



ARBEITSBERICHT NAB 24-01 Rev. 1

Definition der Bewertungsobjekte für den
sicherheitstechnischen Vergleich der
Standorte in Etappe 3 des Sachplans
geologische Tiefenlager

Oktober 2024



ARBEITSBERICHT

NAB 24-01 Rev. 1

Definition der Bewertungsobjekte für den
sicherheitstechnischen Vergleich der
Standorte in Etappe 3 des Sachplans
geologische Tiefenlager

Oktober 2024

STICHWÖRTER

Rahmenbewilligungsgesuch, geologische Tiefenlager,
Bewertungsobjekte, Lagerfeldplatzierung,
einschlusswirksamer Gebirgsbereich

**Nagra | Nationale Genossenschaft
für die Lagerung radioaktiver Abfälle**
Hardstrasse 73 | 5430 Wettingen | Schweiz
+41 56 437 11 11 | info@nagra.ch | nagra.ch

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

NAB 24-01, Mai 2025: Grund der Revision

Dieser Bericht wurde im Mai 2025 revidiert. Es wurden Referenzierungen in den Kap. 3, 4 und 5 präzisiert und ergänzt. Weiter wurden ausgewählte Formulierungen optimiert sowie das Kapitel 6 mit einem Ausblick auf die weitere Projektierung des geologischen Tiefenlagers ergänzt.

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

Zusammenfassung

In diesem Bericht wird gemäss den Vorgaben des ENSI für den sicherheitstechnischen Vergleich pro Lagertyp und Standortgebiet der einschlusswirksame Gebirgsbereich zur Erarbeitung der standortspezifischen Lagerprojekte räumlich abgegrenzt.

Zur Definition der Bewertungsobjekte zum Zweck des sicherheitstechnischen Vergleichs wird der untertägige Raum der Standortgebiete mittels raumwirksamer geologischer Elemente schrittweise analysiert und eingeeignet. Diese Schritte beinhalten die Ermittlung der potenziellen Lagerzone, die vertikale Abgrenzung des EG, die Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede im Wirtgestein, die Analyse der Rückhaltewirkung des Wirtgesteins, die Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede in den Rahmengesteinen, die laterale Abgrenzung von EG und Platzreserven sowie die vorläufige Anordnung der Lagerprojekte.

Die Analyse des untertägigen Raums zeigt, dass das Platzangebot in allen Standortgebieten ein Mehrfaches des Platzbedarfs sowohl für ein Lager für hochaktive Abfälle als auch für ein Lager für schwach- und mittelaktive Abfälle beinhaltet. Es besteht in allen Standortgebieten eine grosse Flexibilität bei der Lagerfeldplatzierung. Damit der Fokus des sicherheitstechnischen Vergleichs auf den Unterschieden der Standorteigenschaften liegt, wurden für jeden Lagertyp standortspezifische Lagerprojekte mit identischen Auslegungsgrundsätzen bzw. gleichem Platzbedarf für die Lagerfelder erarbeitet. Die Bewertungsobjekte sind so definiert, dass für die Standortwahl in jedem Standortgebiet und für jeden Lagertyp eine korrekte Bewertung vorgenommen werden kann.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	V
Figurenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Zielsetzung	1
1.2 Struktur des Berichts.....	1
2 Vorgaben an die Standortwahl in SGT-Etappe 3	3
3 Vorgehen bei der Definition der Bewertungsobjekte und verwendete Grundlagen.....	5
3.1 Einengung des untertägigen Raums zur Abgrenzung des EG	6
3.1.1 Ermittlung der potenziellen Lagerzone im Wirtgestein.....	6
3.1.2 Vertikale Abgrenzung des EG	7
3.1.3 Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede im Wirtgestein	7
3.1.4 Analyse der Rückhaltewirkung des Wirtgesteins	8
3.1.5 Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede in den Rahmengesteinen und Wahl des bevorzugten Bereichs für die Lagerfeldplatzierung.....	8
3.1.6 Laterale Abgrenzung des EG und der Platzreserven	9
3.2 Vorläufige Anordnung der Lagerprojekte	9
4 Definition der Bewertungsobjekte für HAA	11
4.1 Standortgebiet Jura Ost.....	11
4.1.1 Einengung des untertägigen Raums zur Abgrenzung des EG	11
4.1.1.1 Ermittlung der potenziellen Lagerzone.....	11
4.1.1.2 Vertikale Ausdehnung des EG in der potenziellen Lagerzone	11
4.1.1.3 Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede im Wirtgestein	11
4.1.1.4 Analyse der Rückhaltewirkung des Wirtgesteins	12
4.1.1.5 Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede in den Rahmengesteinen.....	13
4.1.1.6 Laterale Abgrenzung des EG und der Platzreserven	15
4.1.2 Vorläufige Auslegung und Projektierung des geologischen Tiefenlagers	15
4.2 Standortgebiet Nördlich Lägern	17
4.2.1 Einengung des untertägigen Raums zur Abgrenzung des EG	17
4.2.1.1 Ermittlung der potenziellen Lagerzone.....	17
4.2.1.2 Vertikale Ausdehnung des EG in der potenziellen Lagerzone	17
4.2.1.3 Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede im Wirtgestein	17
4.2.1.4 Analyse der Rückhaltewirkung des Wirtgesteins	18

