelder und der Pilotlager gewonnen.

Für die folgende Erstellung der Lagerbauwerke wird auf die Erfahrung und Abläufe, welche während der EUU entwickelt wurden, zurückgegriffen werden. So ist es z.B. vorgesehen, dass beim Auffahren der Lagerkavernen und Lagerstollen ähnliche Verfahren zur Kartierung und Dokumentation wie beim Erstellen der BEUU, Zugangsbauwerke und Betriebstunnels angewandt werden.

Allfällige Phase Rückbau

Sollte sich der Standort als ungeeignet für den Bau und Betrieb eines gTL erweisen und keine nukleare Baubewilligung erteilt werden, so müssen die BEUU sowie die Zugangsbauwerke EUU rückgebaut und verfüllt werden. Bei der Planung der BEUU und aller Zugangsbauwerke wird der Rückbau als mögliche Anforderung umgesetzt. Da auch der endgültige Verschluss nach Einlagerung der Abfälle bei der Planung berücksichtigt wird, sind die Voraussetzungen für einen geordneten, allfälligen frühzeitigen Rückbau und Verfüllung implizit gegeben.

3.2 Geplante Umnutzung der EUU Infrastruktur

Mit Erlangung der nuklearen Baubewilligung SMA werden die BEUU als Teil einer kern-technischen Anlage umgenutzt. Der Realisierungsplan der Nagra geht davon aus, dass die BEUU inklusive der erforderlichen Zugänge und der für EUU erstellten Oberflächeninfrastruktur nur situativ umgerüstet werden müssen und so ohne grössere bauliche Massnahmen formal juristisch umgenutzt und in ein gTL integriert werden können.

Dabei ist festzuhalten, dass mit den EUU kein Präjudiz im Hinblick auf die Errichtung eines gTL geschaffen und entsprechend mit der Realisierung der BEUU weder die Lage des Hauptlagers festgelegt noch eine Umnutzung der entsprechenden Bauten für das gTL garantiert wird. Durch die EUU werden wesentliche Beiträge für die Erstellung der nBaBG sowie nBeBG erlangt. Sollte eine Umnutzung der Zugänge nicht realisiert werden können, beispielsweise aus Gründen der Betriebs- und Langzeitsicherheit, würden die bestehenden Untertagebauten wieder verfüllt und versiegelt. Bestätigen die EUU die Eignungskriterien, so plant die Nagra mit dem nBaBG die Umnutzung der BEUU, soweit machbar und sinnvoll, in das gTL zu beantragen. Dazu wird Folgendes angestrebt:

- Die Umnutzung der Zugangsbauwerke EUU zu Zugangsbauwerken des gTL. Um dies zu ermöglichen, werden die Zugangsbauwerke EUU bereits im Gesuch EUU entsprechend dimensioniert.
- Die BEUU sollen soweit möglich und sinnvoll bei Erhalt der nuklearen Baubewilligung SMA in den Testbereich überführt und somit integraler Teil des gTL werden.
- Die Überführung der BEUU in die Testbereiche beinhaltet im Wesentlichen eine Änderung der Betriebserlaubnis von erdwissenschaftlichen Untersuchungen hin zum Bau einer kern-technischen Anlage. Da diese Bereiche schon entsprechend ausgelegt werden, sind aus heutiger Sicht keine bautechnischen Änderungen notwendig.
- Laufende Experimente, die für den später zu erfolgenden Sicherheitsnachweis HAA notwendig sind, werden dann in den Testbereichen weitergeführt.
- Die installierten Messnetzwerke zur In-situ-Messung von Deformationen, Seismizität, Porenwasserdruck etc. werden in das Langzeit-Monitoring des Lagerbetriebs überführt.

4 Mögliches Arbeitsprogramm für die erdwissenschaftlichen Untersuchungen untertag

4.1 Aufgaben der EUU

Aus den gesetzlichen und behördlichen Anforderungen an die EUU (siehe Anhang C) sowie aus den betrieblichen Anforderungen ergibt sich ein umfangreiches Aufgabenheft an die EUU, das hier kurz dargelegt werden soll.

Die erdwissenschaftlichen Untersuchungen der Nagra ergänzen die Datengrundlage für die Beurteilung der Langzeitsicherheit sowie für Planung und Projektierung der gTL. Die EUU schliessen an die bisherigen Standortuntersuchungen an und werden untertag entweder als erdwissenschaftliche Untersuchungen oder als Experimente und Demonstrationen durchgeführt. Darüber hinaus dienen sie auch zur Beschreibung des Ist-Zustands vor Betrieb des gTL, z.B. durch Installation eines untertägigen Monitoring-Systems, das die langzeitliche Entwicklung wichtiger Parameter und Zustandsgrössen dokumentiert.

Gemäss der Richtlinie ENSI-G03 sind sicherheitsrelevante Entscheidungen bei der Planung und Realisierung eines geologischen Tiefenlagers sowie der dazugehörigen Oberflächenanlage und Nebenzugangsanlagen im Rahmen eines Optimierungsverfahrens zu treffen. Dieses Verfahren ist im EP21 erläutert und umfasst eine Gesamtoptimierung des Vorhabens hinsichtlich Langzeitsicherheit, Sicherheit und Machbarkeit, Kompatibilität mit Umwelt, Raumplanung und Gesellschaft sowie Ressourcen und Wirtschaftlichkeit. Ein weiteres Ziel der EUU ist damit auch die Optimierung des geologischen Tiefenlagers hinsichtlich der Anforderungen der zuvor genannten Aspekte. Für detaillierte Angaben zur Optimierung der geologischen Tiefenlager in Zusammenhang mit sicherheitsgerichteten Entscheiden ist auf das EP21 (Nagra 2021a) verwiesen.

Zusammenfassend ergibt sich damit folgendes Aufgabenheft für die EUU:

- Bestätigung der Eignung des Lagerbereichs durch Bestätigung der Eignungskriterien
- Dokumentation und Beweissicherung beim Bau der untertägigen Anlagenteile
- Gewinnung von Labor- und Rückstellproben
- Bestätigung, Konsolidierung und Ergänzung der Datenbasis für den Bau der Lagerelemente bzw. für die optimierte Auslegung und Dimensionierung der untertägigen Anlagenteile (Tests der Vortriebs- und Ausbaukonzepte, Notwendigkeit bzw. Chancen von Designanpassungen etc.)
- Bestätigung, Konsolidierung und Ergänzung ausgewählter Annahmen zur Langzeitentwicklung (z.B. der Tunnel-Konvergenzen)
- Bestätigung, Konsolidierung und Ergänzung der Datenbasis für die Langzeitsicherheit bzw. der Annahmen zu den lagerbedingten Einflüssen für den Zeitraum unmittelbar nach Bau und Einlagerung sowie Verfüllung
- Bestätigung, Konsolidierung und Ergänzung der Datenbasis zu den Barriereigenschaften und der lokalen Variabilität
- Bestätigung der Übertragbarkeit bisherigen Prozessverständnisses auf den gTL Standort, und von den BEUU auf die Lagerfelder
- Demonstration von Einlagerung, Verfüllung, Rückholung und Versiegelung mit den entsprechenden Maschinen in den unterirdischen Anlagen

Das Arbeitsprogramm EUU gliedert sich in drei Hauptbereiche: (a) Die erdwissenschaftlichen Erkundungsarbeiten zur Charakterisierung der In-situ-Bedingungen und Eigenschaften inkl. Probennahmen und Messungen, (b) Experimente zur Überprüfung und Bestätigung der Barriereneigenschaften sowie zum standortspezifischen Sicherheitsnachweis und (c) Demonstrationen der wichtigsten Verfahren und Technologien zur sicheren Einlagerung, Verfüllung und Versiegelung sowie einer allfälligen Rückholung. Diese werden im Folgenden mit den jeweiligen Zielen, sowie mit einer Abschätzung des Zeitbedarfs, der notwendigen Ressourcen und der nötigen Infrastrukturen untertag genauer dargestellt.

Bis zur Einreichung des Gesuchs EUU wird das Arbeitsprogramm EUU selbst verschiedene Optimierungen erfahren, deren Zielsetzungen sind u.a. folgende:

- Erkundungsmassnahmen und Experimente sind so auszuführen, dass sie die Wirkung der natürlichen Barrieren des gTL nicht wesentlich beeinträchtigen.
- Der Platzbedarf der EUU soll so weit als möglich reduziert werden, um den Aufwand des Baus und Störung des WG durch entsprechende Anlagen zu reduzieren.
- Da die BEUU nach Erhalt der nBaB als Testbereiche Teil einer kerntechnischen Anlage sein sollen, sind Planungen entsprechender Sicherheitskonzepte und Qualitätssicherungsmassnahmen notwendig.
- Die notwendigen Experimente und Demonstrationen müssen zeitlich so erfolgen, dass sie als Datengrundlage für die nBaBG und nBeBG berücksichtigt werden können.
- Experimenten sollen soweit möglich kombiniert werden, um Synergien zu generieren.

