



TECHNISCHER BERICHT 24-03

Rahmenbewilligungsgesuch für das
geologische Tiefenlager –
Begründung der Standortwahl

Mai 2025



TECHNISCHER BERICHT 24-03

Rahmenbewilligungsgesuch für das
geologische Tiefenlager –
Begründung der Standortwahl

Mai 2025

Die Unterlagen zum Rahmenbewilligungsgesuch für ein geologisches Tiefenlager (RBG gTL) finden Sie digital auf drbg.ch.

Fragen an die Nagra, die sich aus der Begutachtung des RBG ergeben, werden im Nagra Arbeitsbericht NAB 26-01 sowie auf drbg.ch beantwortet.

ISSN 1015-2636

Copyright © 2024 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.

Zweck

Die Nagra beantragt eine Rahmenbewilligung für ein geologisches Tiefenlager mit der Oberflächenanlage am Standort Haberstal (Gemeinde Stadel, Kanton Zürich). Beim vorliegenden Dokument handelt es sich um den gemäss Art. 62 KEV und ENSI 33/649 erforderlichen Bericht zur Standortwahl. Der Bericht enthält einen Vergleich der zur Auswahl stehenden Standortoptionen hinsichtlich der Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers sowie eine Bewertung der für die Standortwahl ausschlaggebenden Eigenschaften.

Zusammenfassung

Die Nagra beantragt eine Rahmenbewilligung für ein geologisches Tiefenlager mit der Oberflächenanlage am Standort Haberstal, innerhalb des Standortgebietes **Nördlich Lägern**. Die Standortwahl ist das Ergebnis des Sachplanverfahrens, in welchem die potenziellen Standortgebiete vertieft untersucht wurden. Diese Untersuchungen haben eindeutige qualitative Unterschiede für die Langzeitsicherheit ergeben. Für die Wahl ausschlaggebend sind folgende Eigenschaften:

- **Die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist am grössten:**

In Nördlich Lägern ist die vertikale Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und insbesondere die Distanz von der Lagerebene zum nächstliegenden Aquifer oberhalb des Opalinustons am grössten.

- **Die hydrogeologischen Bedingungen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sind am günstigsten:**

In Nördlich Lägern sind die hydrogeologischen Verhältnisse besonders stagnierend und darum besonders geeignet für die langfristige Isolation durch die geologische Barriere.

- **Die geologische Situation im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ist am einfachsten:**

In Nördlich Lägern sind die Gesteine am ruhigsten gelagert, und zu tektonischen Störungszonen kann bei der Anordnung des geologischen Tiefenlagers besonders gut Abstand eingehalten werden.

- **Der Schutz vor Erosion ist am besten:**

Nördlich Lägern erweist sich in einer systematischen Betrachtung zukünftiger Erosion als der Standort mit der grössten Sicherheitsmarge.

Die Bewertung der sicherheitstechnischen Kriterien des Sachplans zeigt:

Nördlich Lägern ist **das beste Standortgebiet der Schweiz** für ein geologisches Tiefenlager.

Es ist das Standortgebiet mit der besten Qualität der geologischen Barriere, der grössten Stabilität gegenüber zukünftigen Veränderungen sowie der grössten Flexibilität.

Abstract

Nagra is applying for a general licence for a deep geological repository in the **Nördlich Lägern** siting region with the site of the surface facility at Haberstal. This siting region has been selected as a result of the Sectoral Plan process, in which potential sites were investigated in great detail. These investigations have shown clear qualitative differences with regard to post-closure safety. The following properties are decisive for the site selection:

- **Greatest thickness of the containment-providing rock zone:**

In Nördlich Lägern, the vertical extent of the containment-providing rock zone and, in particular, the distance from the disposal level to the nearest aquifer overlying the Opalinus Clay is greatest.

- **Most favourable hydrogeological conditions of the containment-providing rock zone:**

In Nördlich Lägern, the hydrogeological conditions are particularly stagnant, which makes them especially suitable for long-term confinement by the geological barrier.

- **Most straightforward geological situation in the containment-providing rock zone:**

In Nördlich Lägern, the rocks are the most quietly bedded, and a safe distance can be well maintained from tectonic fault zones when designing the deep geological repository.

- **Best protection against erosion:**

In a systematic analysis with regard to future erosion, Nördlich Lägern emerges as the site with the greatest safety margin.

The evaluation of the safety-based criteria of the Sectoral Plan shows:

Nördlich Lägern is **the most suitable siting region in Switzerland** for a deep geological repository.

This siting region offers the highest quality of the geological barrier, the greatest stability in terms of future changes, and the greatest flexibility.

Résumé

La Nagra demande une autorisation générale pour la réalisation d'un dépôt en couches géologiques profondes avec les installations de surface correspondantes sur le site du Haberstal, dans la région d'implantation du **Nord des Lägern**. Le choix de ce site résulte de la procédure du plan sectoriel, dans le cadre de laquelle les sites potentiels ont fait l'objet d'investigations approfondies. Ces investigations ont mis en évidence de nettes différences concernant la sûreté à long terme. Les caractéristiques suivantes ont été déterminantes pour ce choix :

- **L'épaisseur de la zone de confinement géologique est la plus importante :**

C'est dans le Nord des Lägern que l'extension verticale de la zone de confinement géologique est la plus grande, et notamment la distance entre le niveau du dépôt en profondeur et l'aquifère le plus proche au-dessus de l'argile à Opalinus.

- **Les conditions hydrogéologiques de la zone de confinement géologique sont les plus favorables :**

Dans le Nord des Lägern, les circulations d'eau sont particulièrement faibles, ce qui en fait un milieu particulièrement favorable pour le confinement à long terme par la barrière géologique.

- **La situation géologique de la zone de confinement géologique est la plus simple :**

C'est dans le Nord des Lägern que les couches géologiques sont les plus stables. De plus, le dépôt en couches géologiques profondes peut être placé en restant toujours à bonne distance des zones de failles tectoniques.

- **La protection contre l'érosion est la plus importante :**

Le Nord des Lägern s'avère être le site avec la plus grande marge de sécurité concernant l'érosion de surface à long terme.

L'évaluation des critères de sûreté du plan sectoriel montre clairement :

Le Nord des Lägern est **la meilleure région d'implantation de Suisse** pour un dépôt en couches géologiques profondes.

C'est la région d'implantation avec la barrière géologique la plus efficace, la plus grande stabilité face aux changements à venir et la plus grande flexibilité pour le placement du dépôt en couches géologiques profondes.

Inhaltsverzeichnis

Zweck	I
Zusammenfassung.....	II
Abstract	III
Résumé	IV
Inhaltsverzeichnis.....	V
1 Einleitung	1
1.1 Ziel.....	1
1.2 Aufbau des Berichts.....	1
2 Überblick über das Standortwahlverfahren	3
2.1 Eckpunkte des Standortwahlverfahrens gemäss SGT.....	3
2.2 Ergebnisse der SGT-Etappen 1 und 2.....	5
3 Vorgaben an die Standortwahl in SGT-Etappe 3	7
3.1 Präzisierung der sicherheitstechnischen Vorgaben an die SGT-Etappe 3 des ENSI.....	7
4 Vorgehen bei der Standortwahl und Grundlagen für den Standortvergleich.....	9
4.1 Vertiefung der geologischen Kenntnisse mittels erdwissenschaftlicher Untersuchungen.....	9
4.2 Überprüfung der Grundlagen zu den Tiefenlagern.....	12
4.3 Definition der Bewertungsobjekte.....	14
4.4 Sicherheitsanalysen für den Standortvergleich.....	17
4.5 Qualitative Bewertung der EG anhand der 13 SGT-Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit	18
5 Ergebnisse des Standortvergleichs	19
5.1 Bestätigung der Eignung aller Standortgebiete	19
5.2 Begründung der Standortwahl von Nördlich Lägern für HAA und für SMA	21
5.3 Ein Lager für alle Abfalltypen der Schweiz	27
6 Literaturverzeichnis	29
Figurenverzeichnis.....	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	VIII

1 Einleitung

1.1 Ziel

Mit der Rahmenbewilligung wird der Standort des geologischen Tiefenlagers festgelegt (vgl. Art. 14 KEG (2003)). Voraussetzung für eine Rahmenbewilligung ist, dass der Schutz von Mensch und Umwelt sichergestellt werden kann (vgl. Art. 13 Abs. 1 Bst. a KEG (2003)). Der Opalinuston in der Region der Nordschweiz erfüllt diese Anforderungen in der Schweiz besonders gut. Deshalb hat der Bundesrat entschieden (BFE 2018), dass in der letzten Etappe des Sachplanverfahrens nur noch die geologischen Standortgebiete Jura Ost (JO), Nördlich Lägern (NL) und Zürich Nordost (ZNO) zur Auswahl für ein geologisches Tiefenlager stehen.

Auf Basis umfangreicher erdwissenschaftlicher Untersuchungen hat die Nagra entschieden, ein Rahmenbewilligungsgesuch (RBG) für ein geologisches Tiefenlager mit der Oberflächenanlage am Standort Haberstal (Gemeinde Stadel) im geologischen Standortgebiet Nördlich Lägern auszuarbeiten. Im vorliegenden Bericht wird die Standortwahl begründet (vgl. Art. 62 KEV (2004)). Er enthält einen Vergleich der zur Auswahl stehenden Standortoptionen hinsichtlich der Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers sowie eine Bewertung der für die Standortwahl ausschlaggebenden Eigenschaften (vgl. Art. 62 KEV (2004)).

1.2 Aufbau des Berichts

Die Kernpunkte des Standortwahlverfahrens sowie der bereits abgeschlossenen Etappen 1 und 2 des Sachplans geologische Tiefenlager werden in Kap. 2 rekapituliert.

Kap. 3 enthält die Vorgaben an die Standortwahl in Etappe 3.

Das Vorgehen der Nagra bei der Standortwahl und die Grundlagen für den Standortvergleich werden in Kap. 4 dargelegt.

Die Ergebnisse des Standortvergleichs und die Begründung der Standortwahl ist Inhalt von Kap. 5.

2 Überblick über das Standortwahlverfahren

Eine sichere Entsorgung der radioaktiven Abfälle in einem geologischen Tiefenlager in der Schweiz ist grundsätzlich gewährleistet. Dies hat der Bundesrat mit der Gutheissung des Entsorgungsnachweises für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) im Jahr 1988 und für hochaktive Abfälle (HAA) 2006 bestätigt. Mit der Gutheissung des HAA-Entsorgungsnachweises hat der Bundesrat auch verlangt, dass die sichere Entsorgung von radioaktiven Abfällen an einem konkreten Standort unabhängig vom Entsorgungsnachweis stufenweise im kernenergierechtlichen Bewilligungsverfahren nachgewiesen werden muss. Basierend auf dem Kernenergiegesetz (KEG 2003) und der Kernenergieverordnung (KEV 2004) hat der Bundesrat 2008 dazu den Sachplan geologische Tiefenlager (SGT) erstellt (BFE 2008).

Die nächsten Abschnitte fassen die für die Standortwahl wesentlichen Eckpunkte des SGT-Verfahrens (Kap. 2.1) und die Ergebnisse der bereits abgeschlossenen Etappen 1 und 2 (Kap. 2.2) zusammen.

2.1 Eckpunkte des Standortwahlverfahrens gemäss SGT

Der SGT legt im Konzeptteil (BFE 2008) die Sachziele des Bundes sowie Kriterien und Verfahren fest, nach denen Standorte für geologische Tiefenlager für alle Abfallkategorien in der Schweiz ausgewählt werden. Ergänzend zum Konzeptteil enthält der SGT die etappenweise aufdatierten Ergebnisberichte und Objektblätter. Darin werden die Planungssperimeter der Regionen und die Standorte für geologische Tiefenlager nach jeder Etappe bezeichnet. Oberste Priorität hat die Sicherheit; der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt muss sichergestellt werden. Dazu ist der Einschluss und die Rückhaltung der radioaktiven Stoffe so lange sicherzustellen, bis die Radiotoxizität durch Zerfall genügend abgeklungen ist. Der Sicherheit nachgeordnet sind Aspekte der Raumnutzung, Ökologie, Wirtschaft und Gesellschaft.

Kriterien

Die Kriterien (Kr), die der SGT zur Auswahl der Standorte vorgibt, adressieren die Langzeitsicherheit und die technische Machbarkeit (Fig. 2-1). Die dabei zu beurteilenden Aspekte sind ebenfalls im Konzeptteil des SGT festgehalten (vgl. Anhang I, BFE 2008):

Für die Langzeitsicherheit günstig sind räumliche Verhältnisse, in denen der einschlusswirksame Gebirgsbereich (EG) derart beschaffen und ausgedehnt ist, dass die Radionuklide grösstenteils darin zurückgehalten werden (Kr 1.1). Dazu werden Gesteine gesucht mit limitierter Wasserzirkulation (Kr 1.2), mit zur Rückhaltung beitragenden geochemischen Bedingungen (Kr 1.3) und einer Beschaffenheit, welche die Radionuklidfreisetzung verzögert (Kr 1.4). Günstig sind weiter Situationen, in denen die erforderliche Barrierewirkung auch in Anbetracht geologischer Prozesse (Kr 2.1) oder Erosion (Kr 2.2) langfristig gewährleistet bleibt. Zudem wird eine Situation gesucht, in der die Langzeitstabilität des Barrierensystems gegenüber lagerbedingten Prozessen (Kr 2.3) sowie einer möglichen Nutzung von natürlichen Ressourcen (Kr 2.4) bestmöglich gewährleistet werden kann. Die Aussagen zur Barrierewirkung müssen auch in Anbetracht der langen zu betrachtenden Zeiträume (1 Mio Jahre für HAA) zuverlässig sein. Vorteilhaft sind deshalb eine möglichst geringe Variabilität der sicherheitstechnischen Eigenschaften des EG (Kr 3.1), einfache und von der Oberfläche aus gut explorierbare räumliche geologische Verhältnisse (Kr 3.2) und Situationen, die eine zuverlässige Prognose der sicherheitsrelevanten Eigenschaften und der Geometrie des EG über die erforderlichen Zeiträume zulassen (Kr 3.3). Bautechnisch beherrschbare Verhältnisse für den Bau, Betrieb, Überwachung und Verschluss des geologischen Tiefenlagers müssen zudem auf Lagerebene (Kr 4.1) und für die Zugangsbauwerke (Kr 4.2) gegeben sein.