4.2.1.5	Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede in den Rahmengesteinen.....	19
4.2.1.6	Laterale Ausdehnung des EG und der Platzreserven.....	21
4.2.2	Vorläufige Auslegung und Projektierung des geologischen Tiefenlagers	21
4.3	Standortgebiet Zürich Nordost	23
4.3.1	Einengung des untertägigen Raums zur Abgrenzung des EG	23
4.3.1.1	Ermittlung der potenziellen Lagerzone.....	23
4.3.1.2	Vertikale Ausdehnung des EG in der potenziellen Lagerzone	23
4.3.1.3	Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede im Wirtgestein	23
4.3.1.4	Analyse der Rückhaltewirkung des Wirtgesteins	24
4.3.1.5	Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede in den Rahmengesteinen.....	25
4.3.1.6	Laterale Ausdehnung des EG und der Platzreserven.....	27
4.3.2	Vorläufige Auslegung und Projektierung des geologischen Tiefenlagers.....	27
5	Definition der Bewertungsobjekte für SMA	29
5.1	Standortgebiet Jura Ost.....	29
5.1.1	Einengung des untertägigen Raums zur Abgrenzung des EG	29
5.1.2	Vorläufige Auslegung und Projektierung des geologischen Tiefenlagers	31
5.2	Standortgebiet Nördlich Lägern	33
5.2.1	Einengung des untertägigen Raums zur Abgrenzung des EG	33
5.2.2	Vorläufige Auslegung und Projektierung des geologischen Tiefenlagers	35
5.3	Standortgebiet Zürich Nordost	37
5.3.1	Einengung des untertägigen Raums zur Abgrenzung des EG	37
5.3.2	Vorläufige Auslegung und Projektierung des geologischen Tiefenlagers	39
6	Schlussfolgerungen	41
7	Literaturverzeichnis	43

Tabellenverzeichnis

Tab. 4-1:	Gegenüberstellung der Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Bereiche JO West und Ost anhand der 13 SGT-Kriterien	13
Tab. 4-2:	Gegenüberstellung der Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Bereiche NL West und Ost anhand der 13 SGT-Kriterien	19
Tab. 4-3:	Gegenüberstellung der Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Bereiche ZNO West, Mitte und Ost anhand der 13 SGT-Kriterien.....	25