Diese Optimierungen werden stufengerecht im Hinblick auf das Gesuch EUU erarbeitet.

4.2 Anforderungen für die Bestätigung der Eignungskriterien und die Erhärtung des Sicherheitsnachweises

Zur Definition der für die Lagerbereiche nutzbaren Flächen müssen die mit der Rahmenbewilligung festgelegten Eignungskriterien während der EUU bestätigt werden. Art. 63 KEV definiert Merkmale für die Minimalforderungen bezüglich der Eignung für den Lagerbereich. Wichtige Eignungskriterien betreffen die Ausdehnung geeigneter Wirtgesteinsbereiche, hydrogeologische Verhältnisse sowie die Verweilzeit des Tiefengrundwassers. In der Rahmenbewilligung müssen diese Kriterien spezifiziert werden.

Über die minimalen Eignungskriterien hinaus muss der standortspezifische Sicherheitsnachweis mit jedem Bewilligungsschritt erhärtet werden. Als Sicherheitsnachweis wird die Synthese von Beweisen und Argumenten bezeichnet, die im Laufe der Sicherheitsanalysen gesammelt wurden, um die Langzeitsicherheit eines gTL nach Verschluss darzulegen.

In der Schweiz beruht das Sicherheitskonzept auf einem bezüglich Langzeitsicherheit optimierten Mehrfachbarrierensystem (Nagra 2021a). Das ist ein System von gestaffelten, passiv wirkenden technischen und natürlichen Barrieren, welches – unter Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung des Tiefenlagersystems – Sicherheitsfunktionen erfüllt. Sicherheitsfunktionen sind übergeordnete funktionelle Anforderungen an das Mehrfachbarrierensystem, die zusammen die Langzeitsicherheit garantieren. Einzelne dieser Aufgaben werden durch die technischen und

natürlichen Barrieren oder andere Systemkomponenten übernommen. Die Langzeitsicherheit beruht auf den folgenden fünf Sicherheitsfunktionen:

- Isolation der radioaktiven Abfälle von der Erdoberfläche
- vollständiger Einschluss der Radionuklide für eine gewisse Zeit
- Immobilisierung, Rückhaltung und langsame Freisetzung der Radionuklide
- Kompatibilität der Elemente des Barrierensystems und der radioaktiven Abfälle untereinander und mit anderen Materialien
- Langzeitstabilität des Barrierensystems bezüglich geologischer und klimatischer Langzeitentwicklungen

Basierend auf systematischen Analysen zur Prüfung der Barrierenwirksamkeit unter dem Einfluss von verbleibenden Ungewissheiten einerseits sowie aller sicherheitsrelevanten Merkmale, Ereignisse und Prozesse andererseits, werden mögliche Entwicklungspfade des Tiefenlagersystems hergeleitet (Nagra 2021b). Innerhalb dieser grundsätzlichen Entwicklungspfade werden, basierend auf dem Systemverständnis und Wissens- und Kenntnisstand (d.h. wiederum unter Berücksichtigung verbleibender Ungewissheiten), Konzeptualisierungen und Parametrisierungen erarbeitet. Dies führt schliesslich zu einer Anzahl von Rechenfällen, für welche Konsequenzbetrachtungen durchgeführt und das Einhalten der Schutzziele nachgewiesen werden. Dabei werden sowohl das Referenzszenario, das die erwartete Entwicklung des Tiefenlagersystems beschreibt, alternative Szenarien und *What-if?* Fälle, welche die Robustheit des Tiefenlagersystems aufzeigen, betrachtet. Eine systematische Ungewissheitsanalyse der Daten, Prozesse und Modelle erlaubt das Aufzeigen des daraus folgenden Variationsbereichs der Radionuklidfreisetzung, respektive Dosisraten.

Für das RBG wird der Sicherheitsnachweis für den Standort ein standortspezifisches Lagerprojekt geführt. Darin fliessen die Erkenntnisse einer umfassenden Reihe von Experimenten, und vor allem die Aktualisierung der Geodatensätze durch Daten der 3D-Seismik, QBO- und TBO-Kampagnen und einer Vielzahl weiterer Untersuchungen mit ein.

Für die standortspezifische Erhärtung des Sicherheitsnachweises zuhanden nuklearer Bau- und Betriebsbewilligung wird im Rahmen der EUU untersucht, ob die tatsächlich vorgefundenen Bedingungen untertag mit dem erwarteten Zustand und Eigenschaften (d.h. den Anfangsbedingungen des Referenzszenarios und dessen Parameter-Bereichen) übereinstimmen. Weiterhin soll auch nachgewiesen werden, dass sich das gTL entsprechend der dem Referenzszenario zugrundeliegenden Spezifikationen bautechnisch umsetzen lässt. Dazu müssen die Ungewissheiten des Geodatensatzes am gewählten Standort durch die EUU reduziert werden. Im Hinblick auf die EUU beinhaltet dies insbesondere eine Präzisierung relevanter Daten und Modelle zur Geologie und der geologischen Situation untertag. Hierzu ist im Besonderen die Übertragbarkeit der bisherigen Erkenntnisse auf den gewählten Standort zu bestätigen. Dies geschieht mittels spezifischer Experimente und erdwissenschaftlicher Untersuchungen, die in den BEUU durchgeführt werden.

Begleitend zum Vortrieb findet eine ingenieurgeologische Ansprache des durchfahrenen Gebirges statt. Die Methode und Umfang der ingenieurgeologischen Gebirgsansprache während dem Vortrieb richten sich primär an den Bedarf der gewählten Vortriebsmethode und den partikulären Anforderungen des zu erstellenden Bauwerks. Nach Möglichkeiten und Bedarf können bei der Ansprache auch Daten für nicht bautechnische Zwecke erhoben werden. In regelmässigen Abständen werden Handstücke oder Gesteinsproben für Laboruntersuchungen oder als Rückstellproben genommen.

4.3.2 Erkundung auf Lagerebene

Die Ziele für die vortriebsbegleitende Erkundung auf Lagerebene sind:

- Optimierung des Vortriebs hinsichtlich der geologischen Bedingungen des Wirtgesteins
- Dokumentation des Ist-Zustandes und der geologischen Bedingungen
- Kontinuierliche Verifikation, dass die geforderten Eignungskriterien erfüllt sind
- Probennahme (Kerne, Handstücke) je nach Bedarf

Die vortriebsbegleitende Erkundung auf Lagerebene erfolgt somit mit ähnlichen Zielen wie die der Zugangsbauwerke. Sie variieren nach gewählter Vortriebsmethode und den partikulären Anforderungen des zu erstellenden Bauwerks. Zusätzlich ist nun eine Kartierung der durchfahrenen Strecken notwendig, um allfällige im Wirtgestein enthaltene relevante Störungen und gegebenenfalls einlagerungsbestimmende Strukturen zu dokumentieren.

Eine weitere Anforderung ist es die Lage der Bauten auf Lagerebene relativ zu den Schichtgrenzen des Wirtgesteins zu überprüfen und den weiteren Vortrieb gegebenenfalls anzupassen. Hierzu werden in den nächsten Jahren Forschungsaktivitäten initiiert, z.B. mit Fokus auf seismischen Methoden analog zu Methoden, die für horizontales Tiefbohren im Öl und Gas Sektor angewandt werden.

Labor- und Rückstellproben werden regelmässig gewonnen. Mit diesen wird die Datenbasis über die bisherigen Sondierbohrungen hinaus im Hinblick auf die Überprüfung der Eignungskriterien und den Sicherheitsnachweis für die nukleare Bau- und die Betriebsbewilligungen erweitert. Spezifische Untersuchungsziele sind z.B. die Mineralogie, gesteinsmechanische Eigenschaften, Porenwasserchemie und Porosität.

Die Konvergenzen der Profile der Zugangsbauwerke EUU und Bauwerke auf Lagerebene werden kontinuierlich überwacht. Dazu werden während des Ausbaus entsprechende Messsysteme bzw. Reflektoren installiert, die zur Überwachung verwendet werden. Die Messtechnik im Bereich der Verformungsmessung ist derzeit im Wandel besonders durch den verstärkten Einsatz von faseroptischen Methoden zur räumlich und zeitlich kontinuierlichen Überwachung. Die Nagra begleitet entsprechende Forschungsvorhaben derzeit aktiv und beobachtet die Technologie-Entwicklung in diesem Sektor intensiv. Es ist daher zu erwarten, dass Konzepte zur Überwachung der Verformungen und anderer Parameter entsprechend der technologischen Entwicklung überarbeitet werden.