Kriteriengruppe	Kriterien
1. Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches	1.1 Räumliche Ausdehnung 1.2 Hydraulische Barrierenwirkung 1.3 Geochemische Bedingungen 1.4 Freisetzungspfade
2. Langzeitstabilität	2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften 2.2 Erosion 2.3 Lagerbedingte Einflüsse 2.4 Nutzungskonflikte
3. Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen	3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine 3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse 3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen
4. Bautechnische Eignung	4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen 4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung

Fig. 2-1: Die Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit gemäss SGT (BFE 2008)

Verfahren

Das Standortwahlverfahren umfasst drei Etappen, in denen die Auswahl der Standortgebiete schrittweise eingeeignet wird:

Etappe 1 diente der Auswahl von geologischen Standortgebieten je für SMA und HAA nach vorgegebenen Einengungsschritten: Von geologisch geeigneten Grossräumen in der ganzen Schweiz über bevorzugte Wirtgesteine in geeigneter geologischer Konfiguration hin zur Abgrenzung möglicher Standortgebiete je für SMA und HAA.

In **Etappe 2** wurde die Auswahl auf mindestens zwei Standorte je für SMA und HAA reduziert. Standorte aus Etappe 1, welche im Rahmen eines sicherheitstechnischen Vergleichs eindeutige Nachteile aufwiesen, wurden zurückgestellt.

In der laufenden **Etappe 3** wählen die Entsorgungspflichtigen denjenigen Standort aus, an welchem das Tiefenlager für SMA und HAA realisiert werden soll, und beantragen die Rahmenbewilligung.

2.2 Ergebnisse der SGT-Etappen 1 und 2

In **Etappe 1** hat die Nagra sechs geologische Standortgebiete (Jura Ost, Jura-Südfuss, Nördlich Lägern, Zürich Nordost, Südranden und Wellenberg) vorgeschlagen, welche den sicherheitstechnischen Anforderungen genügen (Nagra 2008). Die Vorschläge wurden 2011 mit einem Bundesratsentscheid bestätigt.

In **Etappe 2** erfolgte ein sicherheitstechnischer Vergleich der sechs Standortgebiete (Nagra 2014). Dieser Vergleich der Standortgebiete umfasste neben der qualitativen Bewertung anhand der SGT-Kriterien auch provisorische Sicherheitsanalysen. Einerseits wurde damit nachgewiesen, dass alle Standortgebiete Dosisintervalle unterhalb von 0.1 mSv/a (gemäss Richtlinie ENSI-G03, ENSI 2023) aufweisen und damit sicherheitstechnisch geeignet sind. Ferner wurde gezeigt, dass keines der berechneten Dosisintervalle über 0.01 mSv/a liegt (gemäss StSV vom 22. Juni 1994¹ definierte Schwelle zur Optimierung), d.h. die Standortgebiete konnten als sicherheitstechnisch gleichwertig eingestuft werden.

In der qualitativen Bewertung der Etappe 2 hat die Nagra ausser in Jura Ost und Zürich Nordost in allen Standortgebieten Nachteile identifiziert. Im Vergleich zu den anderen Standortgebieten weist der Opalinuston in Nördlich Lägern die grösste Tiefenlage auf. Damals wurde zwar festgehalten, dass die Sicherheit und technische Machbarkeit voraussichtlich auch bei grossen Tiefenlagen gewährleistet sei. Jedoch wäre eine Tiefe von > 700 m u. T. (HAA-Lager) bzw. > 600 m u. T. (SMA-Lager) ein Nachteil, wenn es keinen anderen noch bedeutenderen Grund gibt, das Lager in solch grossen Tiefen zu erstellen. Deshalb schlug die Nagra für die weitere Untersuchung in SGT-Etappe 3 nur die Standortgebiete Jura Ost und Zürich Nordost mit dem Opalinuston als Wirtgestein vor (Nagra 2014).

Im Rahmen der sicherheitstechnischen Überprüfung beurteilte das ENSI diese Argumentation als nicht ausreichend belastbar für eine Zurückstellung von Nördlich Lägern. Die KNS und die AG SiKa/KES beurteilten dies in ihren Stellungnahmen gleich.

Gestützt auf die Behördengutachten hat der Bundesrat Ende 2018 den Fokus auf den Opalinuston als verbleibendes Wirtgestein sowie das Zurückstellen der Standortgebiete Jura-Südfuss, Südranden und Wellenberg gutgeheissen. Zudem hat der Bundesrat entschieden, dass neben den Standortgebieten Jura Ost und Zürich Nordost in Etappe 3 auch das Standortgebiet Nördlich Lägern weiter zu untersuchen ist (Fig. 2-2; BFE 2018).

Damit wurde der Opalinuston als Wirtgestein festgelegt. Ausschlaggebend für seine Qualität als Wirtgestein sind die günstigen Eigenschaften zur Rückhaltung von Radionukliden, das gute Selbstabdichtungsvermögen, die sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit und die feine Porenstruktur, verursacht durch den hohen Tonmineralgehalt und die Tonzusammensetzung.

¹ Dieser Dosisrichtwert ist in der aktuell gültigen Strahlenschutzverordnung (StSV 2017) nicht mehr enthalten.

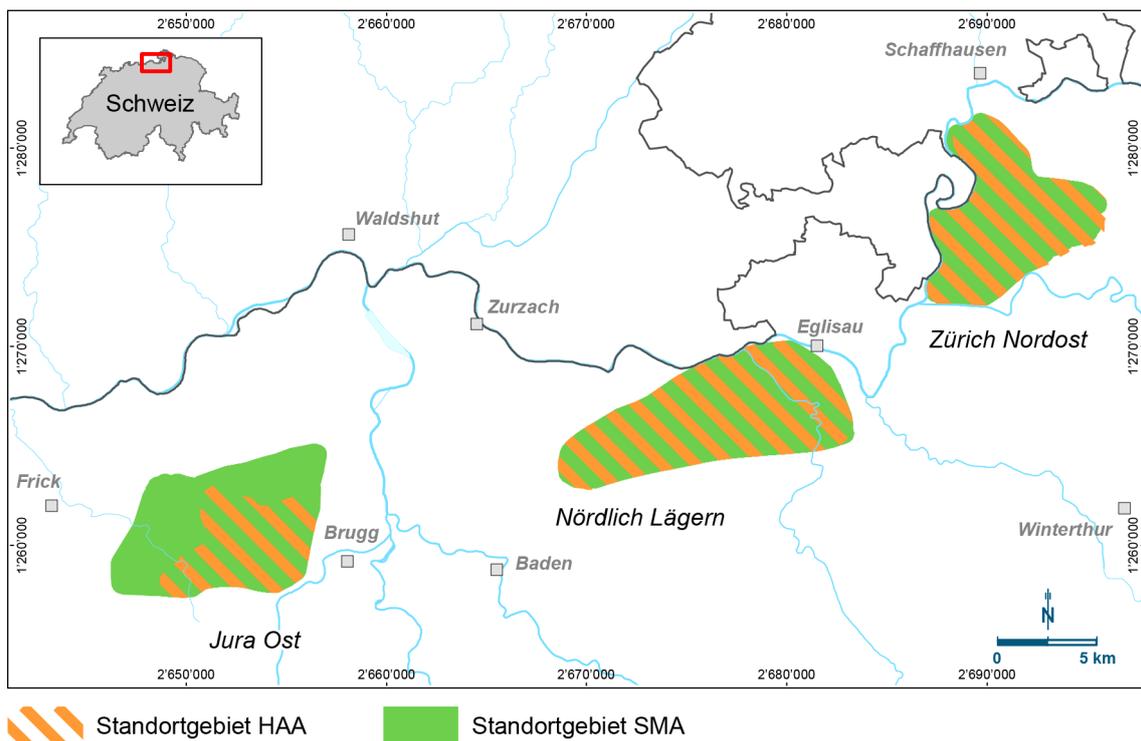


Fig. 2-2: Karte mit den drei Standortgebieten, die gemäss Entscheid des Bundesrates von 2018 in SGT-Etape 3 vertieft untersucht wurden

3 Vorgaben an die Standortwahl in SGT-Etappe 3

An die Etappe 3 stellt der Konzeptteil SGT (BFE 2008) die Anforderung, die geologischen Kenntnisse der Standorte auf einen Stand zu bringen, der einen Vergleich der im Sachplan festgehaltenen Standorte Jura Ost, Nördlich Lägern und Zürich Nordost aus sicherheitstechnischer Sicht aufgrund verifizierter standortbezogener Daten und mittels konkretisierter Lagerprojekte ermöglicht. Die Ergebnisse führen dann durch eine Abwägung und gesamtheitliche Betrachtung zur Standortwahl durch die Nagra. Erfüllt ein Standort sowohl die Anforderungen für ein HAA- als auch für ein SMA-Lager, kann das Auswahlverfahren zu einem gemeinsamen Standort für alle radioaktiven Abfälle führen.

3.1 Präzisierung der sicherheitstechnischen Vorgaben an die SGT-Etappe 3 des ENSI

Das ENSI hat die sicherheitstechnischen Vorgaben an das Vorgehen bei der Standortwahl (vgl. Kap. 3.1.1) und für die Aktualisierung der dazu erforderlichen Grundlagen (vgl. Kap. 3.1.2) präzisiert (ENSI 2018).

3.1.1 Vorgaben an das Vorgehen bei der Standortwahl

Die Standortwahl soll als Positivwahl in einem sicherheitstechnischen Vergleich der Standortgebiete in drei Schritten erfolgen:

1. Aufgrund der strengeren Anforderungen an die geologischen Barrieren und aufgrund des längeren Betrachtungszeitraums für ein HAA-Lager ist in einem ersten Schritt der Standort für das HAA-Lager zu wählen.
2. Im zweiten Schritt werden die Grundlagen für die Bewertung des SMA-Lagers im gewählten HAA-Standortgebiet erarbeitet. Bei der Standortwahl für das SMA-Lager steht der im Standortvergleich des HAA-Lagers betrachtete untertägige Raum nicht mehr zur Verfügung. Es ist sicherzustellen, dass die möglichen Wechselwirkungen zwischen dem SMA- und dem HAA-Lager keine sicherheitsrelevante Beeinträchtigung darstellen.
3. Auf dieser Grundlage (und analog wie für das HAA-Lager) soll danach im dritten Schritt die Standortwahl für das SMA-Lager erfolgen.

3.1.2 Vorgaben an die Grundlagen für den Standortvergleich

Der sicherheitstechnische Vergleich soll auf einer Abgrenzung von einschlusswirksamen Gebirgsbereichen, standortspezifischen Lagerprojekten, den Resultaten der Sicherheitsanalysen und der qualitativen Bewertung der EG anhand der Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit (vgl. Fig. 2-1) erfolgen. Dazu sind die entsprechenden Grundlagen wie folgt zu aktualisieren:

- Bezüglich des Umfangs der **erdwissenschaftlichen Untersuchungen** ist mit Blick auf die Standortwahl zu gewährleisten, dass der erreichte Kenntnisstand die Durchführung der Sicherheitsanalysen für den Standortvergleich und die qualitative Bewertung der Kriterien zur Sicherheit und Machbarkeit mit belastbaren Argumenten erlaubt.
- Es ist aufzuzeigen, dass die gewählte **Abfallzuteilung** auf die beiden Lagertypen HAA und SMA sicherheitsgerichtet ist. Weiter sind die in Etappe 1 hergeleiteten **Betrachtungszeiträume** für die beiden Lagertypen zu überprüfen. Beide Schritte haben auf dem zu aktualisierenden und zu dokumentierenden modellhaften Inventar radioaktiver Materialien (MIRAM) zu basieren, da die Anforderungen an einen Lagerstandort auch vom vorgesehenen Lagerinhalt abhängen.
- Das **Lagerkonzept** ist an die gewählte Abfallzuteilung anzupassen sowie, basierend auf dem aktuellen, gegenüber Etappe 2 erweiterten Kenntnisstand, zu überprüfen und gegebenenfalls zu aktualisieren. Die geologischen Tiefenlager sind auf der Grundlage des Lagerkonzepts so auszulegen, dass der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet ist.
- Aus dem Lagerkonzept sind standortspezifische **Lagerauslegungen** zu entwickeln, in denen die Aspekte von Bau, Betrieb, Rückholung ohne grossen Aufwand, Verschluss und Langzeitsicherheit angemessen berücksichtigt werden.
- Zur Begründung der Standortwahl sind standortspezifische Lagerprojekte für beide Lagertypen auf Stufe Vorprojekt vorzulegen. Die **Lagerprojekte** für die Untertagebauten müssen auf standortspezifischen Grundlagen basieren.
- Basierend auf dem in Etappe 3 erweiterten Kenntnisstand ist je Standortgebiet und Lagertyp mindestens ein **EG** für den Standortvergleich vorzuschlagen. Der EG ist definiert als *«räumlicher Körper im geologischen Untergrund, der bei zu erwartender Entwicklung des geologischen Tiefenlagers für den Betrachtungszeitraum, im Zusammenwirken mit technischen Barrieren, den Einschluss und die Rückhaltung der im Abfall enthaltenen radioaktiven Stoffe sicherstellt. Zum EG gehören das Wirtgestein sowie obere und untere barrierenwirksame Rahmengesteine»* (Glossar in ENSI 2018).
- Mittels umfassender und systematischer **Sicherheitsanalysen** muss für den Standortvergleich aufgezeigt werden, wie sich die Tiefenlagersysteme ausgehend von den heutigen Bedingungen in den untersuchten Standortgebieten langfristig entwickeln, welche radiologischen Konsequenzen sich daraus ergeben und dass die Schutzkriterien gemäss Richtlinie ENSI-G03 (ENSI 2023) langfristig eingehalten werden.
- Die EG müssen anhand der Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit (Fig. 2-1) **qualitativ bewertet** werden.