Figurenverzeichnis

Fig. 3-1:	Vorgehensschritte bei der Definition der Bewertungsobjekte für HAA und SMA.....	6
Fig. 3-2:	Generisches Kombilager mit Hauptabmessungen gemäss aktueller Lagerauslegung.....	10
Fig. 4-1:	Potenzielle Lagerzone für die Platzierung des HAA-Lagerfelds im Standortgebiet Jura Ost.....	12
Fig. 4-2:	Definition des Bewertungsobjektes HAA Jura Ost	16
Fig. 4-3:	Potenzielle Lagerzone für die Platzierung des HAA-Lagerfelds im Standortgebiet Nördlich Lägern	18
Fig. 4-4:	Definition des Bewertungsobjektes HAA Nördlich Lägern	22
Fig. 4-5:	Potenzielle Lagerzone für die Platzierung des HAA-Lagerfelds im Standortgebiet Zürich Nordost	24
Fig. 4-6:	Definition des Bewertungsobjektes HAA Zürich Nordost	28
Fig. 5-1:	Potenzielle Lagerzone für die Platzierung des SMA-Lagerfelds im Standortgebiet Jura Ost.....	30
Fig. 5-2:	Definition des Bewertungsobjektes SMA Jura Ost	32
Fig. 5-3:	Potenzielle Lagerzone für die Platzierung des SMA-Lagerfelds im Standortgebiet Nördlich Lägern	34
Fig. 5-4:	Definition des Bewertungsobjektes SMA Nördlich Lägern	36
Fig. 5-5:	Potenzielle Lagerzone für die Platzierung des SMA-Lagerfelds im Standortgebiet Zürich Nordost	38
Fig. 5-6:	Definition des Bewertungsobjektes SMA Zürich Nordost	40

Abkürzungsverzeichnis

BFE	Bundesamt für Energie
EG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
HAA	Hochaktive Abfälle (abgebrannte Brennelemente und hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung)
HEB	Haupterschliessungsbereich
JO	Geologisches Standortgebiet Jura Ost
KEV	Kernenergieverordnung
NL	Geologisches Standortgebiet Nördlich Lägern
OFA	Oberflächenanlage
SGT	Sachplan geologische Tiefenlager
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle
ZNO	Geologisches Standortgebiet Zürich Nordost

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Zielsetzung

In Etappe 3 des Sachplans geologisches Tiefenlager (SGT) wählt die Nagra aus den weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebieten Jura Ost (JO), Nördlich Lägern (NL) und Zürich Nordost (ZNO) mittels sicherheitstechnischen Vergleichs denjenigen Standort aus, an welchem das Tiefenlager realisiert werden soll. Die Standortwahl erfolgt aufgrund ausschlaggebender Eigenschaften der Standortgebiete (Art. 62 KEV).

Gemäss den Vorgaben des eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats (ENSI) braucht es für den sicherheitstechnischen Vergleich eine Abgrenzung von einschlusswirksamen Gebirgsbereichen (EG), standortspezifische Lagerprojekte, Sicherheitsanalysen und die qualitative Bewertung der EG anhand von Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit (ENSI 2018).

In vorliegendem Bericht wird festgehalten, wie pro Lagertyp und Standortgebiet der EG und die geologischen Tiefenlager zum Zweck des sicherheitstechnischen Vergleichs in SGT-Etappe 3 definiert und räumlich angeordnet wurden. Diese Elemente bilden als Bewertungsobjekte die Grundlage für die Sicherheitsanalysen für den Standortvergleich und die qualitative Bewertung der Standortgebiete (Nagra 2024e). Dieser Bericht bietet somit eine Grundlage für die Prüfung der «Transparenz und Nachvollziehbarkeit des Vorgehens bei der Erarbeitung des Standortvorschlags» (Prüffrage gem. ENSI 2018).

1.2 Struktur des Berichts

Im Kap. 2 werden die zentralen behördlichen Vorgaben zum EG und zur Anordnung der Lagerprojekte zusammengefasst.

Das Vorgehen bei der Definition der Bewertungsobjekte und die verwendeten Grundlagen sind in Kap. 3 beschrieben.