Untersuchungen zur Hydrogeologie und den Barriereneigenschaften des Wirtgesteins

Das Verständnis der relevanten Transportmechanismen und -eigenschaften im Wirtgestein soll durch Untersuchungen auf Lagerebene mit Blick auf die Eignungskriterien und den Sicherheitsnachweis für die nukleare Bau- und die Betriebsbewilligung überprüft werden. Einen hohen Stellenwert nehmen dabei hydrogeologische Untersuchungen ein (z.B. zur Paleohydrogeologie mittels Untersuchungen zur Porenwasserchemie). Sollten Störungszonen beim Vortrieb aufgeschlossen werden, so würden diese bei möglicher Relevanz einem entsprechenden Untersuchungsprogramm unterworfen. Dazu können je nach Grösse der Störung z.B. geologische Kartierungen, Entnahme von Gesteinsproben für Laboranalysen (z.B. Mineralogie, Petrophysik) und hydraulische Charakterisierungen anhand von Packertests betrachtet werden. Weiterhin können bei Bedarf bzw. an relevanten Lokationen verschiedene hydraulische Messstellen eingerichtet werden, mit denen die Langzeitentwicklung der Porenwasserdrücke im Wirtgestein überwacht werden und die räumliche Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeit bestimmt werden kann. Von besonderer Bedeutung sind Profile natürlicher Tracer (z.B. Cl^- , stabile Wasserisotope) im Hinblick auf die Bestätigung der Barriereneigenschaften und Transportprozesse auf Lagerebene.

Geophysikalische Erkundung

Bei der Erkundung auf Lagerebene kann bei Bedarf auch auf geophysikalische Methoden zurückgegriffen werden. Ziele entsprechender Messkampagnen sind die Abbildung von Eigenschaften oder Strukturen, welche für die Planung der Lagerfelder berücksichtigt werden sollen, aber durch die Erkundung von der Oberfläche, nicht abgebildet werden konnten. Weiterhin kann mittels geophysikalischer Methoden die Mittellage des Vortriebs im Wirtgestein überprüft werden. Potenziell anwendbare Verfahren sind u.a. die seismische Tomografie und Reflexionsseismik.

Variabilität der Wirtgesteinseigenschaften

Für die Erkundung auf Lagerebene ist es auch wichtig, den Einfluss räumlicher Variabilität auf die sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Wirtgesteins zu untersuchen. Am Felslabor Mont Terri und durch die Tiefbohrungen in den Standortgebieten wurde durch eine Vielzahl an Untersuchungen ein umfangreiches Verständnis von der Ausbildung und Variabilität der Gesteinsparameter erlangt. Die Übertragbarkeit dieses Verständnisses auf den gTL Standort und von den BEUU auf die Lagerfelder soll mit den EUU validiert werden. Zur umfassenden Charakterisierung der Variabilität kann es nötig sein, geeignete Messungen in regelmässigen räumlichen Abständen zu wiederholen. Für diese Messungen können z.B. Nischen, die schon in der Phase Bau EUU aus logistischen Gründen erstellt werden, genutzt werden. Beim Messprogramm ist insbesondere auf die Vergleichbarkeit der jeweiligen Methoden zur Parameterbestimmung an den verschiedenen Lokalitäten zu achten.

Heterogenitäten und Variabilitäten betreffen u.a. die mineralogische Zusammensetzung, Trennflächen, mechanische Parameter, hydraulische Parameter und Gebirgsspannungen. Ein Arbeitsprogramm für die verteilten Testnischen könnte u.a. folgende Aspekte umfassen:

- Lithologie und Mineralogie
- Spannungsfeld
- Wasser- und Gas-Permeabilität

- Strukturgeologie
- Gesteinseigenschaften wie Festigkeiten

Untertägige Messstellen zur langfristigen Überwachung

Es wird ein untertägiges Netzwerk an Messstellen installiert, kontinuierlich ausgebaut und betrieben werden, um eine umfassende, ergänzende Datenbasis für die Realisierung der verschiedenen Phasen des gTL (Bau, Betrieb, Beobachtung, Verschluss) bereitzustellen. Folgenden Messungen sind momentan angedacht:

- Erfassung und Beprobung von allfälligen Wasserzuflüssen in den Zugangsbauwerken
- Überwachung von Konvergenzen
- Erfassung der Deformationen im Gebirge
- Erfassung der Porenwasserdrücke
- untertägige Erschütterungen bzw. Seismizität auf Lagerebene

Nach Abschluss der EUU wird das Messstellennetzwerk, soweit sinnvoll, in das Langzeit-Monitoring Programm zur Überwachung der Betriebs-, Beobachtungs- und Verschlussphase überführt.

Nicht als Teil der EUU, sondern im Rahmen der Betriebssicherheit, werden Tunnelklima wie Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck und Zusammensetzung der Luft inkl. Gehalt an Sauerstoff, CO₂ etc. sowie radiologische Kennziffern inkl. Radonkonzentration untertägig überwacht. Zusätzlich ist es geplant, im Rahmen der von der Oberfläche ausgehenden Überwachung der Umwelt und des geologischen Umfeldes Porenwasserdrücke im Bereich der zukünftigen Lagerfelder im Wirtgestein und den Rahmengesteinen zu überwachen (Fanger et al. 2021).

4.4 Experimente zum standortspezifischen Sicherheitsnachweis

Die sicherheitsrelevanten Eigenschaften des OPA sollen entsprechend den Anforderungen im Art. 65 KEV spezifisch für den potenziellen gTL Standort zur Erhärtung des Sicherheitsnachweises untersucht werden. Dazu sollen im Rahmen der EUU geeignete Experimente in situ durchgeführt werden. Die grundlegenden Prozesse wurden in der Vergangenheit detailliert untersucht und sind ausreichend verstanden, um den für das nukleare Betriebsgesuch geforderten Sicherheitsnachweis zu führen. Das Ziel der in den BEUU durchzuführenden Experimente ist es zu zeigen, dass das derzeitige Verständnis dieser Prozesse auf den gewählten Standort anwendbar ist. Wenn die sicherheitsrelevanten Parameter in den erwarteten Bereichen liegen, dann lassen sich die lagerbedingten Einflüsse auf das Wirtgestein entsprechend den aktuellen Lagerkonzepten sicher beherrschen (Nagra 2021b).

Der Sicherheitsnachweis für ein gTL basiert unter anderem auf den günstigen Eigenschaften des OPA. Diese sind seine hydro-mechanischen Eigenschaften, wie die sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit und das Selbstabdichtungsverhalten, sowie die strukturgeologischen Bedingungen seiner Lagerung wie die genügende Ausdehnung und Prognostizierbarkeit. Das Lager ist so auszulegen, dass diese günstigen Eigenschaften durch die lagerbedingten Einflüsse keine sicherheitsrelevanten Beeinträchtigungen erfahren.

Die Anforderungen in Bezug auf die zu überprüfenden Eigenschaften des OPA sowie seiner Zustandsparameter werden für das RBG zusammengestellt. Im vorliegenden Bericht kann darauf noch nicht zurückgegriffen werden und es müssen stattdessen Planungsannahmen verwendet werden, um den voraussichtlichen Zeit- und Platzbedarf für die entsprechenden technischen Nachweise zu schätzen. Im Folgenden werden in situ-Experimente beschrieben, die zur Erhärtung des standortspezifischen Sicherheitsnachweises momentan auf konzeptioneller Stufe in Frage kommen. Sie orientieren sich stark an den Erfahrungen vorrangegangener Experimente, meist durchgeführt im Felslabor Mont Terri. Aus diesen Erfahrungen wurden Zeit- und Platzbedarf abgeschätzt. Die exakte Umsetzung der Experimente wird mit der Weiterentwicklung der Konzepte zu den EUU präzisiert werden. Insbesondere können so Fortschritte in der Messtechnik, sowie neue wissenschaftliche Methoden und allenfalls auch neue Anforderungen berücksichtigt werden.

4.4.1 Charakterisierung der Auflockerungszone (EDZ)

Ziele: Beim Auffahren von Hohlräumen entsteht eine Auflockerungszone (excavation damaged zone – EDZ). Das Ziel der Untersuchungen ist es u.a. die Reduktion des einschlusswirksamen Bereichs für SMA Lagerkavernen und die Anforderungen an die Auslegung und Ausführung der Versiegelungsstrecken zu quantifizieren und schliesslich die Auslegung der entsprechenden Bauwerke festzulegen.