Für die Standortwahl je Lagertyp sind die Vor- und Nachteile der EG bezüglich der sicherheitstechnischen Kriterien, in denen sie sich unterscheiden, darzulegen und die Konsequenzen für die Bau-, Betriebs- und Langzeitsicherheit zu erläutern.

4 Vorgehen bei der Standortwahl und Grundlagen für den Standortvergleich

Die Standortwahl wurde auf Basis eines sicherheitstechnischen Vergleichs der verbleibenden Standortgebiete getroffen. Das Vorgehen orientierte sich an den in SGT-Etappe 3 gewonnenen Erkenntnissen.

4.1 Vertiefung der geologischen Kenntnisse mittels erdwissenschaftlicher Untersuchungen

Für die drei verbleibenden Standortgebiete wurden umfangreiche erdwissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt und die bestehenden Kenntnisse vertieft (Fig. 4-1).

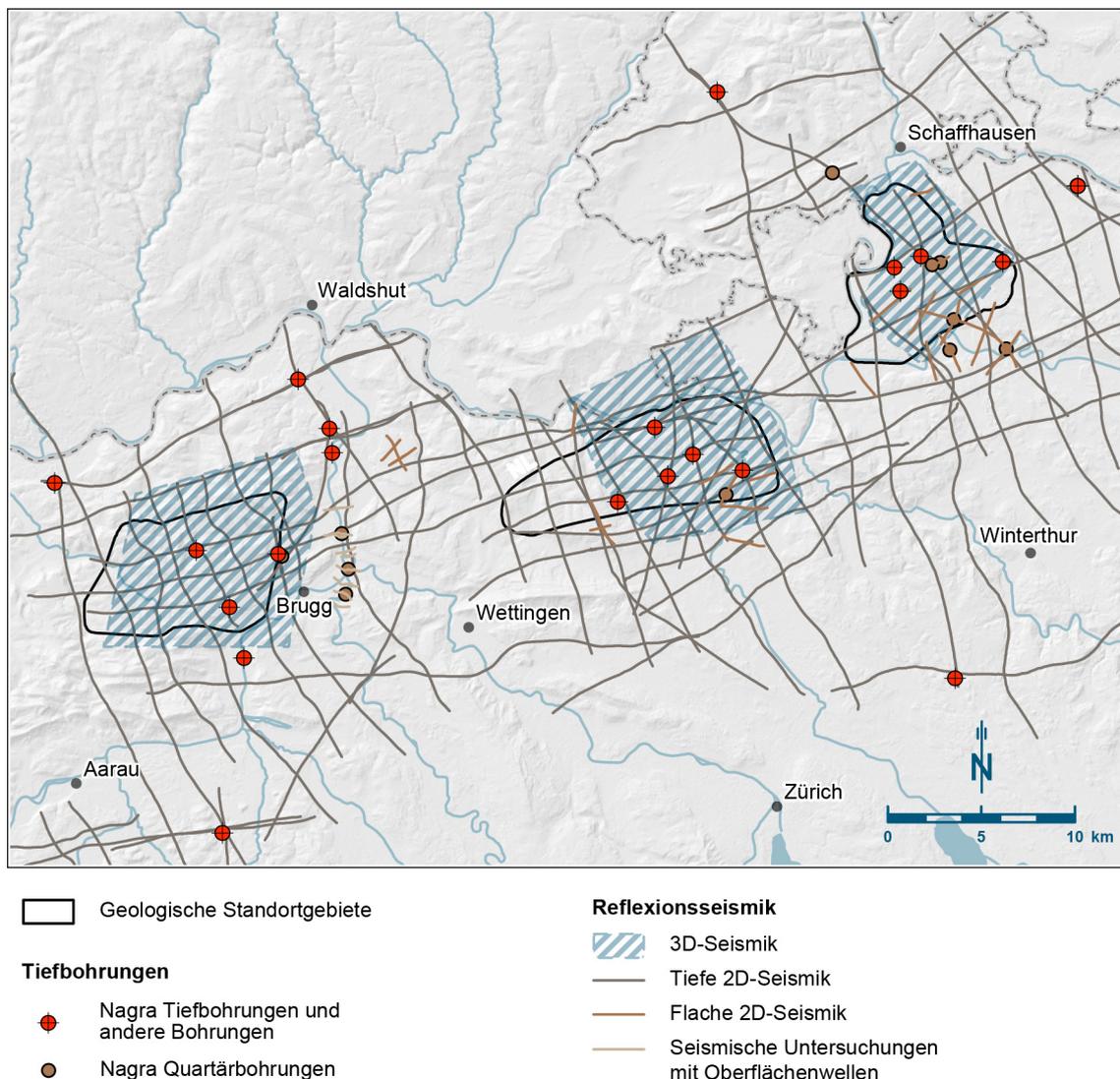


Fig. 4-1: Die wichtigsten geologische Datenquellen in der Nordschweiz
Basierend auf Fig. 2-2 in Nagra (2024e).

Zwischen Herbst 2015 und Frühjahr 2017 wurden für die Gebiete Jura Ost und Nördlich Lägern zwei neue 3D-Seismik-Datensätze erhoben und für das Gebiet Zürich Nordost die existierende 3D-Seismik aus dem Jahr 1997 ergänzt. Dabei wurde in allen Gebieten eine vergleichbare Datenprozessierung und eine konsistente Interpretationsmethodik angewandt. Die Ergebnisse bestätigten das bisherige Verständnis des geologischen Aufbaus der Standortgebiete und erlaubten es zum Beispiel, das Schichtmodell des geologischen Untergrundes (Tiefenlage und Mächtigkeit der geologischen Schichten) und die Kartierung von tektonischen Elementen zu präzisieren (Kap. 2.2 und 7.1 in Nagra 2024e).

Zudem wurden 9 neue Tiefbohrungen abgeteuft. Die Tiefbohrungen reichen im Durchschnitt gut 1'000 m tief in den Untergrund. Insgesamt wurden über 10'000 m Gestein erbohrt und davon 6'000 m gekernt. Labore in der Schweiz, in Japan, Australien und anderen Ländern analysierten mehr als 4'000 Proben. Anhand der Auswertungen der Befunde aus den Tiefbohrungen wurden die Ergebnisse der 3D-Seismik kalibriert und die Eigenschaften der Gesteinsschichten vertieft charakterisiert. Die Untersuchungen führten zu einem starken Datenzuwachs zu Schlüsselparametern für die Standortevaluation für ein geologisches Tiefenlager (Fig. 4-2). Die bereits gut untersuchten Eigenschaften des Opalinustons konnten dabei bestätigt, die Rahmengesteine und die hydrogeologischen Verhältnisse spezifischer charakterisiert werden (Kap. 2.3 und 7.1 in Nagra 2024e).

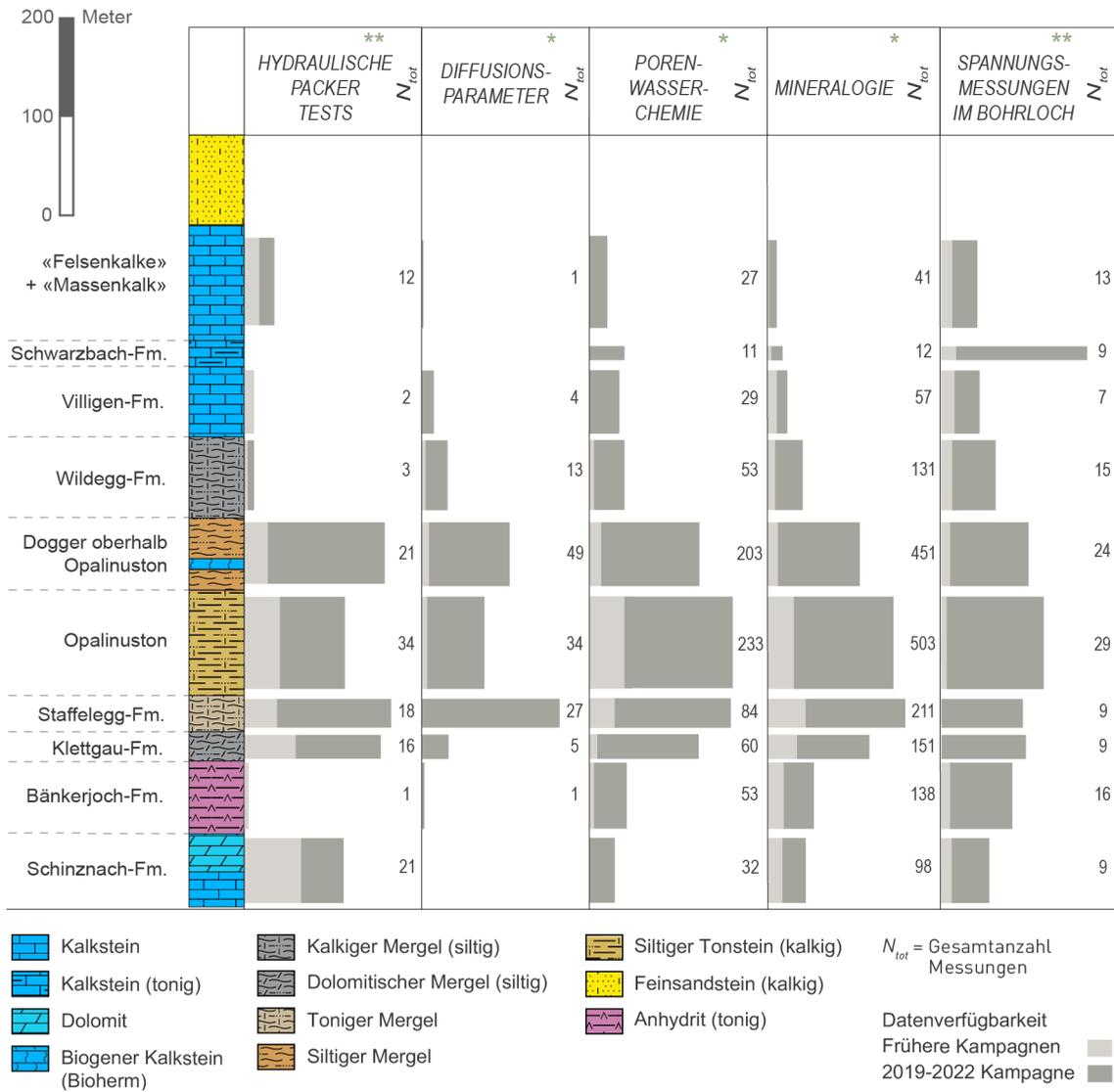


Fig. 4-2: Entwicklung der geologischen Datengrundlage einiger Schlüsselparameter in den Jahren vor und nach der Tiefbohrerkampagne, die im Hinblick auf die Standortevaluation für ein geologisches Tiefenlager in der Schweiz erarbeitet wurde

Basierend auf Fig. 2-3 in Nagra (2024e).

Die Kompilation umfasst Daten von den 9 neuen Tiefbohrungen sowie den älteren Bohrungen Benken, Riniken und Weiach-1. Die Daten sind auf die Bohrung Stadel-3-1 projiziert, deren Gesteinsprofil als Referenz auf der linken Seite dargestellt ist. Die Daten sind auf die durchschnittliche Mächtigkeit der Formationen normiert, die horizontalen Balken widerspiegeln die Datendichte. Parameter mit einem Stern beziehen sich auf Laborexperimente an Bohrkernen, während Parameter mit zwei Sternen in-situ-Messungen in den Bohrungen darstellen.

Weitere Feldarbeiten wurden im Hinblick auf die Beurteilung der geologischen Langzeitentwicklung durchgeführt. Diese umfassten u.a. hochauflösende 2D-Seismik-Daten sowie 11 Quartärbohrungen mit einer Länge von 50 – 300 m (Fig. 4-1). Anhand dieser Untersuchungen konnten Aspekte zur Erosion weitergehend eingegrenzt werden (Kap. 2.4 und 7.1 in Nagra 2024e).

Ergänzend wurden auch zahlreiche Untersuchungsprogramme in (Fels-)Labors durchgeführt. Diese Arbeiten vertieften die Erkenntnisse aus Arbeiten mehrerer Jahrzehnte bezüglich Tiefenlager-relevanter Aspekte der Geologie in der Schweiz und im Ausland, sowie aus der allgemeinen geologischen Forschung, aus der Kohlenwasserstoff-Exploration oder aus Tunnelbauten. Das geologische Verständnis wurde weitgehend bestätigt. Die geologischen Prozesse in der Vergangenheit sind damit ausreichend bekannt, um mögliche zukünftige Entwicklungen einzugrenzen (Kap. 2.6, 2.7 und 7.1 in Nagra 2024e).

Die Synthese über den geologischen Untergrund und das geologische Gesamtbild in der Nordschweiz ist in Nagra (2024e) enthalten. Die Parametrisierung der geologischen Standortgebiete ist Inhalt von Nagra (2024d).