Die schrittweise Umsetzung der Analysen und die Begründung der Bewertungsobjekte sind Inhalt von Kap. 4 für hochaktive Abfälle (HAA) und Kap. 5 für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA).

Die wichtigsten Schlussfolgerungen für den Standortvergleich werden im Kap. 6 gezogen und die Bewertungsobjekte in Bezug auf die weitere Planung und Realisierung des geologischen Tiefenlagers eingeordnet.

2 Vorgaben an die Standortwahl in SGT-Etappe 3

Die Vorgaben für den sicherheitstechnischen Vergleich der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden Standortgebiete sind in Kap. 4 in ENSI (2018) enthalten. Für vorliegenden Bericht relevant sind insbesondere die Vorgaben hinsichtlich des *Einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* (entsprechendes Kap. 4.2) und in Teilen diejenigen zu *Konzept, Auslegung und Projektierung des geologischen Tiefenlagers* (entsprechendes Kap. 4.3). Sie werden nachfolgend zusammengefasst.

- 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“.
- Der EG hat somit untertägige Teile des Lagers zu umschliessen und ist lateral und vertikal in geeigneter Tiefenlage abzugrenzen. Dabei ist zu begründen, wie raumwirksame Elemente in die Abgrenzung eingeflossen sind. Aus Sicht der Langzeitsicherheit ist es vorteilhaft, wenn die sicherheitstechnischen Eigenschaften des EG eine möglichst geringe Variabilität aufweisen.
- Weiter sind die EG in den Standortgebieten gross genug zu wählen, so dass sie den Platzbedarf des jeweiligen Tiefenlagers umfassen. Darin abzudecken sind auch die bestehenden Ungewissheiten (z. B. bezüglich des verpackten Abfallvolumens sowie bzgl. der geologischen und geomechanischen Eigenschaften des Wirtgesteins). Zudem ist Flexibilität für die Anpassung der Lagerauslegung an die lokalen Gegebenheiten zu gewährleisten. Weitere Platzreserven, die über den Platzbedarf hinausgehen, sind von Vorteil.

Vertikal sind die einschlusswirksamen geologischen Schichten aufgrund ihrer aktuellen und ihrer langzeitlichen Barrierewirkung belastbar abzugrenzen. Der EG soll sich in geeigneter Tiefe befinden und kann sich z. B. durch Diffusion als massgebenden Transportprozess, unabhängige Evidenzen zur Langzeitisolation sowie durch die wirksame Selbstabdichtung und das Rückhaltevermögen auszeichnen.