Mögliche Umsetzung: In den Demonstrationsbauwerken werden Bohrungen senkrecht zu den Tunnel- bzw. Kavernenachsen gebohrt, um die EDZ zu kartieren, hydraulische Tests durchzuführen und geophysikalische Methoden zur Charakterisierung einzusetzen. Die EDZ und spezifische Aspekte, wie z.B. deren Abdichtung durch einen sich aufbauenden Quelldruck, können auch als Teil weiterer Experimente untersucht werden.

Eingliederung in Realisierungsplan: Da das Gebirgsverhalten zur Auswahl und Optimierung der Vortriebsverfahren massgebend ist, werden entsprechende Untersuchungen schon beim Schachtbau und Tunnelvortrieb begleitend durchgeführt. Für die Charakterisierung der EDZ im Bereich der Lagerbauwerke werden vollmassstäbliche Demonstrationsbauwerke erstellt. Diese sind für die Demonstrationen der sicherheitsrelevanten Techniken ohnehin notwendig. Für die allfällige Überwachung dieser Bauwerke werden vorläufig jeweils 2 Jahre eingeplant.

4.4.2 Gastransport-Kapazität des intakten Wirtgesteins

Ziele: Die Gastransportkapazität des WG ist ein wichtiger Parameter, der allenfalls in den EUU untersucht werden soll. Es existieren zahlreiche Untersuchungen und Experimente zum Thema Gastransport-Verhalten bzw. -Kapazität der verschiedenen Systemkomponenten eines gTL. Während sich Verfüll- und Versiegelungsmaterialien sehr gut und auch repräsentativ in "off-site" Labor- bzw. Mock-Up-Experimenten untersuchen lassen, kann es notwendig sein, das Wirtgestein diesbezüglich im Rahmen der EUU zu untersuchen, um Daten unter in situ-Bedingungen zu erheben.

Mögliche Umsetzung: Die Gastransport-Kapazität des intakten WG kann mittels Gas-Injektions-Tests untersucht werden, um die dominanten Transport-Mechanismen im ungestörten OPA und unter den gegebenen in situ-Bedingung bezüglich des Druckes und der Spannungen zu ermitteln. Es werden zwei Bohrungen zur Injektion und Messung benötigt.

Eingliederung in Realisierungsplan: Die Gastransportkapazität ist relevant für SMA und HAA Lagerteile. Erfahrungen mit entsprechenden Experimenten im Felslabor Mont Terri zeigen, dass solche Versuche in 1 – 2 Jahren durchgeführt werden können.

4.4.3 Selbstabdichtung und Gastransport-Kapazität der EDZ

Ziele: Die Selbstabdichtung von Rissen durch Quellen ist eine der wesentlichen Sicherheitseigenschaften des OPA. In Experimenten im Felslabor Mont Terri wurde das Gastransport-Verhalten in der EDZ über einen längeren Zeitraum untersucht, um das zeitabhängige Verhalten der Gaspermeabilität zu bestimmen. Dies ist ein wesentlicher Prozess, der bei der Auslegung und Ausführung von Siegelementen berücksichtigt werden muss.

Mögliche Umsetzung: Die Selbstabdichtung kann als Teilaspekt zu Beginn des Experiments zu den Gastransporteigenschaften der EDZ untersucht werden. Hierbei wird die zeitliche Entwicklung der hydraulischen Durchlässigkeit während der Aufsättigung der Verfüllung sowie der EDZ bestimmt. Anschliessend kann die verbleibende Gastransport-Kapazität der EDZ in einem Injektionstest untersucht werden.

Eingliederung in Realisierungsplan: Die Selbstabdichtung und Gastransport-Kapazität der EDZ ist für SMA und HAA relevant. Je nach Realisierung der Experimente wäre mit Versuchsdauern von etwa 3 – 5 Jahren auszugehen, ggf. weniger, wenn das Selbstabdichtungsverhalten einzeln untersucht würde.

4.4.4 Thermischer Einfluss auf das Wirtgestein

Ziele: Der thermische Eintrag durch die wärmeentwickelnden HAA-Abfälle darf einen gewissen Grenzwert nicht überschreiten. Dass dieser Grenzwert nicht überschritten wird und auch gekoppelte hydromechanische Prozesse keine kritischen Punkte überschreiten, muss gegebenenfalls in den EUU standortspezifisch und experimentell verifiziert werden. Ergebnisse solcher Untersuchungen können auch in die Optimierung der Lagerarchitektur einfließen.

Mögliche Umsetzung: Das Wärmeleitfähigkeitsverhalten bzw. das gekoppelte THM-Verhalten des Wirtgesteins kann untersucht werden, um entsprechende in situ-Daten zum thermischen Materialverhalten zu sammeln. Hierzu würde ein Heiz-Experiment im Bohrloch-Massstab mit einer Instrumentierung zur Überwachung u.a. von Temperatur, Porenwasserdrücken, Deformationen und Dehnungen vorgesehen werden.

Eingliederung in Realisierungsplan: Der thermische Einfluss ist nur für HAA relevant. Es sind Messdauern von etwa 1 – 3 Jahren notwendig um die relevanten Prozesse eingehend zu verifizieren. Da die Resultate erst für die Gesuche zum HAA Lager benötigt werden, sind diese Versuche nicht zeitkritisch.

4.4.5 Diffusions- und Retentionsverhalten

Ziele: Es existieren zahlreiche Untersuchungen und Experimente zum Transport- bzw. Diffusions-, Sorptions- und Retentionsverhalten von Radionukliden in den verschiedenen natürlichen und künstlichen Barrieren eines gTL. Während sich Verfüll- und Versiegelungsmaterialien sehr gut und auch repräsentativ im Labor untersuchen lassen, ist zu evaluieren, inwieweit es notwendig ist, das Wirtgestein ausserhalb der EDZ diesbezüglich im Rahmen der EUU unter in-situ-Bedingungen zu untersuchen.

Mögliche Umsetzung: Falls solche Untersuchungen notwendig sind, gilt es die Transporteigenschaften, das Retentionsverhalten und Sorptionsparameter für Nuklide zu bestimmen. Dazu würden beispielsweise Bohrungen in verschiedenen Orientierungen im Wirtgestein erstellt, über welche Tracer eingebracht werden. Anstelle von Radionukliden würden Tracer verwendet werden, die vergleichbare Diffusions- und Retentionseigenschaften haben, wie die für die Langzeitsicherheit relevanten Radionuklide. In Beobachtungsbohrungen werden die Tracerkonzentrationen dann über mehrere Jahre überwacht. Nach Abschluss der Überwachung würden die Injektionszonen überbohrt werden, um weitere Proben zu gewinnen.

Eingliederung in Realisierungsplan: Trotz der kleinen räumlichen Massstäbe bei diesen Experimenten sind Messdauern von etwa 5 Jahren oder länger notwendig. Diese Experimente können in mehreren Phasen durchgeführt werden, wodurch auch deutlich längere Zeitreihen, zur Erhärtung der Resultate, gewonnen werden könnten. Die Nachweise wären für die Langzeitsicherheit der HAA Lager relevant. Da die Einreichung des nBaBG HAA erst für 2049 vorgesehen ist, steht ausreichend Zeit zur Gewinnung belastbarer Resultate zur Verfügung.

4.5 Demonstrationen

Nach Art. 65 KEV sind die sicherheitsrelevanten Techniken zu erproben und deren Funktionstüchtigkeit nachzuweisen. Diese Demonstration werden in den Demonstrationsbauwerken durchgeführt. Diese werden mit den dann geplanten Dimensionierungen und demselben Ausbau der HAA Lagerstollen bzw. SMA Lagerkavernen ausgeführt. Sie dienen somit auch zur Erprobung der vorgesehenen Verfahren für den Ausbau der Lagerbauwerke.

Vor den Demonstrationen untertag werden obertägig, z.B. in Lagerhallen, weitere Versuche zur Einlagerung, Verfüllung, Rückholung und Versiegelung durchgeführt, um die Abläufe zu erproben und zu optimieren. Diese obertägigen Versuche werden im Rahmen des Nagra RD&D-Programms geplant und sind nicht Bestandteil des Arbeitsprogramms EUU. Die Nagra geht aktuell davon aus, dass die Demonstrationen vor Einreichung des nuklearen Betriebsbewilligungsgesuchs abzuschliessen sind.