4.2 Überprüfung der Grundlagen zu den Tiefenlagern

Aufbauend auf den neu gewonnenen geologischen Erkenntnissen wurden die Grundlagen aus Etappen 1 und 2 zu den Tiefenlagern überprüft und aktualisiert.

Abfallinventar und -zuteilung

Das RBG basiert, gemäss den Vorgaben des ENSI, auf dem MIRAM (Kap. 1.1 in Nagra 2023b). Das MIRAM-RBG umfasst den heute vorhandenen Abfall (Mengen, Materialien und Nuklidinventar) und eine Prognose des noch entstehenden Abfalls unter Annahme einer Betriebsdauer der aktuell betriebenen Kernkraftwerke von 60 Jahren. Das Volumen der konditionierten Abfälle beträgt rund 44'000 m³, das verpackte Volumen rund 93'000 m³ (Zahlen gerundet aus Tab. 7-1 in Nagra 2023b). Eine detaillierte Beschreibung der Abfälle und ihrer Eigenschaften findet sich in Kap. 5 bis 7 und in den Anhängen in Nagra (2023b).

Abgebrannte Brennelemente sowie verglaste hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung werden dem HAA-Lager, schwach- und mittelaktive Abfälle sowie die alphatoxischen Abfälle dem SMA-Lager zugeordnet (Kap. 4.2 in Nagra 2024a). Diese Abfallzuteilung ist sicherheitsgerichtet, da sowohl die geologische als auch die technischen Barrieren die an sie gestellten Anforderungen erfüllen, wodurch die Langzeitsicherheit in allen Standortgebieten und für beide Lagertypen gewährleistet wird (Tab. 6-1 in Nagra 2024a). Alternative Abfallzuteilungen haben in SGT-Etappe 3 keine sicherheitstechnische Relevanz mehr, da in allen Standortgebieten und für beide Lagertypen der Opalinuston als Wirtgestein gesetzt ist. Dies bedeutet, dass die gewählte Abfallzuteilung und auch alternative Abfallzuteilungen keinen Einfluss auf die Standortwahl haben (Tab. 6-1 in Nagra 2024a). Die in Etappe 1 definierten Betrachtungszeiträume von 100'000 Jahren für SMA resp. 1 Mio. Jahren für HAA behalten weiterhin ihre Gültigkeit (Kap. 5.1 bis 5.2 in Nagra 2024a).

Sicherheits- und Lagerkonzept

Das Sicherheits- und Lagerkonzept (Kap. 3 in Nagra 2024l) wurde über die letzten 20 Jahre iterativ weiterentwickelt und gilt als robust und ausgereift. Es umfasst die technischen Barrieren Abfallmatrix, Endlagerbehälter, Verfüllung und Versiegelung sowie die Geologie als natürliche Barriere. Dieses Mehrfachbarrierensystem gewährleistet, dass das Tiefenlagersystem im Verlauf seiner zeitlichen Entwicklung die notwendigen Sicherheitsfunktionen gemäss Richtlinie ENSI-G03 (ENSI 2023) erfüllt (Kap. 3.4 in Nagra 2024l). Es ist aufgrund der ähnlichen geologischen Verhältnisse in den Standortgebieten gleich angewandt worden.

Lagerauslegung

Das Lagerkonzept wurde in einer für alle Standortgebiete in Etappe 3 gleichermassen anwendbaren Lagerauslegung beispielhaft umgesetzt. Die Lagerauslegung aus früheren Projektphasen weitgehend beibehalten und mit einer standortspezifischen Erschliessung ergänzt. Somit wurden Unterschiede in den geologischen Eigenschaften der Standorte und nicht Unterschiede in der Lagerauslegung bewertet. Dazu wurde die bereits in Etappe 2 erarbeitete Zusammensetzung und Anordnung der Bauwerke eines geologischen Tiefenlagers in Module unterteilt (Kap. 3 in Nagra 2022), die sich zu unterschiedlichen Lagertypen kombinieren lassen (Fig. 4-3). Die standortunabhängige Lagerauslegung erfüllt die Anforderungen aus Sicht der Langzeitsicherheit und der technischen Machbarkeit (Kap. 2 in Band 5 aus Nagra 2023a). Die für den Standortvergleich wichtigsten Eckpunkte lassen sich wie folgt skizzieren.

Die Lagerkonfigurationen umfassen je ein Haupt- und ein Pilotlager pro Lagertyp. Als Funktion der erwarteten Abfallmenge wird eine standortunabhängige Fläche von insgesamt ca. 1 km² für das HAA-Lagerfeld, resp. ca. 0.6 km² für das SMA-Lagerfeld benötigt. Sowohl für HAA als auch für SMA ist in der benötigten Fläche zudem das Pilotlager und eine gewisse Reserve hinsichtlich der erwarteten Abfallmenge gemäss MIRAM-RBG enthalten (Kap. 3.1.6 in Nagra 2024b).

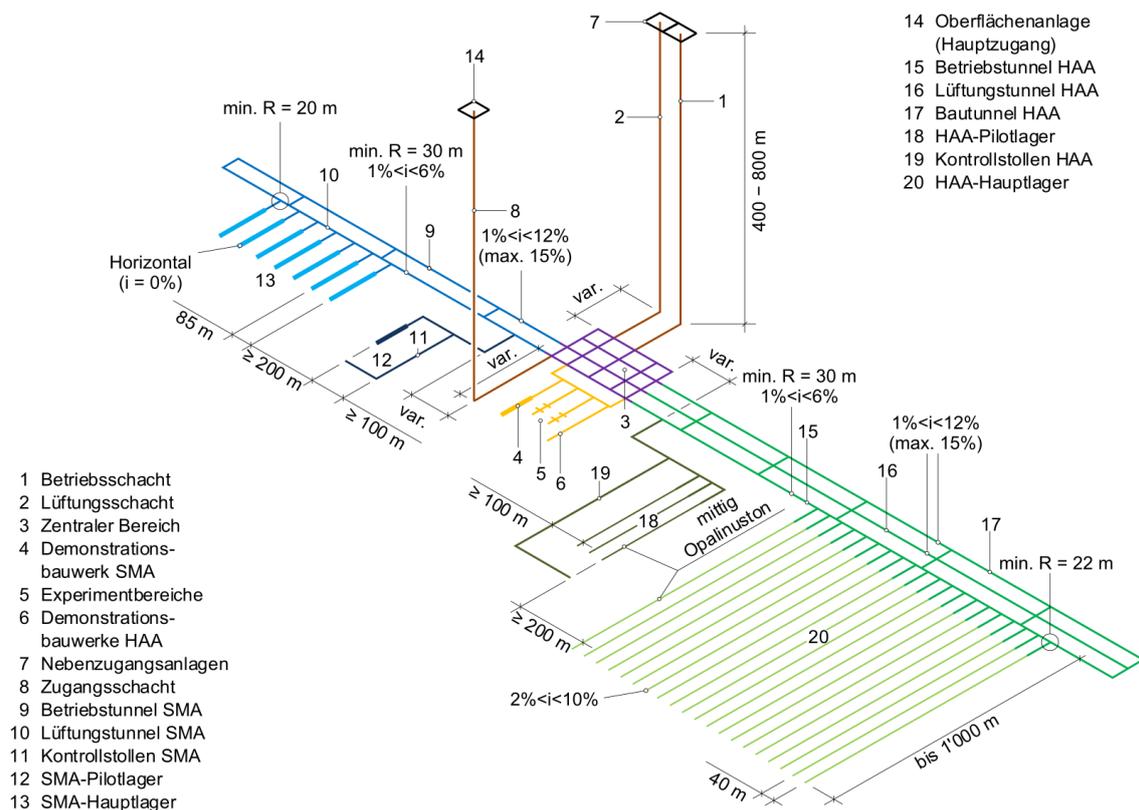


Fig. 4-3: Generische Zusammensetzung der Module des Tiefenlagers und deren Hauptabmessungen gemäss aktueller Auslegung

Kopie der Fig. 4-2 in Band 5 in (Nagra 2023a).

4.3 Definition der Bewertungsobjekte

Die für den sicherheitstechnischen Vergleich geforderten Bewertungsobjekte wurden auf Basis der geologischen Kenntnisse und der überprüften Grundlagen zu den Tiefenlagern definiert. Dazu wurden innerhalb der in Etappe 1 festgelegten Standortgebiete raumwirksame geologische Elemente in einem mehrstufigen Vorgehen analysiert, um den untertägigen Raum einzuengen und den EG sowie die Platzreserven zum Zweck des sicherheitstechnischen Vergleichs abzugrenzen (Kap. 3.1 in Nagra 2024b). Innerhalb der so abgegrenzten EG wurde anschliessend das vorläufige Lagerfeld angeordnet und die Lager für den Zweck des Standortvergleichs projiziert (Kap. 3.2 in Nagra 2024b).

Alle Standortgebiete weisen im Opalinuston potenzielle Lagerzonen mit grosser lateraler Ausdehnung auf, welche den Platzbedarf gemäss aktueller Lagerauslegung bei weitem übertreffen. Sie befinden sich in geeigneter Tiefenlage und mit ausreichend Abstand zu regionalen Störungszonen (Kap. 3.1.1 in Nagra 2024b). Ober- und unterhalb der potenziellen Lagerzonen erweist sich zusätzlich zum Opalinuston die gesamte Gesteinsabfolge zwischen den nächstliegenden Aquiferen als geringdurchlässig. Somit umfasst der EG vertikal in allen Standortgebieten den Opalinuston und mächtige Pakete von Rahmengesteinen, die nachweislich zur guten geologischen Barrierewirkung beitragen (Kap. 3.1.2 in Nagra 2024b).

Lateral wurde dem sicherheitstechnischen Vergleich pro Lagertyp jeweils ein einheitlicher Platzbedarf als EG sowie einheitliche Platzreserven, die ein Mehrfaches davon betragen, zugrunde gelegt. Dazu wurde innerhalb der potenziellen Lagerzone die doppelte Fläche des Platzbedarfs gemäss aktueller Lagerauslegung als EG (2 km² für HAA; 1.2 km² für SMA) und das 3-fache davon als EG inkl. Platzreserven (6 km² für HAA; 3.6 km² für SMA) ausgeschieden (Kap. 3.1.6 in Nagra 2024b).

Die Definition der Bewertungsobjekte wurde zunächst für das HAA-Lager vorgenommen (Kap. 4 in Nagra 2024b). Nach getroffener Standortwahl für HAA erfolgte analog die Definition der Bewertungsobjekte für das SMA-Lager (Kap. 5 in Nagra 2024b). Dabei wurde der verfügbare untertägige Raum am gewählten HAA-Standort, Nördlich Lägern, um den EG und die Platzreserven des HAA-Lagers reduziert.

Das detaillierte Vorgehen und die Ergebnisse dieser Schritte sind in den Kap. 3-5 in Nagra (2024b) dokumentiert. Nachfolgend werden die resultierenden Bewertungsobjekte vorgestellt. Die exemplarische Umsetzung der sechs standortspezifischen Lagerprojekte ist im «Bautechnischen Dossier Standortvergleich» enthalten (Nagra 2023a).

Bewertungsobjekte HAA und SMA in Jura Ost

Als potenzielle Lagerzone wird in Jura Ost (Kap. 4.1 und 5.1 in Nagra 2024b) der zentrale Bereich mit einer einfachen Geologie betrachtet, in welchem der Opalinuston eine minimale Tiefenlage zum Schutz vor Erosion aufweist. Vertikal umfasst der EG alle Gesteinseinheiten zwischen dem Keuper-Aquifer unterhalb und dem Haupttrogenstein-Aquifer oberhalb des Opalinustons und weist Mächtigkeiten von rund 200 – 260 m auf.

Die Bewertungsobjekte HAA und SMA sind im östlichen Teil der potenziellen Lagerzone angeordnet, der kaum seismisch kartierbare Störungen aufweist (Fig. 4-4). Die vorläufigen Haupt- und Pilotlager sind auf rund 500 m Tiefe im EG platziert. Erschlossen wird der Bereich untertag mittels eines Zugangs- und Betriebstunnels von der Oberflächenanlage auf dem Gebiet der Gemeinde Villigen aus. Die Lüftungsschächte sind von der Nebenzugangsanlage im Taleinschnitt «Itele» – «Matten» – «Riniken» vorgesehen.

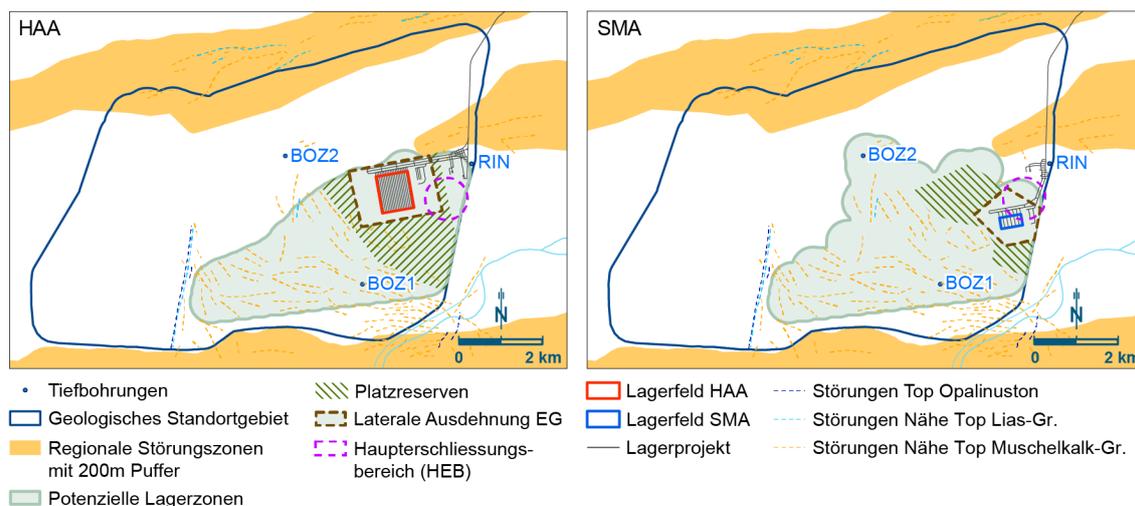


Fig. 4-4: Bewertungsobjekte Jura Ost für HAA (links) und SMA (rechts)

Basierend auf Fig. 4-2 und Fig. 5-2 in (Nagra 2024b).