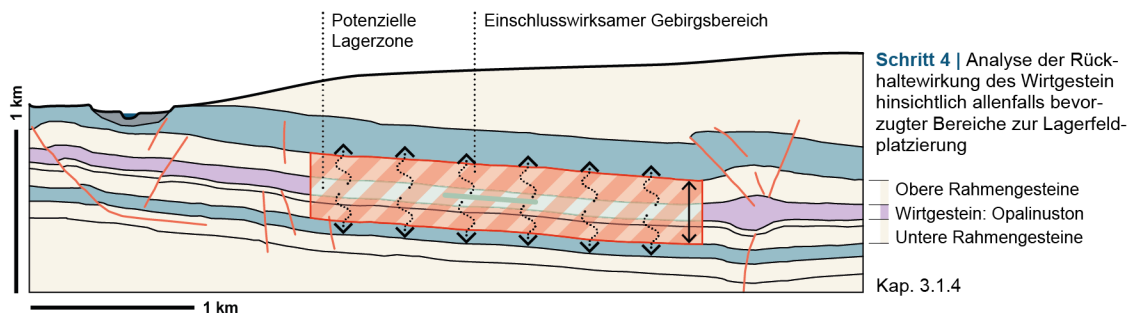
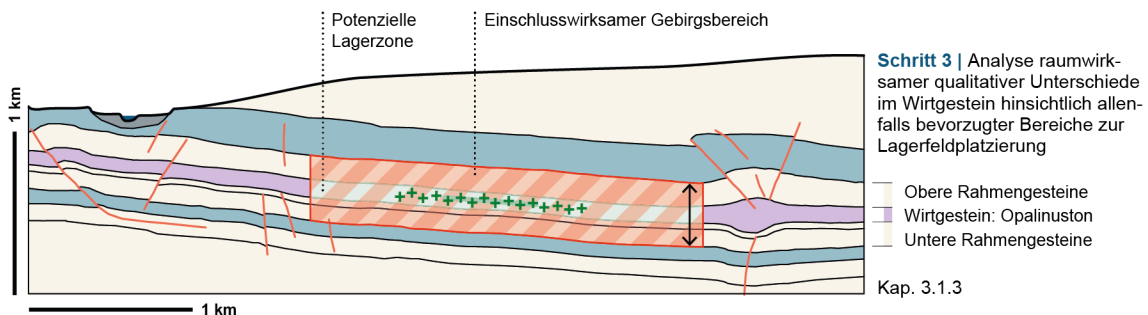
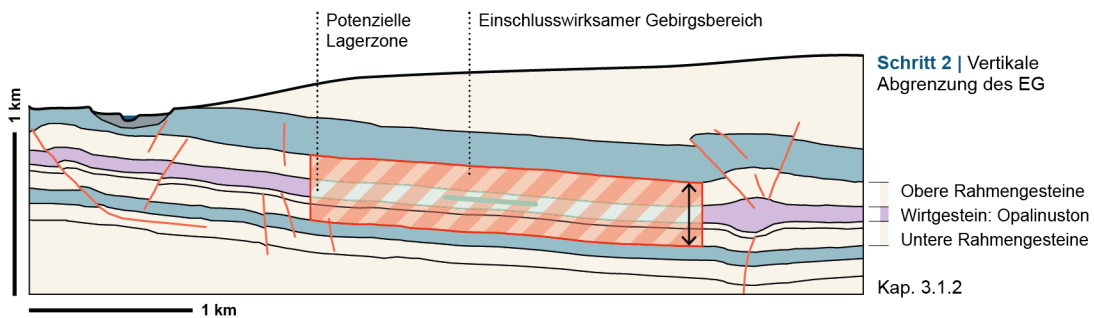
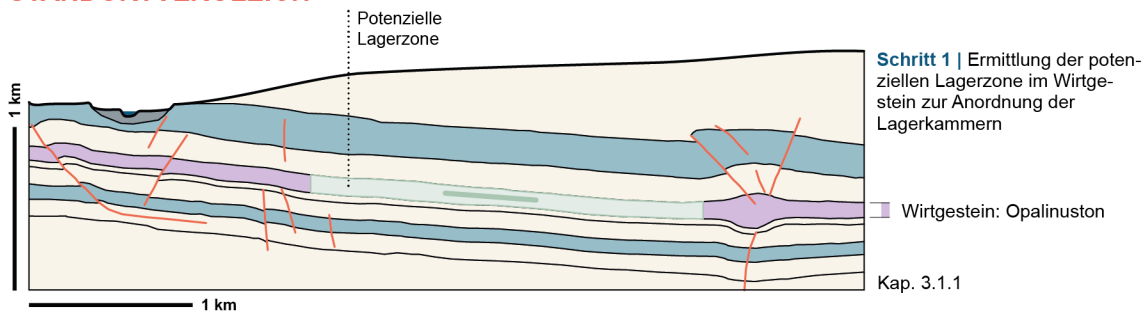
In diesem Vorgehen ist zu beachten, dass die Standortwahl für HAA in einem ersten Schritt und die Standortwahl für SMA in einem zweiten Schritt getroffen wird. Bei der Abgrenzung des EG für ein SMA-Lager ist deshalb der verfügbare untertägige Raum durch den für das HAA-Lager gewählten EG und die zugehörigen Platzreserven eingeschränkt.