4.5.1 Einbringung und Verfüllung

Die maschinelle Einbringung von ELBs und Verfüllung von Lagerstollen für das HAA-Lager wurde mit einem Prototyp einer Einlagerungs- und Verfüllmaschine (Fig. 4-2) für die Experimente FE im Felslabor Mont Terri und HotBENT im Felslabor Grimsel erfolgreich durchgeführt (Nagra 2019a). Die erforderliche Demonstration wird gemäss aktueller Planung in den Demonstrationsbauwerken und unter den derzeitigen Voraussetzungen bezüglich Dimension und Ausbau der HAA Lagerstollen sowie der ELB durchgeführt werden. Die Demonstration wird, gemäss dem aktuellen Konzept, die Platzierung des Sockels aus Bentonit-Blöcken, die Platzierung der Endlagerbehälter und die Rückverfüllung mit Bentonit-Granulat durch ferngesteuerte Maschinen beinhalten. Entsprechend dem aktuellen Konzept werden eine kleine Zahl von HAA-Endlagerbehältern, jedoch ohne Abfälle, eingebracht und der Lagerstollen verfüllt werden. Während und nach der Verfüllung wird die Einhaltung aller relevanten Spezifikationen dokumentiert werden.

Bezüglich der Einlagerung und Verfüllung von SMA Abfallgebinden kann auf die Erfahrung von international bestehenden SMA Lagern zurückgegriffen werden. Entsprechend dem aktuellen Lagerkonzept beinhaltet die Demonstration die Platzierung der Gebinde, jedoch ohne Abfälle, sowie die Verfüllung der verbleibenden Freiräume mit Beton. Es ist derzeit vorgesehen ausreichend Gebinde einzubringen, um einen Querschnitt der Lagerkaverne zu füllen und die verbleibenden Hohlräume zu verfüllen.

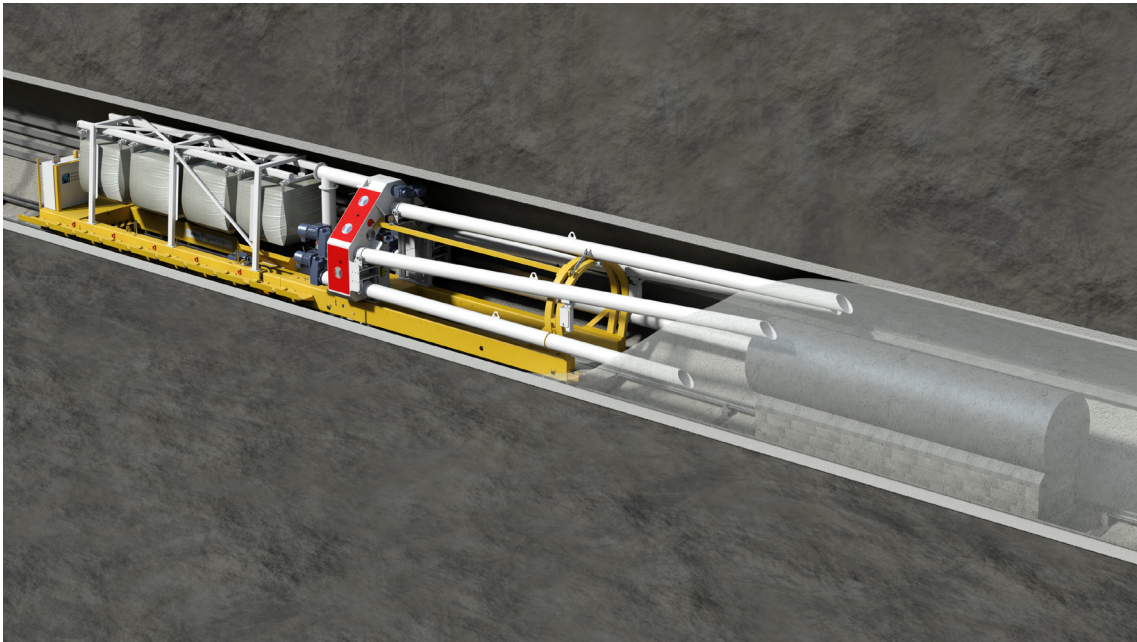


Fig. 4-2: Verfüllung eines Heizers mit den Dimensionen eines Endlagerbehälters auf einem Sockel aus Bentonit-Blöcken beim FE-Experiment

Die erfolgreiche Hinterfüllung mit Bentonit-Granulat wurde bereits für die Experimente FE (Müller et al. 2017) und HotBENT durchgeführt und wird vergleichbar auch für die Demonstration während der EUU vorgesehen.

4.5.2 Rückholung

Nach demonstrierter Einbringung und Versiegelung wird auch eine allfällige Rückholung der HAA-Endlagerbehälter und SMA-Abfallgebinde demonstriert werden. Dies schliesst das Entfernen des Verfüllmaterials ein. Für die Rückholung der HAA-Endlagerbehälter (Fig. 4-3) wird ein Konzept erarbeitet und präzisiert werden, das ausschliesslich auf ferngesteuerte Maschinen basieren wird. Die Rückholung der SMA-Endlagerbehälter kann mit konventionellen Verfahren geschehen und erfordert keine ferngesteuerten Maschinen.

Im Hinblick auf das RBG ist die Erstellung eines Konzeptberichts zur Rückholung vorgesehen; darin werden sich detailliertere Angaben zur Rückholung finden.

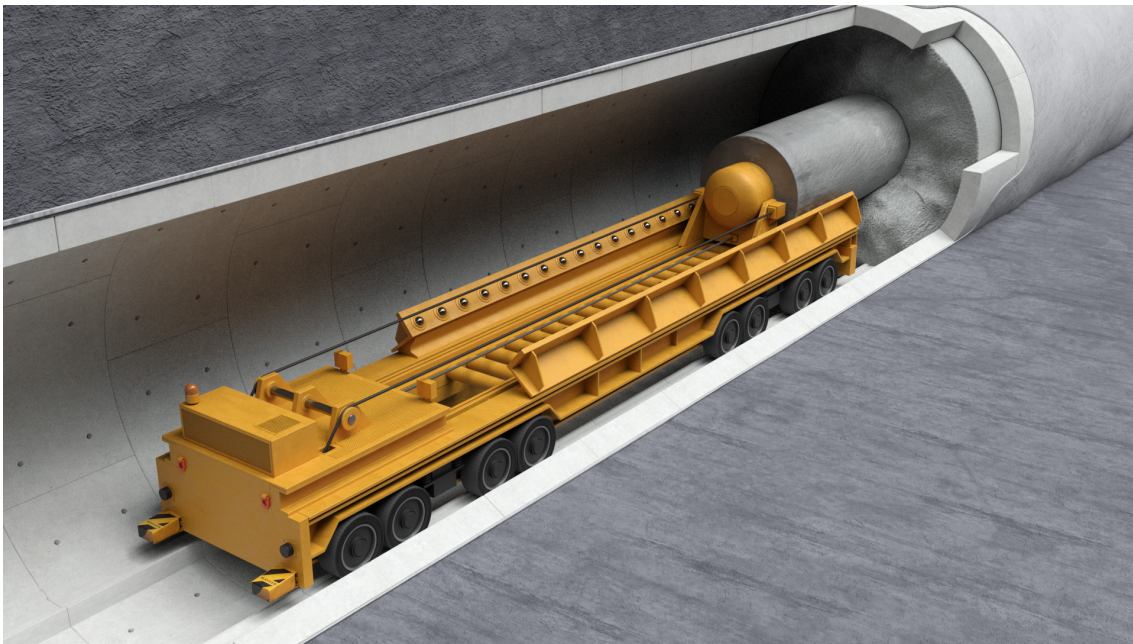


Fig. 4-3: Konzeptionelle Darstellung der Rückholung von HAA ELB aus einem verfüllten Lagerstollen

4.5.3 Versiegelung

Nach Art. 65 Abs. 3 KEV sind die Versiegelung von Kavernen und Stollen während des Betriebes der Lager zu erproben und deren Funktionstüchtigkeit nachzuweisen. Im Vollmassstab mit den final entwickelten Methoden, Materialien und Maschinen muss der Nachweis der Versiegelung der Lagerbauwerke SMA und HAA erst noch erfolgen.

Die Siegel werden voraussichtlich aus einer Kombination von mit Bentonit verfüllten Strecken sowie Beton-Widerlagern bestehen (Fig. 4-4). Die Konzepte für die Versiegelung werden bis zur Durchführung der Demonstrationen präzisiert werden (Nagra 2021c). Dabei werden ingenieurstechische Vorgaben und Spezifikationen erarbeitet, verfeinert oder optimiert. Für die Demonstration der Versiegelung wird die Einhaltung dieser Spezifikationen dokumentiert.

Die Demonstrationen der Siegel werden voraussichtlich in den Synergiebauwerken SMA bzw. HAA erfolgen.