Die potenzielle Lagerzone für SMA weist im nordwestlichen Bereich eine grössere Ausdehnung auf als diejenige für HAA, da die Anforderungen an die Tiefenlage zum Schutz vor Erosion für SMA weniger einschränkend sind.

Bewertungsobjekte HAA und SMA in Nördlich Lägern

In Nördlich Lägern (Kap. 4.2 und 5.2 in Nagra 2024b) umfasst die potenzielle Lagerzone den ruhig gelagerten Bereich mit sehr hoher Kontinuität zwischen regionalen Störungszonen im Norden und Süden (Fig. 4-5). Hier umfasst der EG vertikal alle Gesteinseinheiten zwischen dem Keuper-Aquifer unterhalb und dem Malm-Aquifer oberhalb des Opalinustons und weist Mächtigkeiten von rund 290 – 380 m auf.

Das Bewertungsobjekt HAA wurde aufgrund des hohen Tonmineralgehalts der Rahmengesteine direkt über dem Opalinuston sowie der insgesamt etwas grösseren Fläche mit flach gelagertem Opalinuston im östlichen Bereich von NL platziert. Für das vorläufige SMA-Lagerfeld wurde eine besonders geeignete Kombination aus Schichtmächtigkeit und -neigung innerhalb des Opalinustons im nicht vom HAA-Lager beanspruchten Bereich westlich des Hauptschliessungsbereichs gewählt (Fig. 4-5). Die vorläufigen Haupt- und Pilotlager sind auf rund 900 m Tiefe im EG platziert. Erschlossen wird der Bereich untertag aus dem Haberstal.

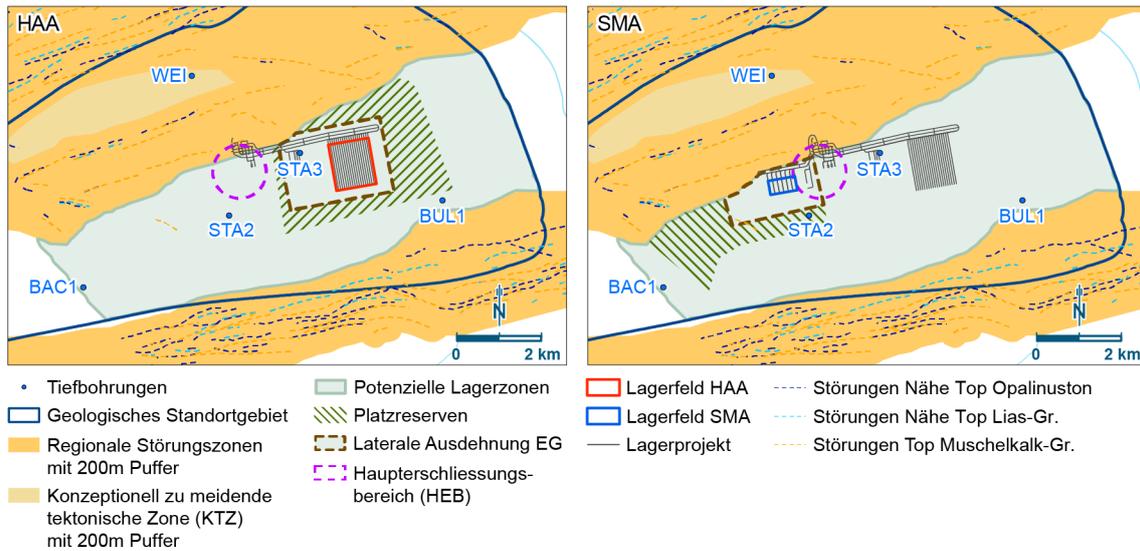


Fig. 4-5: Bewertungsobjekte Nördlich Läger für HAA (links) und SMA (rechts)
 Basierend auf Fig. 4-4 und Fig. 5-4 in (Nagra 2024b).

Bewertungsobjekte HAA und SMA in Zürich Nordost

In Zürich Nordost (Kap. 4.3 und 5.3 in Nagra 2024b) umfasst die potenzielle Lagerzone den Bereich mit der einfachsten Geologie zwischen mehreren regionalen tektonischen Elementen. Er liegt im Zentrum des Standortgebiets (Fig. 4-6). Vertikal umfasst der EG alle Gesteinseinheiten zwischen dem Keuper-Aquifer unterhalb und dem Malm-Aquifer oberhalb des Opalinuston und weist Mächtigkeiten von rund 260 – 300 m auf.

Die potenzielle Lagerzone weist unterschiedliche Konfigurationen hinsichtlich Schichtmächtigkeiten, -neigungen, Tiefenlage und Abstand zum Haupterschliessungsbereich auf. Um eine möglichst ausgewogene geologische Konfiguration zu nutzen, wurden die vorläufigen Lagerfelder in der Mitte platziert und, mit Blick auf die zunehmenden Sicherheitsmargen bzgl. Langzeitveränderungen, insbesondere die Platzreserven für HAA östlich angrenzend angeordnet (Fig. 4-6). Die vorläufigen Haupt- und Pilotlager sind auf rund 700 m Tiefe im EG platziert. Erschlossen wird der Bereich untertag von der Oberflächenanlage aus dem Bereich Isenbuck – Berg und «Rinauer Feld».

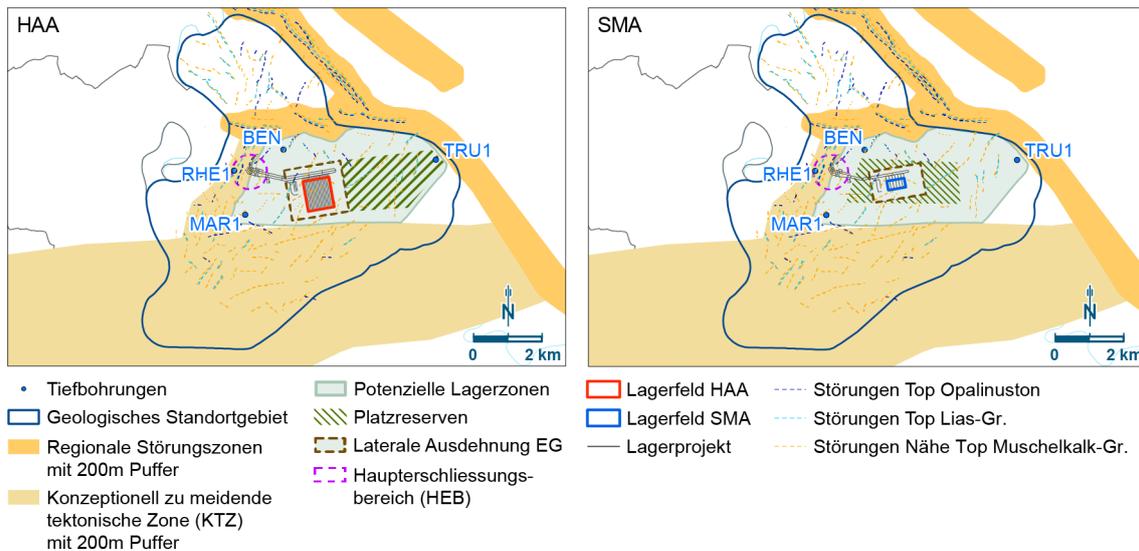


Fig. 4-6: Bewertungsobjekte Zürich Nordost für HAA (links) und SMA (rechts)
Basierend auf Fig. 4-6 und Fig. 5-6 in (Nagra 2024b).

4.4 Sicherheitsanalysen für den Standortvergleich

Für diese vorläufigen, standortspezifischen Lagerprojekte wurde mittels Sicherheitsanalysen aufgezeigt, wie sich die Tiefenlagersysteme, ausgehend von den heutigen Bedingungen, in den untersuchten Standortgebieten langfristig entwickeln (Nagra 2024h) und welche radiologischen Auswirkungen sich daraus ergeben (Nagra 2024j). Für alle Lagertypen und Standortgebiete werden die Schutzkriterien gemäss Richtlinie ENSI-G03 (ENSI 2023) eingehalten und der geforderte Schutz von Mensch und Umwelt erfüllt:

Die radiologischen Dosisberechnungen sind in Kap. 6 in Nagra (2024j) dokumentiert. Sie zeigen, dass alle Dosisintervalle sowohl für HAA als auch für SMA weit unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/a liegen, d.h. dass alle Standortgebiete für beide Lagertypen sicherheitstechnisch geeignet sind (Kap. 6.1.4 und 6.2.4 in Nagra 2024j). Auch die radiologischen Konsequenzen einer allfälligen Freilegung wurden geprüft (Kap. 3.7 und 4.7 in Nagra 2024k), wobei eine Freilegung des Tiefenlagers innerhalb der Betrachtungszeiträume für alle Standortgebiete als äusserst unwahrscheinlich eingestuft wird (Kap. 6.1 in Nagra 2024c).

Die Sicherheitsanalysen bestätigen zudem die sicherheitstechnische Eignung und, gemessen an den Schutzkriterien, die Gleichwertigkeit der Standortgebiete für die Zeit nach Verschluss für beide Lagertypen (Kap. 6.1.4 und 6.2.4 in Nagra 2024j). Damit bestätigen die Sicherheitsanalysen für den Standortvergleich in Etappe 3 die Ergebnisse der provisorischen Sicherheitsanalysen aus Etappe 2.

4.5 Qualitative Bewertung der EG anhand der 13 SGT-Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit

Welches Gebiet die Erwartungen an den Standort eines geologischen Tiefenlagers am besten erfüllt, wurde mittels qualitativer Bewertung der EG im Raster der 13 SGT-Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit (vgl. Kap. 2.1) aufgezeigt.

Dazu wurde die qualitative Bewertung gegenüber früheren Etappen überprüft und an den aktuellen Kenntnisstand angepasst (Kap. 3 in Nagra 2024i). Spezifisch für Etappe 3 sind deren Ausgangslage und Zielsetzung: Verglichen wurden drei Standortgebiete mit demselben Wirtgestein, und die Auswahl des besten Standortgebiets je für HAA und SMA erfolgte als Positivwahl anhand einer gesamtheitlichen Abwägung der sicherheitstechnischen Eigenschaften (vgl. ENSI 2018).

Die Charakterisierung der zu beurteilenden Aspekte wurde, wo möglich, anhand von direkt gemessenen, geologischen Eigenschaften vorgenommen. Für das Langzeitverhalten des Tiefenlagers konnten dank der standortspezifischen Lagerprojekte im Vergleich zu früheren Etappen detailliertere Systemanalysen eingesetzt werden (Kap. 3.2.2 in Nagra 2024i).

Die Standortwahl wurde mittels mehrerer, für eine Positivwahl geeigneter Methoden aus der multikriteriellen Entscheidungsfindung durchgeführt (Kap. 3.2.3 in Nagra 2024i): In der Nutzwertanalyse erfolgte die Bewertung in diskreten Stufen, welche mit Bezug zur Langzeitsicherheit formuliert wurden. Zwei weitere, voneinander unabhängige Methoden wurden zudem eingesetzt, um relative Unterschiede zwischen den Bewertungsobjekten und eindeutige Vorteile von Standortgebieten aufzuzeigen. Wo die Unterschiede für die Langzeitsicherheit als relevant eingestuft wurden, erlaubten diese Methoden eine differenziertere Bewertung auch innerhalb von Bewertungsstufen. Einerseits wurden dazu die Bewertungsobjekte mittels Ranking-Methode systematisch in eine Rangordnung eingestuft. Andererseits wurden die Bewertungsobjekte mittels Outranking-Methode systematisch und paarweise verglichen und so Präferenzen aufgezeigt.

Auf dieser Basis wurden Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den EG hinsichtlich sicherheitsrelevanter Aspekte hervorgehoben und die für die Standortwahl ausschlaggebenden Eigenschaften bewertet (Kap. 3.3 in Nagra 2024i). Die Standortwahl für HAA erfolgte vor der Standortwahl für SMA, beide werden im nachfolgenden Kapitel begründet.

5 Ergebnisse des Standortvergleichs

5.1 Bestätigung der Eignung aller Standortgebiete

Das Untersuchungsprogramm der Etappe 3 hat bestätigt, dass alle Standortgebiete geeignete geologische Verhältnisse zur Realisierung eines geologischen Tiefenlagers sowohl für HAA wie auch für SMA aufweisen. Dies zeigt sich in den Ergebnissen der Sicherheitsanalysen (vgl. Kap. 4.4) und der qualitativen Bewertung (Kap. 4 und 5.2 in Nagra 2024i). In der qualitativen Bewertung zeigt sich das dahingehend, dass die Bewertungsobjekte in allen Kriterien fast ausschliesslich mit günstig und sehr günstig bewertet werden können (Fig. 5-1).