- Für die im Standortvergleich verwendeten EG sind standortspezifische Lagerauslegungen zu erarbeiten, in denen die Aspekte von Bau, Betrieb, Rückholung ohne grossen Aufwand, Verschluss und Langzeitsicherheit angemessen berücksichtigt werden. Basis dafür bildet das aktualisierte Gesamtbild der Eigenschaften und Prozesse in den jeweiligen EG sowie ein sicherheitstechnisch geeignetes Lagerkonzept.
- Dazu sind die untertägigen Teile des Lagers anzuordnen und die Standorte der Oberflächeninfrastruktur zu berücksichtigen. Bei der lateralen und vertikalen Lagerfeldplatzierung innerhalb des EG sind fazielle Variationen und das Rückhaltevermögen der enthaltenen Gesteinsbereiche zu berücksichtigen.

3 Vorgehen bei der Definition der Bewertungsobjekte und verwendete Grundlagen

Zur Definition der Bewertungsobjekte wurde der untertägige Raum mittels raumwirksamer Elemente schrittweise analysiert und eingengt. Die einzelnen Vorgehensschritte sind in Fig. 3-1 skizziert und werden in den angegebenen Abschnitten erläutert. Weiter wird die daran anknüpfende vorläufige Anordnung der Lagerprojekte erläutert.