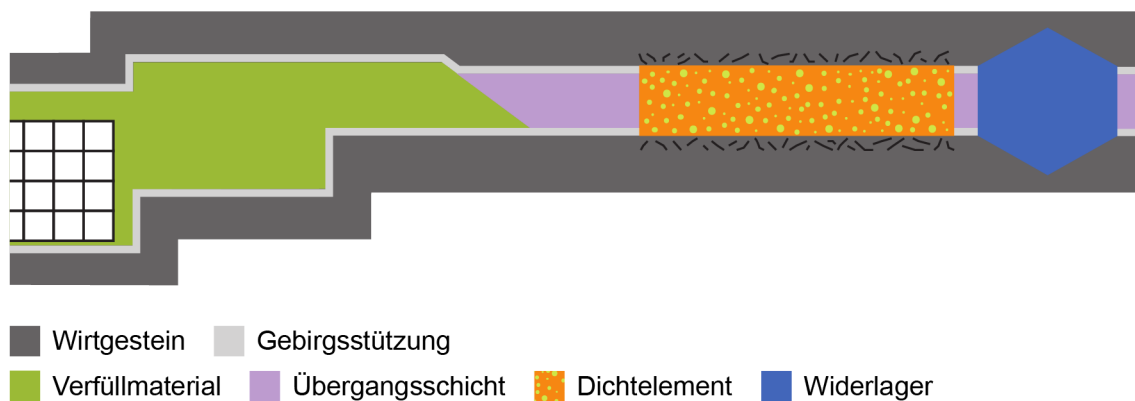


Fig. 4-4: Konzeptionelle Darstellung der Versiegelung einer SMA Lagerkaverne
Weiterführende Details zum Versiegelungskonzept sind in Nagra (2021c) zu finden.

4.5.4 Temporärer Verschluss

Vor Beginn des Einlagerungsbetriebs ist zudem die Funktionstüchtigkeit eines temporären Verschlusses nachzuweisen (Nagra 2021c). Dazu wird mit dem Baugesuch ein Konzept zum temporären Verschluss eingereicht. Die Realisierung eines temporären Verschlusses wird vor Einlagerungsbeginn demonstriert werden. Dazu wird derzeit ein Versuchstollen in den BEUU oder an einer anderen geeigneten Stelle vorgesehen.

4.6 Dokumentation und Datenmanagement

Die in den EUU begonnenen Messreihen für das Langzeit-Monitoring müssen zum Teil über einen Zeitraum von vielen Jahrzehnten fortgeführt geführt werden und konsistent aufbereitet werden. Während der EUU und späteren Betriebsphasen gewonnene Daten werden dazu in einer Datenbank erfasst und abgelegt werden. Dies inkludiert die Daten der Experimente sowie des unterirdischen Monitorings. Damit wird sichergestellt, dass Daten jeweils mit den korrekten Metadaten verknüpft wird. Weiterhin kann so eine lückenlose Dokumentation der installierten Sensorik und insbesondere Änderungen der Instrumentierungen über die Betriebsjahre dokumentiert und bewahrt werden. Die gewonnenen Daten aus den EUU werden gemäss Art. 72 KEV dem Bund zur Verfügung gestellt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der geologische Untergrund wurde in den drei Etappen des SGT von der Oberfläche aus eingehend untersucht, und 2022 wird darauf basierend ein Standort für ein gTL vorgeschlagen. Die EUU bilden den Abschluss der erdwissenschaftlichen Untersuchungen für die Realisierung eines gTL. Sie sollen die bis dann gewonnene Erkenntnisse über die sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Wirtgesteins bestätigen und somit den Sicherheitsnachweis standortspezifisch erhärten. Weiterhin müssen sicherheitsrelevante Technologien für die Einlagerung und Rückholung von Abfällen demonstriert werden.

Dieser Bericht legt in einem Konzept dar, welche Infrastruktur für die Umsetzung der EUU notwendig ist, und erläutert in einem beispielhaften Arbeitsprogramm, wie die Ziele der EUU erreicht werden können. Das vorliegende standortunabhängige EUU-Konzept stellt einen Hintergrundbericht zum Entsorgungsprogramm 2021 (Nagra 2021a) dar und beantwortet damit die Bundesratsaufgabe 5.6 (Anhang A) zum Entsorgungsprogramm 2016 (Bundesrat 2018).

Für die Umsetzung der EUU ist eine umfangreiche Infrastruktur zu erstellen, bestehend aus oberirdischen Anlagen, notwendig für den Betrieb der Zugangsbauwerke, sowie der unterirdischen Bauten. In den BEUU werden die meisten der erdwissenschaftlichen Untersuchungen und Experimente sowie die geforderten Demonstrationen durchgeführt. Für deren sicheren Betrieb sind weitere Anlagen auf Lagerebene zu erstellen.

Aus der in Felslaboren gewonnenen Erfahrung wurde die notwendige Dauer für die spezifischen durchzuführenden Experimente abgeschätzt und in einem Zeitplan für die EUU integriert. Dabei wird von Messdauern von bis zu fünf Jahren für einzelne Experimente ausgegangen.

Im hier vorgestellten beispielhaften Arbeitsprogramm sind folgende Aktivitäten vorgesehen:

- vortriebsbegleitende Erkundung während des Baus der Zugangsbauwerke sowie beim Vortrieb auf Lagerebene (Kartierung, Probennahme, Einrichtung von Messstellen)
- Experimente zur standortspezifischen Erhärtung des Sicherheitsnachweises (Gastransportkapazität in der EDZ sowie intaktem Wirtgestein, Selbstabdichtung, Ausdehnung der EDZ, thermischer Einfluss, Diffusions- und Retentionsverhalten)
- Demonstrationen der sicherheitsrelevanten Technologien (Einbringen und Verfüllen, Rückholung, Versiegelung und temporärer Verschluss)

Das hier vorgestellte Konzept basiert auf dem aktuellen Stand des Nagra RD&D-Programms. Neue Entwicklungen im Bereich der Mess- und Vortriebstechnik sowie bei der Nachweisführung zur Langzeitsicherheit werden weiterverfolgt. Diese werden in zukünftige Präzisierungen im Rahmen der Vorbereitung der EUU einfließen. Für standortunabhängige Entwicklungen, Versuche und Experimente wird das Nagra RD&D-Programm parallel zu den EUU weitergeführt.

6 Literaturverzeichnis

- BFE (2008): Sachplan Geologische Tiefenlager: Konzeptteil. BFE 2. April 2008 (Revision vom 30. November 2011). UVEK, Bern.
- Bundesrat (2018): Verfügung zum Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen. Schweizerischer Bundesrat.
- EKRA (2000): Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle: Schlussbericht. Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle. Im Auftrag des Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation.
- ENSI (2018): Präzisierungen der sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager. Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 3. ENSI 33/649. ENSI, Brugg.
- Fanger, L.; Müller, H.; Vogt, T. (2021): Konzeptbericht Überwachung Umwelt und geologisches Umfeld. Nagra Arbeitsbericht. NAB 20-28.
- Leupin, O.X., Smith, P., Marschall, P., Johnson, L., Savage, D., Cloet, V., Schneider, J. & Senger, R. (2016): High-level waste repository-induced effects. Nagra Technischer Bericht NTB 14-13.
- Müller, H., Garitte, B., Vogt, T., Köhler, S., Sakaki, T., Weber, H.P., Spillmann, T., Hertrich, M., Becker, J.K., Giroud, N., Cloet, V., Diomidis, N. & Vietor, T. (2017): Implementation of the Full-Scale Emplacement (FE) Experiment at the Mont Terri rock laboratory. In: Swiss Journal of Geosciences, Special Issue: Mont Terri rock laboratory, 20 years of research 110, S. 287-306.
- Nagra (2014): Konzepte der Standortuntersuchungen für SGT Etappe 3. Nagra Arbeitsbericht NAB 14-83.
- Nagra (2016a): Generische Beschreibung von Schachtkopfanlagen (Nebenzugangsanlagen) geologischer Tiefenlager. Nagra Technischer Bericht NTB 16-08.
- Nagra (2016b): Konzepte der Standortuntersuchungen für SGT Etappe 3 – Nördlich Lägern. Nagra Arbeitsbericht NAB 16-28.
- Nagra (2016c): Projektkonzepte für die Lagerkammern und Versiegelungsstrecken und deren Bewertung: ENSI-Nachforderung zum Indikator "Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit" in SGT Etappe 2. Nagra Arbeitsbericht. NAB 16-45.
- Nagra (2019a): Implementation of the Full-scale Emplacement Experiment at Mont Terri: Design, Construction and Preliminary Results. Nagra Technical Report NTB 15-02.
- Nagra (2019b): Vorschläge zur Konkretisierung der Oberflächeninfrastruktur der geologischen Tiefenlager. Teil 1: Einführung und Grundlagen. Nagra Arbeitsbericht NAB 19-08 Teil 1.
- Nagra (2020): Standortunabhängiger Vergleich eines Kombilagers mit zwei Einzellagern hinsichtlich Bau- und Betriebsabläufe sowie Umwelt. Nagra Arbeitsbericht. NAB 19-15.