Dies begründet sich darin, dass alle Standortgebiete einen EG aufweisen, in dem die geologische Barriere die radioaktiven Abfälle wirksam einschliesst (vgl. Kap. 4.1 in Nagra 2024i):

Alle Standortgebiete verfügen über sehr günstige räumliche Verhältnisse mit einem sehr günstigen Platzangebot untertag (Kr 1.1). Sie weisen potenzielle Lagerzonen mit einer mächtigen Schicht Opalinuston von 100 – 120 m in einer Tiefe zwischen 400 und 1'000 m auf, was sowohl aus Sicht Bau wie auch aus Sicht Langzeitsicherheit geeignet ist. Der Opalinuston wurde gleichförmig und in kurzer Zeit abgelagert. Deshalb weist er in allen Standortgebieten einen ähnlichen Aufbau und ähnliche geologische Eigenschaften auf. Dadurch stellt der Opalinuston in allen potenziellen Lagerzonen die diffusionsdominierte primäre Transportbarriere dar und sorgt für den langfristigen und sicheren Einschluss des Abfalls. Weiter gewährleistet der Opalinuston ein stabiles geochemisches (Kr 1.3) und geomechanisches Umfeld für das Tiefenlager (Kr 1.4).

Weiter tragen ober- und unterhalb der potenziellen Lagerzonen zusätzlich zum Opalinuston mächtige Pakete von Rahmengesteinen zur geologischen Barrierewirkung bei (Kr 1.1). Sie dienen mit ihren günstigen Eigenschaften als zusätzliche Transportbarrieren und erhöhen die Robustheit des Tiefenlagersystems bezüglich Langzeitsicherheit. Alle EG weisen für den langfristigen Einschluss der Abfälle eine sehr günstige hydraulische Barrierewirkung auf (Kr 1.2). Die Messungen aus den Tiefbohrungen belegen für alle EG sehr günstige hydraulische Eigenschaften und ein diffusionsdominiertes Transportverhalten. Dadurch kann der Transport der Radionuklide in allen EG nur äusserst langsam erfolgen. Alle potenziellen Lagerzonen halten einen genügenden Abstand zu regionalen tektonischen Elementen ein, sodass die Wirksamkeit der geologischen Barriere gegeben ist.

Dass die Eignung der geologisch-tektonischen Verhältnisse und die guten Barriereigenschaften in den EG auch über lange Zeiträume erhalten bleiben, wird für alle Standortgebiete erwartet (vgl. Kap. 4.2 in Nagra 2024i):

Alle potenziellen Lagerzonen liegen in günstigen Situationen bezüglich Erdbebenaktivität in der Schweiz (Kr 2.1). Die EG liegen in tektonisch ruhigen Zonen mit geringer seismischer Aktivität und weisen sehr günstige Bedingungen ohne Verkarstungspotenzial auf.

Auch unter Berücksichtigung zukünftiger Erosionsprozesse bieten alle EG langfristig Schutz vor Erosion (Kr 2.2). Eine als günstig für den Erhalt der zentralen Barriereigenschaften eingestufte Restüberdeckung der Lagerebene kann für die wahrscheinlichsten Szenarien in allen Standortregionen innerhalb des Betrachtungszeitraums erwartet werden. Die Isolation der Abfälle wird langfristig erhalten bleiben, da der diffusionsdominierte Radionuklidtransport über den Betrachtungszeitraum Bestand hat. Auch eine Freilegung des geologischen Tiefenlagers ist an allen drei Standorten während des Betrachtungszeitraums äusserst unwahrscheinlich.

Der Erhalt der Barriereigenschaften kann auch in Anbetracht lagerbedingter Einflüsse in allen EG gewährleistet werden (Kr 2.3). Die technischen Barrieren können so konzipiert werden, dass sie mit der natürlichen Barriere sowie untereinander kompatibel und auf die jeweiligen Abfallarten optimiert sind. Weiter herrschen in allen EG günstige Verhältnisse zur Vermeidung von

Nutzungskonflikten mit einem geologischen Tiefenlager, da in keiner der potenziellen Lagerzonen aus heutiger Sicht wirtschaftlich nutzungswürdige Ressourcen in einem besonderen Masse vorkommen (Kr 2.4).

Die für den sicherheitstechnischen Vergleich relevanten geologischen Eigenschaften konnten in allen potenziellen Lagerzonen zuverlässig charakterisiert werden (vgl. Kap. 4.3 in Nagra 2024i). Die Verhältnisse sind gut explorierbar (Kr 3.2), die sehr günstige Barrierewirkung ist in allen Standortgebieten auch unter Berücksichtigung der Charakterisierbarkeit der Transporteigenschaften im EG gegeben (Kr 3.1). Die geologischen Prozesse in der Vergangenheit sind ausreichend bekannt, um mögliche zukünftige Entwicklungen einzugrenzen (Kr 3.3).

Schliesslich ist aus bautechnischer Sicht die Eignung aller drei Standorte für den Bau, Betrieb und Verschluss eines geologischen Tiefenlagers gegeben (Kr 4.1 und 4.2, vgl. Kap. 4.4 in Nagra 2024i)). Die Lagerprojekte können in allen drei Standortgebieten entsprechend den Anforderungen realisiert werden, da in den potenziellen Lagerzonen bautechnisch mit im Untertagebau bekannten und erprobten Massnahmen beherrschbare Verhältnisse vorliegen.

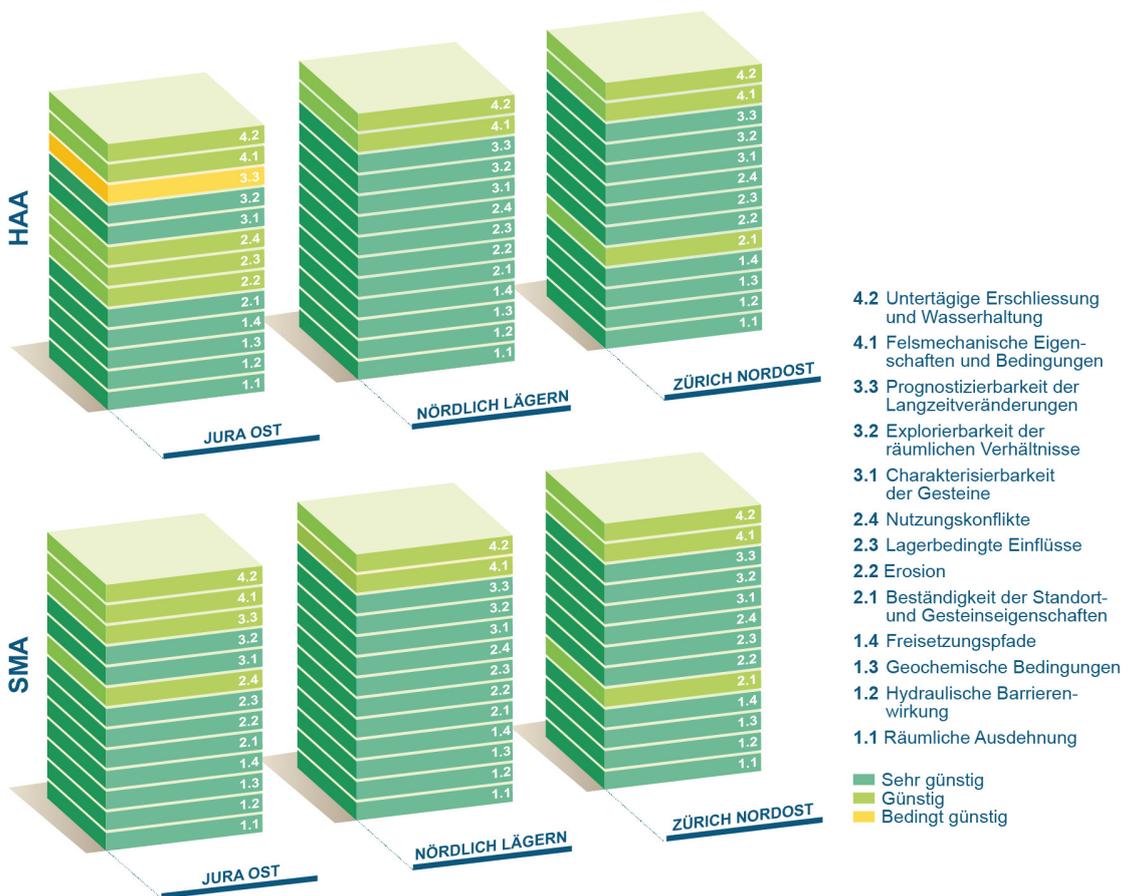


Fig. 5-1: Aus den Nutzwertanalysen resultierende qualitative Bewertungen der 13 SGT-Kriterien für HAA und SMA
 Kopie der Fig. 5-1 in Nagra (2024i).

5.2 Begründung der Standortwahl von Nördlich Lägern für HAA und für SMA

Das Untersuchungsprogramm in Etappe 3 ergab eindeutige sicherheitstechnische Gründe, Nördlich Lägern sowohl für ein HAA- als auch für ein SMA-Lager zu wählen. Anstatt die Bewertungsskala der Nutzwertanalyse für die Positivwahl mit «am günstigsten» zu ergänzen, wurde die Bewertung abhängig von der Sicherheitsmarge mit einer Rangierung durchgeführt (Kap. 4 und 5.3 in Nagra 2024i; Fig. 5-2). In dieser qualitativen Bewertung zeigt sich, dass in NL das Bewertungsobjekt sowohl für HAA wie auch für SMA gesamthaft die beste Rangsumme aufweist (grösste Stapelhöhe in Fig. 5-2). NL liegt in 11 der 13 Kriterien mit der grössten Sicherheitsmarge auf dem ersten Rang und erreicht dadurch im Vergleich mit JO und ZNO die meisten ersten Ränge. Dabei weist NL in 5 Kriterien für HAA, resp. 4 für SMA, eindeutige Vorteile (alleinige erste Ränge) gegenüber den beiden anderen Standortgebieten auf (Kap. 5.3 in Nagra 2024i). Auch im systematischen paarweisen Vergleich der Standortgebiete zeichnet sich NL sowohl bzgl. der grössten Anzahl festgestellter Stärken als auch bzgl. der geringsten Anzahl Schwächen als bestes Standortgebiet sowohl für HAA wie auch für SMA aus (Kap. 5.4 in Nagra 2024i).

Diese Vorteile lassen sich mit vier Eigenschaften von NL begründen, welche im Folgenden zusammengefasst werden (vgl. dazu die Darlegungen in den betreffenden Kapiteln in Nagra 2024i). Sie sind ausschlaggebend für die Standortwahl für HAA und SMA.

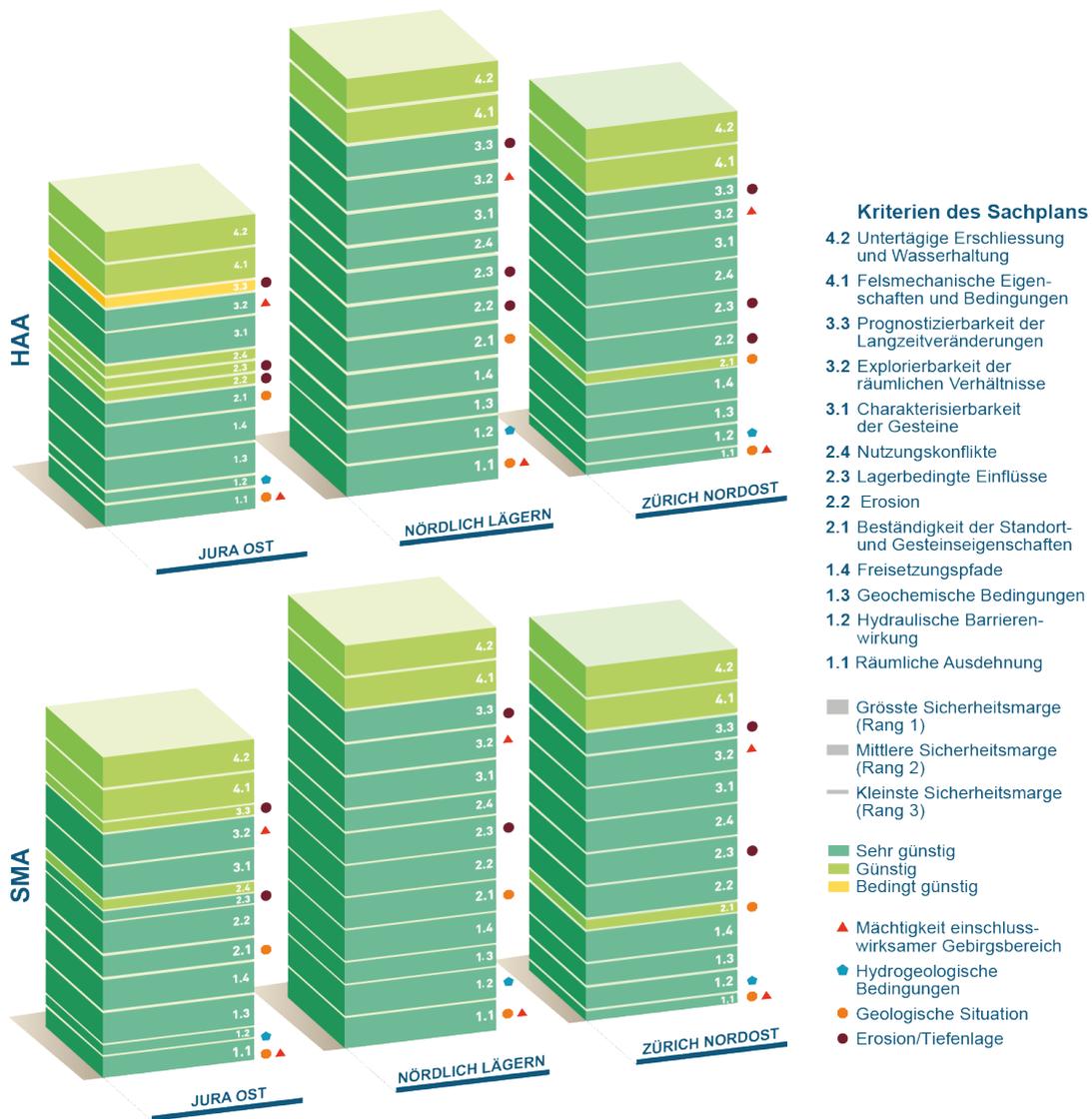


Fig. 5-2: Aus der Rangierung resultierende qualitative Bewertungen der 13 SGT-Kriterien für HAA und SMA

Kopie der Fig. 5-2 in Nagra (2024i).

Die Farbgebung ist identisch mit derjenigen aus der Nutzwertanalyse (Fig. 5-1), während die Grösse der Sicherheitsmarge (bzw. der Rang) durch die Höhe der Blöcke dargestellt wird.

5.2.1 Die Mächtigkeit des EG ist in NL am grössten

Alle Standortgebiete verfügen über *sehr günstige* räumliche Verhältnisse (Kr.1.1; Kap. 4.1.1 in Nagra 2024i) mit mächtigen einschlusswirksamen Gesteinspaketen, in NL ist die vertikale Ausdehnung des EG mit über 300 m aber am mächtigsten (Fig. 5-3 und Kap 4.1.1.2 in Nagra 2024i): Dies ist sowohl für das HAA- als auch für das SMA-Lager bezüglich der Rückhaltewirkung der geologischen Barriere von Vorteil. Insbesondere die Distanz von der Lagerebene zum nächstliegenden Aquifer oberhalb des Opalinustons ist in NL am grössten. Die Distanz von der Lagerebene zum EG-begrenzenden Keuper-Aquifer unterhalb des Opalinustons ist in allen Standortgebieten ähnlich. Der Keuper-Aquifer in NL ist an lokal auftretende, mit Sandstein gefüllte Rinnen gebunden. Sein räumliches Auftreten ist dadurch heterogen und die Wasserzirkulation beschränkt. Im Unterschied zu NL umfasst der Keuper-Aquifer in JO und ZNO weitere darüberliegende Gesteinsschichten mit erhöhter Durchlässigkeit. Somit ist hier der EG nach unten durch diese höhererliegende Schicht des Keuper-Aquifers begrenzt. Wo in NL der Keuper-Aquifer nicht auftritt (keine mit Sandstein gefüllte Rinnen), fällt die Mächtigkeit des EG noch deutlich grösser aus, nämlich ~400 m bis zum Muschelkalk-Aquifer. In dieser Situation fällt auch der Transportpfad für Radionuklide zur unteren Begrenzung des EG erheblich länger aus und die Rückhaltewirkung wird verstärkt. Dies ist insbesondere für das HAA-Lager relevant.

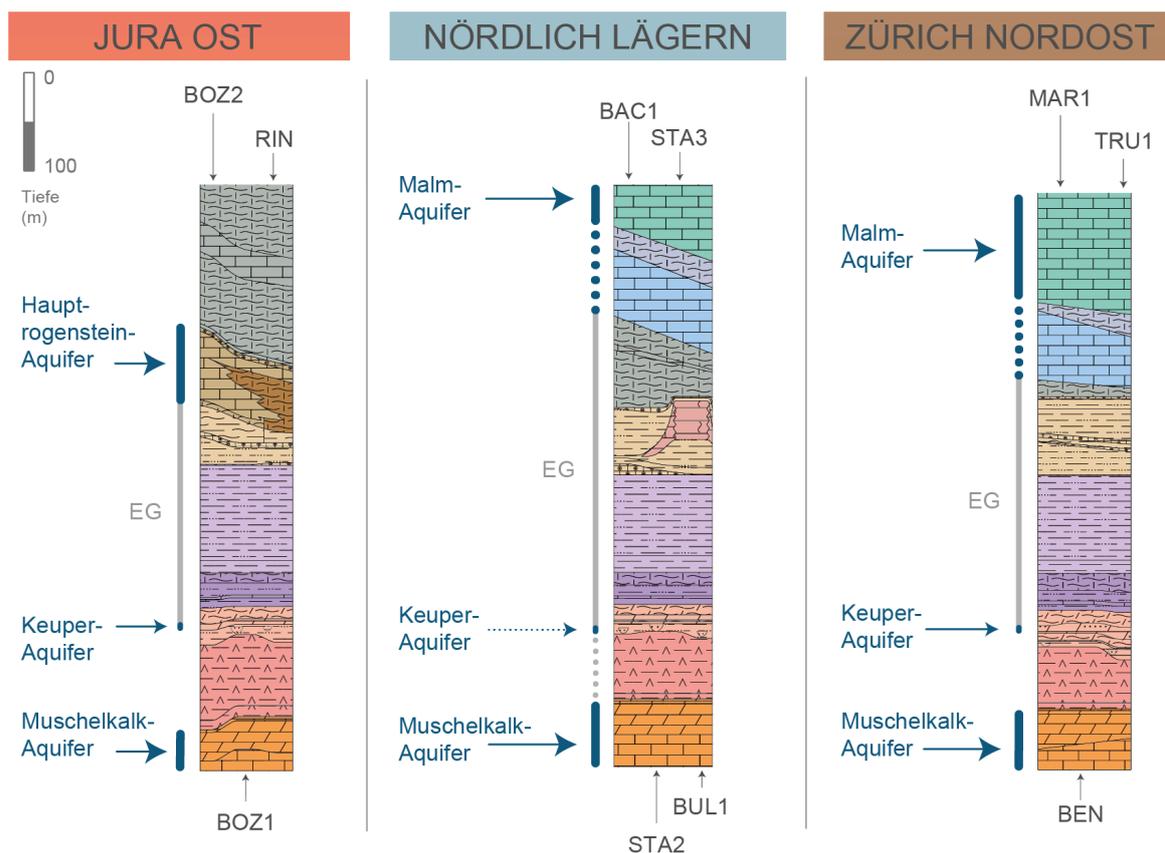


Fig. 5-3: Vertikale Ausdehnung der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche innerhalb der potenziellen Lagerzonen in den drei Standortgebieten

Dargestellt an geologischen Sammelprofilen. In den potenziellen Lagerzonen umfasst der EG Mächtigkeiten von rund 200 – 260 m (Jura Ost), 290 – 380 m resp. bis zu 400 m (Nördlich Lägern), 260 – 300 m (Zürich Nordost). Basierend auf Fig. 4-140 in Nagra (2024e).

5.2.2 Die hydrogeologischen Bedingungen des EG sind in NL am günstigsten

Alle EG weisen eine sehr günstige hydraulische Barrierewirkung auf (Kr 1.2; Kap. 4.1.2 in Nagra 2024i), durch die grösste Distanz von der Lagerebene zum nächstliegenden Aquifer oberhalb des Opalinustons sind die hydrogeologischen Bedingungen in NL aber am günstigsten (Fig. 5-3). Zusätzlich ist auch die regionale hydrogeologische Situation *sehr günstig* für die langfristige Isolation der Abfälle (Kap. 4.1.2.3 in Nagra 2024i): Das Porenwasser des Opalinustons weist in NL einen besonders hohen Anteil an alten Komponenten auf und das Grundwasser im Malm-Aquifer ist durch besonders hohe Verweilzeiten gekennzeichnet, was auf vergleichsweise stagnierende hydrogeologische Verhältnisse schliessen lässt. Auch die im Keuper in NL beobachteten Grundwasser-Verweilzeiten sind gross, falls bzw. wo Grundwasser überhaupt vorkommt. In ZNO zeigen die Bohrungen im Nordwesten im Vergleich zu NL eine stärkere Interaktion des Malm-Aquifers mit jüngeren meteorischen Wässern und in JO deuten meteorische Signaturen auf eine stärkere Anbindung der Aquifere an oberflächennahe Fließsysteme hin. Die hydrogeologische Situation in NL wird deshalb im Hinblick auf die langfristige Isolation der Abfälle als am günstigsten betrachtet.

5.2.3 Die geologische Situation im EG ist in NL am einfachsten

Alle EG sind langfristig geologisch stabil (Kr 2.1, Kap. 4.2.1 in Nagra 2024i), aber in NL sind die Gesteine am ruhigsten gelagert. Das ist für beide Lagertypen *sehr günstig* sowohl hinsichtlich der heutigen Qualität der geologischen Barriere (Kr 1.1, Kap. 4.1.1.3 in Nagra 2024i) wie auch hinsichtlich der langfristigen Beständigkeit der Gesteinseigenschaften im EG (Kr 2.1, Kap. 4.2.1.2 in Nagra 2024i):

Deformation durch geologische Prozesse wird bevorzugt entlang bereits vorhandener Strukturen oder durch Reaktivierung von Vorläuferstrukturen aufgenommen. Bei zukünftiger Deformation wird deshalb zuerst eine Reaktivierung bestehender grösserer Störungszonen erwartet. Zu solchen Störungszonen kann bei der Anordnung des geologischen Tiefenlagers in allen Standortgebieten genügend Abstand eingehalten werden.

Im Bereich der potenziellen Lagerzonen gibt es aber Unterschiede in den tektonischen Verhältnissen, die sich in seismisch kartierbaren Störungen widerspiegeln (Fig. 5-4). ZNO liegt sehr nahe am Hegau-Bodensee-Graben, einer noch heute seismisch aktiven Dehnungszone. Im Bereich der potenziellen Lagerzone liegen in ZNO seismisch kartierbare Störungen auf allen relevanten Horizonten vor. In JO sind die Auswirkungen der Kompression durch die Alpenbildung insbesondere im westlichen und zentralen Teil der potenziellen Lagerzone auf der Obergrenze der Muschelkalk-Gruppe in der Seismik deutlich sichtbar. NL liegt ebenfalls im Einflussbereich der alpinen Kompressionstektonik, der Bereich der potenziellen Lagerzone ist hier aber weit weniger stark davon betroffen. Bis auf eine allfällige Ausnahme unterhalb des Stadlerbergs (westlich der Bohrung STA2-1, vgl. Fig. 5-4) sind keine Störungen seismisch kartierbar. Damit weist NL nebst der besten Qualität des Platzangebots auch die besten Voraussetzungen für die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften auf.

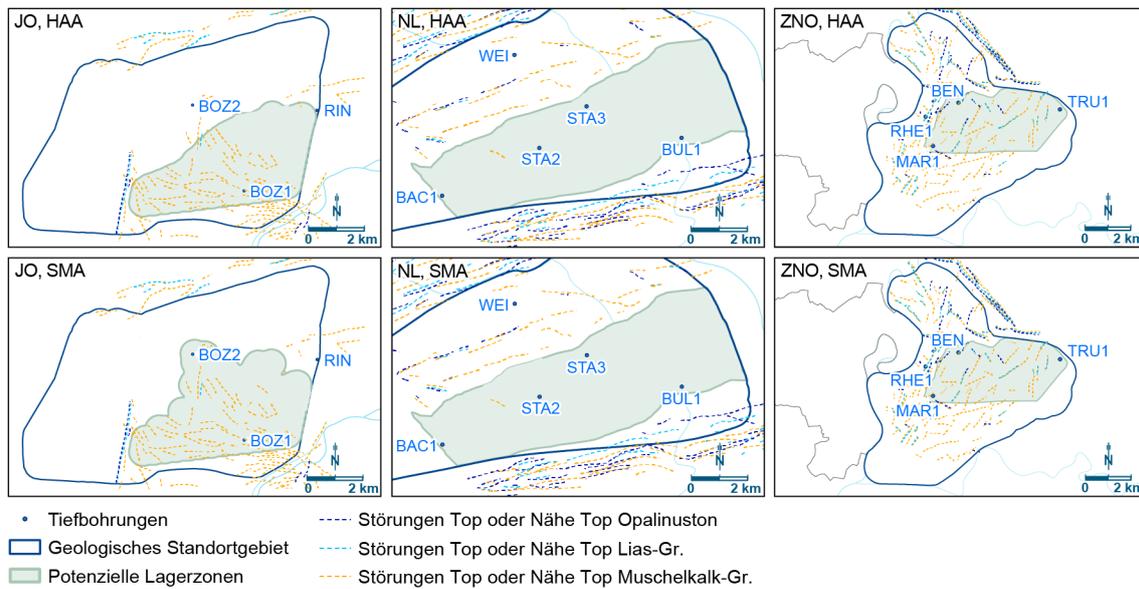


Fig. 5-4: Die seismisch kartierbaren Störungen in und um die potenziellen Lagerzonen für HAA und SMA in den geologischen Standortgebieten
 Basierend auf Datengrundlage in Kap. 4.3.4 in Nagra (2024e).

5.2.4 Der Schutz vor Erosion ist in NL am besten

Alle EG bieten langfristig Schutz vor Erosion (Kr 2.2, Kap. 4.2.2 in Nagra 2024i) und geologische Verhältnisse, in denen die Langzeitstabilität des Barrierensystems gegenüber langfristigen, lagerbedingten Prozessen und Wechselwirkungen gewährleistet werden kann (Kr 2.3, Kap. 4.2.3 in Nagra 2024i). Betrachtungen zur Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen des geologischen Tiefenlagersystems verdeutlichen, dass auch bei ungünstigen Annahmen die Langzeitstabilität der geologischen Barriere in NL *sehr günstig* und im Quervergleich am grössten ist (Kr 3.3, Kap. 4.3.3 in Nagra 2024i).