Nagra (2021a): Entsorgungsprogramm 2021 der Entsorgungspflichtigen. Nagra Technischer Bericht NTB 21-01.

Nagra (2021b): The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland. Nagra Technical Report NTB 21-02.

Nagra (2021c): Versiegelung und Verschluss des geologischen Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 21-12.

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

Schaub, Y. (2019): Konzept zur frühzeitigen Einreichung von RBG-Referenzberichten an das ENSI. Nagra Arbeitsbericht. NAB 19-48.

Anhang A: Beantwortung der Bundesratsaufgabe 5.6 für das Entsorgungsprogramm 2021

Die Nagra hat bei der Aktualisierung des Entsorgungsprogramms die Anforderungen für die verschiedenen Nutzungsphasen der Bauten für erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag darzulegen. Zudem hat sie die Art und den Zeitplan der vorgesehenen technischen Nachweise für eine spätere Umnutzung zu erläutern.

Die Nagra hat in Zusammenhang mit der Bundesratsaufgabe 5.6 einen Hintergrundbericht zum EP21 (Nagra 2021c) erstellt. In diesem Bericht wird das derzeitige Konzept für EUU stufengerecht dargelegt und es wird auf die Auflage eingegangen.

Die erdwissenschaftlichen Untersuchungen der Nagra erhärten die Datengrundlage für die Beurteilung der Langzeitsicherheit sowie für die Planung und Projektierung des geologischen Tiefenlagers. Durch die EUU werden die notwendigen standortspezifischen Informationen für die Erarbeitung des nuklearen Baubewilligungsgesuchs, zur standortspezifischen Erhärtung des Sicherheitsnachweises und zur Vorbereitung und Optimierung des Lagerbaus geschaffen.

Für die Realisierung der EUU bedarf es einer umfangreichen Infrastruktur bestehend aus oberirdischen Anlagenteilen, Zugangsbauwerken und zweckbestimmten Experiment- bzw. Demonstrationsbereichen. Alle Zugangsbauwerke und Zugangstunnel werden in der Phase "Bau und Beginn EUU" ausgehend vom Areal der geplanten Nebenzugangsanlage des späteren geologischen Tiefenlagers erstellt und so ausgelegt, dass sie umgenutzt und in das geologische Tiefenlager integriert werden können.

Die Anforderungen an die Infrastruktur für EUU und insbesondere für die Bauten für EUU (BEUU) werden von verschiedenen Treibern bestimmt. So sind für die Betriebssicherheit z.B. zwei getrennte Zugänge nach untertag zu erstellen. Für die Langzeitsicherheit sind die Bauten so auszuführen, dass sie die Eignung des Standortes für ein gTL nicht beeinträchtigen. Weiterhin sind die Bauten so anzulegen, dass sie die notwendigen Untersuchungen zur standortspezifischen Erhärtung des Sicherheitsnachweises ermöglichen. Dazu müssen die Experimente in ungestörten Bereichen durchgeführt werden und die gewonnenen Erkenntnisse auf die Lagerfelder übertragbar sein. Schliesslich müssen die Ergebnisse der EUU in die Erstellung der nuklearen Bau- und Betriebsgesuche berücksichtigt werden können.

In der Phase "Weiterführung EUU" ist vorgesehen, zur Erbringung der Sicherheitsnachweise für die Lagerkammern die sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Wirtgesteins bezüglich des mechanischen Systemverhaltens, der Selbstabdichtung, des thermischen Impakts, der Gas-transportkapazität sowie des Diffusions- und Retentionsverhaltens vertieft zu untersuchen. Zur Gewinnung von belastbaren Messreihen sind von Laufzeiten dieser Experimente von bis zu 5 Jahren auszugehen.

Weiter wird die Erstellung von Lagerstollen und -kavernen demonstriert, sowie die Funktionsfähigkeit der sicherheitsrelevanten Technologien zur Einlagerung inklusive Einbringung des Verfüllmaterials, das Entfernen des Verfüllmaterials und der Rückholung aufgezeigt, sofern die für das nukleare Baugesuch erforderlichen Nachweise nicht in überirdischen Anlagen erbracht werden können. Schliesslich wird auch die Versiegelung in den Demonstrationsbauwerken erprobt und deren Funktionsfähigkeit nachgewiesen.

Die Vorgaben an die Unterlagen für das nukleare Bau- und Betriebsbewilligungsgesuch (Anhang IV KEV) sehen eine Hierarchisierung der Unterlagen vor (Hierarchiestufen H1 – H4).

Durch die Differenzierung zwischen den Stufen H1 und H2 nach KEV steht ausreichend Zeit zur Durchführung der EUU zur Verfügung. Die Experimente können parallel ablaufen und Experimente, die eine mehrjährige Laufzeit zum Erbringen des Sicherheitsnachweises benötigen, werden bereits in der Phase "Bau und Beginn EUU" gestartet. Die Überführung der BEUU in die Testbereiche beinhaltet im Wesentlichen ein Änderungsantrag weg von der Durchführung von erdwissenschaftlichen Untersuchungen und hin zur Umnutzung und Betrieb der Testbereiche als Bestandteil einer kerntechnischen Anlage.

Anhang B: Einbettung in das Realisierungsprogramm gemäss EP21

Tab. B-1: Zusammenfassung eines möglichen Programms für erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag und damit verbundener Phasen.

Ziele der Aktivitäten: (C) Charakterisierung der geologischen Situation, (B) Eignungsbestätigung hinsichtlich vorgängiger Annahmen und Parameter, (Ü) Überwachung, (D) Demonstration

Phase	Zeitperiode	Tätigkeit	Wichtigste Aktivitäten mit zugehörigen Zielen	Situation untertag
Rahmenbewilligung	2029 – 2031	Sondierbohrung am Schachtstandort	Charakterisierung der geologischen Situation für den Bau der Zugangsbauwerke EUU (C)	Bohren
Vorbereitung EUU	2032 – 2034	Bauvorbereitung	Keine Aktivität untertag	
Bau und Beginn EUU	2035 – 2039	Begleitende Charakterisierung bei der Erstellung Zugang untertag, zentraler Bereich und BEUU	- Charakterisierung während Bau der Zugangsbauwerke EUU, zentraler Bereich und BEUU (C) - Charakterisierung der geologischen Situation untertag auf Lagerebene inklusive räumlicher Variabilität (C, B) - Überwachung unter In-situ-Bedingungen (Ü)	Bau

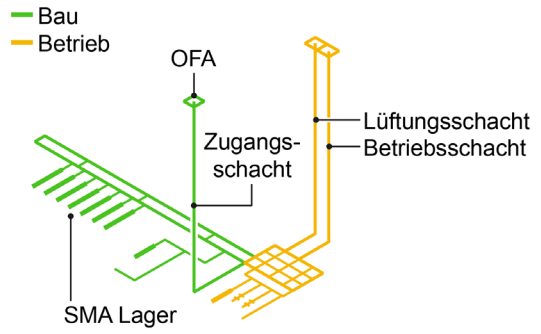
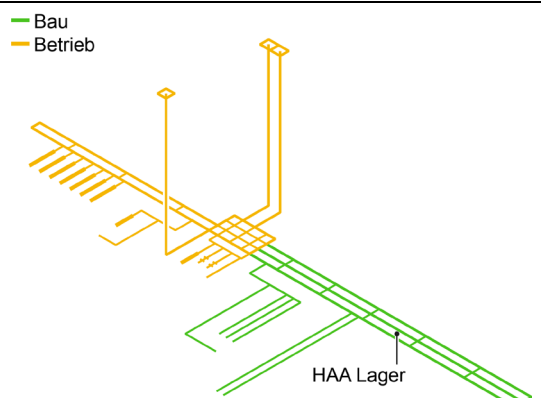
Tab. B-1: Fortsetzung

Phase	Zeitperiode	Tätigkeit	Wichtigste Aktivitäten mit zugehörigen Zielen	Situation untertag
Bau und Beginn EUU	2038	Beginn erster Experimente im Rahmen erster Bauten für erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag	• Beginn von Experimenten zur Bestätigung felsmechanischer Parameter und Eignung technischer Elemente im Hinblick auf den Bau des gTL (C, B) • Beginn Experimente zur Selbstabdichtung und Gastransport über Auflockerungszone und Wirtgestein (B) • Beginn Experimente zur Nuklid Migration (B) • Überwachung unter In-situ-Bedingungen (Ü)	— Bau NZA Lüftungsschacht EUU Betriebsschacht EUU HEB BEUU