NL erweist sich als der am besten vor künftiger *Erosion* geschützte Standort (Kap. 4.2.2 in Nagra 2024i): Dies ist aufgrund des langen Betrachtungszeitraums insbesondere für das HAA-Lager relevant. Künftige glaziale und nicht-glaziale Erosionsprozesse dürften mit denen des jüngsten Zeitabschnittes der Erdgeschichte, des Quartärs, vergleichbar sein, allerdings mit geringeren Raten. Nur Gletscher sind in der Lage, noch tiefer als bis zum heutigen Flussniveau zu erodieren. Die wichtigsten Faktoren, welche die Robustheit der Standortgebiete bezogen auf die langfristigen Auswirkungen der Erosion beeinflussen, sind nebst der lokalen Topographie über dem Lagerstandort deshalb die Ausdehnung der Vergletscherungen, die Tiefe der Lagerebene sowie die Erodierbarkeit des Schichtpakets über dem Opalinuston. In einer systematischen Betrachtung der zukünftigen Erosion zeigt sich, dass JO sensitiv auf die Entwicklung der lokalen Topographie reagiert. In NL und ZNO sind die Verhältnisse zum langfristigen Erhalt der für die Selbstabdichtung als sicher eingestuft Restüberdeckung von 200 m sehr günstig, NL weist jedoch die grösseren Sicherheitsmargen auf (Fig. 5-5).

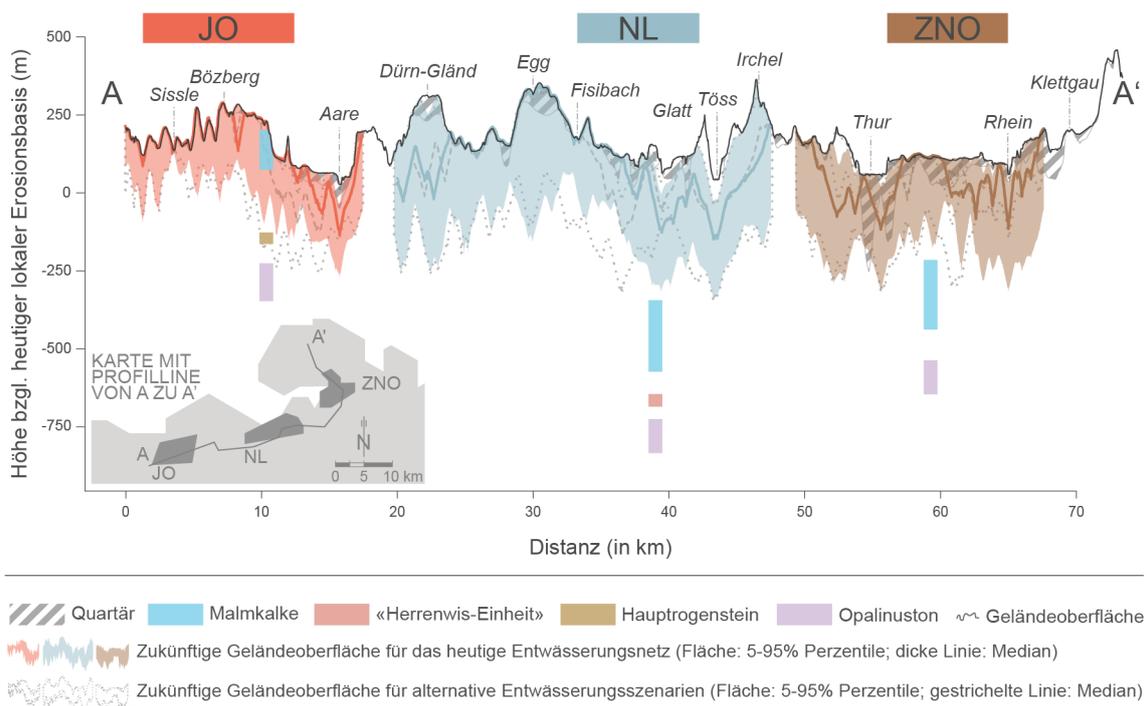


Fig. 5-5: Syntheseprofile zur Visualisierung zukünftiger Erosion in den Standortgebieten
Basierend auf Fig. 6-47 in Nagra (2024e).

Auch hinsichtlich *lagerbedingter Einflüsse* weist NL die günstigsten Bedingungen zum Erhalt der Barriereigenschaften auf (Kap. 4.2.3 in Nagra 2024i): Das Ausmass der lagerbedingten Einflüsse hängt von der Lagerauslegung sowie den Eigenschaften des Wirtgesteins und den standortspezifischen Zustandsgrössen auf der Lagerebene ab. Der Opalinuston weist in allen Standortgebieten einen ähnlichen Aufbau und ähnliche geologische Eigenschaften auf und das Spannungsregime ist in allen drei Standortgebieten ähnlich. Unterschiede in den standortspezifischen Spannungsverhältnissen ergeben sich deshalb aus der Lagertiefe. Bei gleicher Lagerauslegung herrschen auf einer tiefer gelegenen Lagerebene vorteilhaftere Verhältnisse gegenüber thermischen und gasbedingten Überdrücken. NL weist sowohl für ein HAA-Lager als auch für ein SMA-Lager *sehr günstige* Bedingungen und, bei gleicher Lagerauslegung, die grössten Sicherheitsmargen zum langfristigen Erhalt der Barriereigenschaften im EG auf.

Der sicherheitstechnische Vergleich zeigt damit, dass Nördlich Lägern sowohl für HAA wie auch für SMA über die sicherste Situation für ein geologisches Tiefenlager verfügt.

5.3 Ein Lager für alle Abfalltypen der Schweiz

Im sicherheitstechnischen Vergleich wurde die Eignung von Nördlich Lägern auch als Standort für ein Kombilager mit gemeinsam genutzten Zugängen zu den beiden Lagerteilen explizit geprüft und bestätigt. Die Aussagen zu den radiologischen Auswirkungen (vgl. Kap. 4.4) gelten für das gesamte Lager (Kap. 6.4 in Nagra 2024j). Weiter können die Lagerteile für HAA und für SMA so angelegt werden, dass sie sich nicht gegenseitig negativ beeinflussen (Kap. 4.1.2 in Nagra 2024l). Mit einem gemeinsam genutzten Zugangsbereich weist das Tiefenlager zudem ein insgesamt grösseres Verfüllvolumen auf. Dieses steht der Speicherung der insbesondere im SMA-Lagerteil produzierten Gase zusätzlich zur Verfügung, wodurch der Gasdruck weniger ansteigt. Damit wird die Sicherheitsmarge bezüglich des Erhalts der Barriereigenschaften in einem Kombilager im Vergleich zu zwei getrennten Tiefenlagern für SMA und HAA sogar leicht erhöht (Kap. 4.1.2 in Nagra 2024l).

Durch die Realisierung eines Kombilagern mit gemeinsam genutzten Zugängen ergeben sich auch Synergien bei Bau, Betrieb und Verschluss des geologischen Tiefenlagers (Kap. 10 in Nagra 2020): Die zu erstellenden Anlagen, welche gebaut, betrieben und stillgelegt oder verschlossen werden müssen, werden sowohl an der Oberfläche als auch untertag reduziert. Das führt zu einem haushälterischen Umgang bezüglich der Nutzung des Untergrundes und des generellen Ressourcenbedarfs. Die Emissionen werden aufgrund eines geringeren Bauvolumens, geringerer Ausbruchsmengen, weniger Transporte und eines geringeren Energiebedarfs reduziert.

Durch entsprechende Auslegung und mit geeigneten Massnahmen kann sichergestellt werden, dass ein Kombilager die gleichen sicherheitstechnischen Anforderungen bezüglich Betriebs- und Langzeitsicherheit erfüllt wie zwei Einzellager (Kap. 2 in Band 5 aus Nagra 2023a) und ein sicherer Bau, Betrieb und Verschluss gewährleistet werden kann.

Insgesamt bietet Nördlich Lägern dadurch die besten Rahmenbedingungen für ein geologisches Tiefenlager in der Schweiz.

Für die Entwicklung des geologischen Tiefenlagers auf den gewählten Standort hin besteht weiterhin grosser Handlungsspielraum. Die Entwicklung der Anlage verfolgt den Stand der Technik und Wissenschaft. Sicherheit hat dabei oberste Priorität. Gleichzeitig sorgt der haushälterische Umgang mit den vorhandenen Ressourcen für eine bessere Umsetzung und Reduktion der Auswirkungen auf Raum und Umwelt.

6 Literaturverzeichnis

- BFE (2008): Sachplan Geologische Tiefenlager: Konzeptteil. BFE 2. April 2008 (Revision vom 30. November 2011). Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.
- BFE (2018): Sachplan geologische Tiefenlager: Ergebnisbericht zu Etappe 2: Festlegungen und Objektblätter. Bundesamt für Energie BFE, 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 (2023): Geologische Tiefenlager. Ausgabe Dezember 2020 (Änderung vom 1. November 2023). Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-G03/d. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- KEG (2003): Kernenergiegesetz (KEG) vom 21. März 2003, Stand am 1. Januar 2024. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.1, Schweiz.
- KEV (2004): Kernenergieverordnung (KEV) vom 10. Dezember 2004, Stand am 1. Januar 2024. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.11, Schweiz.
- Nagra (2008): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager: Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse. Nagra Technischer Bericht NTB 08-03.
- Nagra (2014): Textband: Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT-Etappe 2: Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete. Nagra Technischer Bericht NTB 14-01.
- Nagra (2020): Standortunabhängiger Vergleich eines Kombilagers mit zwei Einzellagern hinsichtlich Bau- und Betriebsabläufe sowie Umwelt. Nagra Arbeitsbericht NAB 19-15.
- Nagra (2022): Module der Lagerarchitektur. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-35.
- Nagra (2023a): Bautechnisches Dossier. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 1-9.
- Nagra (2023b): Modellhaftes Inventar für radioaktive Materialien MIRAM-RBG. Nagra Technischer Bericht NTB 22-05.
- Nagra (2024a): Abfallzuteilung und Betrachtungszeitraum für den Standortvergleich und Nachweiszeitraum für den Sicherheitsnachweis für das geologische Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-05.
- Nagra (2024b): Definition der Bewertungsobjekte für den sicherheitstechnischen Vergleich der Standorte in Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-01 Rev. 1.
- Nagra (2024c): Geological long-term evolution: Erosion. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-15.

- Nagra (2024d): Geological Properties of the Jura Ost, Nördlich Lägern and Zürich Nordost Siting Regions for Safety Assessment. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-10 Rev. 1.
- Nagra (2024e): Geosynthesis of Northern Switzerland. Nagra Technischer Bericht NTB 24-17.
- Nagra (2024f): Model Supported Assessment of the Containment-Providing Rock Zone in Support of the Site Selection. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-26.
- Nagra (2024g): Model-Based Performance Assessment for a Combined Repository. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-25.
- Nagra (2024h): Phenomenological Description of the Evolution of a Geological Repository for Radioactive Waste in Opalinus Clay. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-20 Rev. 1.
- Nagra (2024i): Qualitative Bewertung für den sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-23 Rev. 1.
- Nagra (2024j): Radiological Consequence Analysis for a Deep Geological Repository in Northern Switzerland. Nagra Technical Report NTB 24-18.
- Nagra (2024k): Radiological Consequences of Deep Geological Repository Excavation by Erosive Processes. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-08 Rev. 1.
- Nagra (2024l): Safety and Repository Concept and Provisional Design. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-18 Rev. 1.
- StSV (2017): Strahlenschutzverordnung (StSV) vom 26. April 2017, Stand am 1. Januar 2022. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 814.501, Schweiz.

Figurenverzeichnis

Fig. 2-1:	Die Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit gemäss SGT.....	4
Fig. 2-2:	Karte mit den drei Standortgebieten, die gemäss Entscheid des Bundesrates von 2018 in SGT-Etappe 3 vertieft untersucht wurden	6
Fig. 4-1:	Die wichtigsten geologische Datenquellen in der Nordschweiz.....	9
Fig. 4-2:	Entwicklung der geologischen Datengrundlage einiger Schlüsselparameter in den Jahren vor und nach der Tiefbohrkampagne, die im Hinblick auf die Standortevaluation für ein geologisches Tiefenlager in der Schweiz erarbeitet wurde	11
Fig. 4-3:	Generische Zusammensetzung der Module des Tiefenlagers und deren Hauptabmessungen gemäss aktueller Auslegung	13
Fig. 4-4:	Bewertungsobjekte Jura Ost für HAA (links) und SMA (rechts).....	15
Fig. 4-5:	Bewertungsobjekte Nördlich Lägern für HAA (links) und SMA (rechts)	16
Fig. 4-6:	Bewertungsobjekte Zürich Nordost für HAA (links) und SMA (rechts)	17
Fig. 5-1:	Aus den Nutzwertanalysen resultierende qualitative Bewertungen der 13 SGT-Kriterien für HAA und SMA	20
Fig. 5-2:	Aus der Rangierung resultierende qualitative Bewertungen der 13 SGT-Kriterien für HAA und SMA	22
Fig. 5-3:	Vertikale Ausdehnung der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche innerhalb der potenziellen Lagerzonen in den drei Standortgebieten.....	23
Fig. 5-4:	Die seismisch kartierbaren Störungen in und um die potenziellen Lagerzonen für HAA und SMA in den geologischen Standortgebieten.....	25
Fig. 5-5:	Synthesprofile zur Visualisierung zukünftiger Erosion in den Standortgebieten	26

Abkürzungsverzeichnis

AG SiKa/KES	Arbeitsgruppe Sicherheit Kantone/Kantonale Expertengruppe Sicherheit
BFE	Bundesamt für Energie
EG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
HAA	Hochaktive Abfälle (abgebrannte Brennelemente und hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung)
JO	Geologisches Standortgebiet Jura Ost
KEG	Kernenergiegesetz
KEV	Kernergieverordnung
KNS	Kommission für nukleare Sicherheit
Kr	Kriterium / Kriterien
NL	Geologisches Standortgebiet Nördlich Lägern
MIRAM	Modellhaftes Inventar radioaktiver Materialien
RBG	Rahmenbewilligungsgesuch
SGT	Sachplan geologische Tiefenlager
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle
StSV	Strahlenschutzverordnung
ZNO	Geologisches Standortgebiet Zürich Nordost