Tab. B-1: Fortsetzung

Phase	Zeitperiode	Tätigkeit	Wichtigste Aktivitäten mit zugehörigen Zielen	Situation untertag
Weiterführung EUU SMA & HAA	2040 – 2044	Weiterführung von Experimenten in Bauten für erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag im Hinblick auf die nukleare Bau-bewilligungen SMA & HAA	• Fortführung laufender Experimente (B) • Untersuchung der EDZ (B) • Auswirkungen Wärmeeintrag auf Wirtgestein (B) • Überwachung unter In-situ-Bedingungen (Ü) • Demonstration der Einlagerung (inkl. Einbringen des Verfüllmaterials) und Rückholung der Abfallgebinde SMA (D) • Demonstration der SMA Versiegelung (D)	— Betrieb
Bau Lager SMA	2045 – 2049	Bau Lagerteil SMA	• Vortriebsbegleitende Erkundung und Charakterisierung (C) • Überwachung unter In-situ-Bedingungen (Ü)	— Bau — Betrieb

Tab. B-1: Fortsetzung

Phase	Zeitperiode	Tätigkeit	Wichtigste Aktivitäten mit zugehörigen Zielen	Situation untertag
Weiterführung EUU HAA	2045 – 2054	Weiterführung von Experimenten in Bauten für erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag im Hinblick auf die nukleare Bau-bewilligung HAA	- Fortführung von Experimenten zur Eignungsbestätigung für HAA (B) - Überwachung unter In-situ-Bedingungen (Ü) - Demonstration der Einlagerung (inkl. Einbringen des Verfüllmaterials) und Rückholung der Abfallgebinde HAA (D) - Demonstration der HAA Versiegelung (D)	 — Bau — Betrieb OFA Zugangsschacht Lüftungsschacht Betriebsschacht SMA Lager
Bau Lager HAA	2055 – 2059	Bau Lagerteil HAA	- Vortriebsbegleitende Erkundung und Charakterisierung (C) - Überwachung unter In-situ-Bedingungen (Ü) - Evtl. Fortführung von Langzeitexperimenten	 — Bau — Betrieb HAA Lager

Anhang C: Zusammenstellung der Vorgaben in Gesetzen, Verordnungen und behördlichen Dokumenten für die Realisierung der erdwissenschaftlichen Untersuchungen untertag

Tab. C-1: Vorgaben und Hinweise in Gesetzen sowie in behördlichen Dokumenten und geplante Massnahmen zu deren Erfüllung im Rahmen der EUU

Das Konzept zu den EUU als Hintergrundbericht zum Entsorgungsprogramm 2021 wurde auf Grundlage der bestehenden Gesetzgebung mit Stand 1. Januar 2021 erstellt.

Referenz	Anforderung	Geplante Massnahmen
Art. 35 Abs. 1 KEG	Erdwissenschaftliche Untersuchungen in möglichen Standortregionen, die dazu dienen, Kenntnisse im Hinblick auf ein geologisches Tiefenlager zu verschaffen, bedürfen einer Bewilligung des Departements.	Nach Rahmenbewilligung wird ein Gesuch für die EUU eingereicht, dass die notwendigen Infrastrukturen sowie das erdwissenschaftliche Programm detailliert beschreibt (Abschnitt 3.1).
Art. 35 Abs. 2a KEG	Die Bewilligung wird erteilt, wenn die geplanten Untersuchungen geeignet sind, die erforderlichen Grundlagen für die spätere Beurteilung der Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers zu erbringen, ohne die Eignung eines Standortes zu beeinträchtigen.	Die EUU und die dazu benötigten Bauten werden so ausgeführt, dass keine der Langzeitsicherheit abträglichen Sachzwänge geschaffen werden (Kapitel 2).
Art. 41 Abs. 1 KEG	Rohdaten und Ergebnisse, die aus den erdwissenschaftlichen Untersuchungen und während des Baus eines geologischen Tiefenlagers gewonnen wurden, sind dem Bund auf Verlangen unentgeltlich abzugeben.	Die gewonnenen Daten aus den EUU werden in einer Datenbank archiviert und werden dem Bund zur Verfügung gestellt (Abschnitt 4.6).
Art. 65 Abs. 1 KEV	In den Testbereichen sind die sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Wirtgesteins zur Erhärtung des Sicherheitsnachweises standortspezifisch vertieft abzuklären.	Die sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Wirtgesteins werden in einem wissenschaftlichen Programm begleitend zum Vortrieb als auch in spezifischen Bereichen untersucht werden. Diese spezifischen Bereiche werden mit der Baubewilligung zu den Testbereichen des gTL umgenutzt (Abschnitt 4.3, 4.4).

Tab. C-1: Fortsetzung

Referenz	Anforderung	Geplante Massnahmen
Art. 65 Abs. 2 KEV	Vor Inbetriebnahme des Tiefenlagers sind die sicherheitsrelevanten Techniken zu erproben und deren Funktionstüchtigkeit nachzuweisen. Das betrifft insbesondere: a) das Einbringen des Verfüllmaterials b) das Entfernen des Verfüllmaterials zwecks allfälliger Rückholung von Abfallgebinden c) die Technik zur Rückholung von Abfallgebinden	Es ist vorgesehen die technischen Verfahren zur Verfüllung and allfälligen Rückholung unter gTL Bedingungen in den Testbereichen zu demonstrieren (Abschnitt 4.5.1, 4.5.2).
Art. 65 Abs. 3 KEV	Während des Betriebs des Tiefenlagers ist die Versiegelung von Kavernen und Stollen zu erproben und deren Funktionstüchtigkeit nachzuweisen.	Es ist vorgesehen die Technologien zur Versiegelung zu demonstrieren. Der Nachweis der Funktionstüchtigkeit erfolgt kombiniert mit repräsentativen Laborversuchen in verringertem räumlichem und zeitlichem Massstab. (Abschnitt 4.5.3).
Art. 72 Abs. 1 KEV	Die aus erdwissenschaftlichen Untersuchungen oder während des Baus eines geologischen Tiefenlagers gewonnenen erdwissenschaftlichen Daten sind der geologischen Informationsstelle des Bundes zu übermitteln.	Die gewonnenen Daten aus den EUU werden in einer Datenbank archiviert und werden dem Bund zur Verfügung gestellt (Abschnitt 4.6).
Art. 7.1 Abs. a ENSI-G03	Erdwissenschaftliche Untersuchungen sind so durchzuführen, dass belastbare Aussagen zur Betriebs- und Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers getroffen werden können.	Die im Rahmen der EUU geplanten Charakterisierung und Experimente werden unter strengen wissenschaftlichen Standards durchgeführt. Es werden genügend lange Messreihen durchgeführt sowie geeignete Bereiche für diese Untersuchungen ausgewählt, sodass sich belastbare Aussagen ergeben werden (Abschnitt 4.4).

Tab. C-1: Fortsetzung

Referenz	Anforderung	Geplante Massnahmen
Art. 7.1 Abs. b ENSI-G03	Erdwissenschaftliche Untersuchungen sind so durchzuführen, dass sie die Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers nicht beeinträchtigen. Die Schädigung des Untergrunds ist auf das für den Erkenntnisgewinn notwendige Minimum zu beschränken.	Alle Arbeiten zu den EUU werden von Lagerfeldern räumlich und durch spätere Siegel getrennt durchgeführt. Es werden Sicherheitsabstände zu den Lagerfeldern eingehalten. Die Schädigung des Wirtgestein wird auf ein Minimum reduziert (Abschnitt 2.2).
Art. 7.1 Abs. c ENSI-G03	Ein ausreichender Sicherheitsabstand zwischen sicherheitsrelevanten Anlageteilen des Tiefenlagers und untertägigen Bauwerken oder Sondierbohrungen, die im Rahmen erdwissenschaftlicher Untersuchungen erstellt wurden, ist nachzuweisen. Der Nachweis ist mit dem Baugesuch einzureichen.	
Art. 7.4.2 Abs. b ENSI-G03	Mit dem Baugesuch ist das Konzept zur allfälligen Rückholung der radioaktiven Abfälle zu konkretisieren und ein Projekt zur Demonstration der Rückholungstechnik in den Testbereichen zu erstellen.	Parallel zu den EUU werden die Konzepte zur Rückholung in ober-tägigen Versuchsständen entwickelt und erprobt werden. In den Testbereichen werden entsprechende Bauten für diese technischen Demonstrationen vorgesehen (Abschnitt 2.2.3, 2.2.4).
Art. 7.5 Abs. c ENSI-G03	Das Funktionieren der Vorkehrungen für einen temporären Verschluss ist in den Testbereichen vor Einlagerung der Abfälle nachzuweisen.	Demonstrationen des temporären Verschlusses werden entsprechend des Verschlusskonzeptes in den Testbereichen durchgeführt (Abschnitt 4.5.4)