STANDORTVERGLEICH



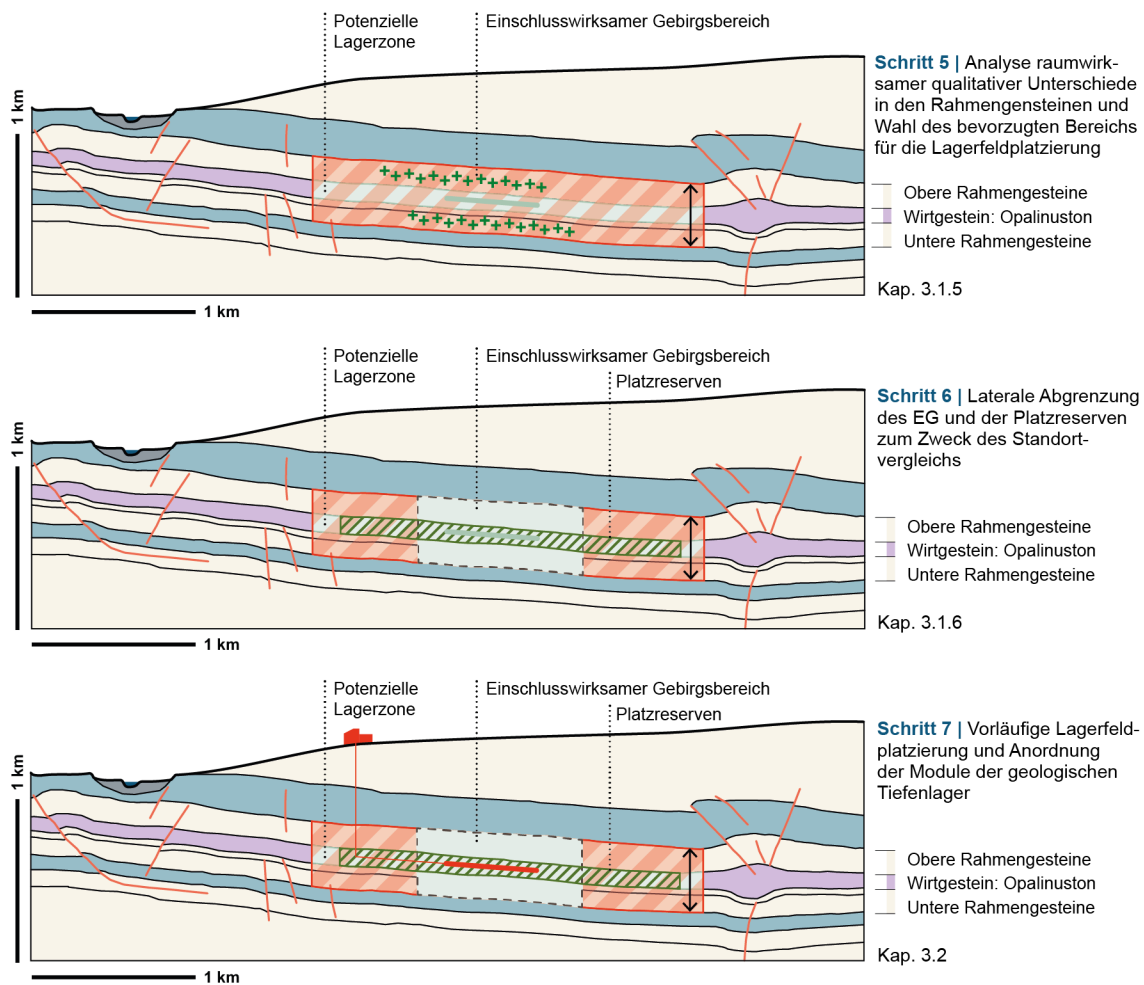


Fig. 3-1: Vorgehensschritte bei der Definition der Bewertungsobjekte für HAA und SMA

3.1 Einengung des untertägigen Raums zur Abgrenzung des EG

Ausgehend von den in SGT-Etappe 1 definierten Standortgebietsgrenzen wurden raumwirksame geologische Elemente in einem mehrstufigen Vorgehen analysiert, um den untertägigen Raum einzuengen, die EG abzugrenzen und die Bewertungsobjekte zu definieren.

Diese Schritte beruhen auf der umfangreichen Erweiterung des Kenntnisstands der drei Standortgebiete durch erdwissenschaftliche Untersuchungen. Die geologischen Grundlagen sind in der Geosynthese für die Nordschweiz zusammengefasst (Nagra 2024c) und die zentralen Bereiche der drei Standortgebiete sind standortspezifisch parametrisiert (Nagra 2024b).

3.1.1 Ermittlung der potenziellen Lagerzone im Wirtgestein

Als erster Schritt wurde die potenzielle Lagerzone für das geologische Tiefenlager ermittelt. Die potenzielle Lagerzone umfasst denjenigen Teil des Wirtgesteins, der für die Anordnung der Lagerkammern berücksichtigt wird. Die Kontur der potenziellen Lagerzone wurde bei geometrisch komplexen Platzverhältnissen generalisiert (Berücksichtigung einer «nutzbaren Breite» von 500 m).

Sie wurde im Bereich mit der einfachsten Geologie innerhalb des mittels 3D-Seismik untersuchten Perimeters angeordnet. Bei dessen Ermittlung wurde insbesondere regionalen Störungszonen ausgewichen. Je nach Standort wurden auch Zonen mit erhöhter tektonischer Komplexität und bedeutende lokale Störungen berücksichtigt. Zu diesen tektonischen Elementen wurde ein Abstand von 200 m eingehalten. Transportmodellierungen bestätigen, dass bei entsprechenden lateralen Transportpfadlängen im Opalinuston die Radionuklidfreisetzung vernachlässigbar ist (Kap. 4.2 in Nagra 2024d). Innerhalb der so ermittelten Bereiche weisen alle Standortgebiete Mächtigkeiten des Opalinustons auf (Kap. 3.3 und Enclosures 3-7a bis 3-7c in Nagra 2024b), welche die Anforderungen an die Länge der vertikalen Transportpfade im intakten Gestein übertreffen (Kap. 4.1 in Nagra 2024d).

Damit sind in diesen Bereichen die Anforderungen an die Transportpfade im intakten Gestein in alle Raumrichtungen erfüllt. Zum langfristigen Erhalt der Barrierewirksamkeit wurde für die potenzielle Lagerzone eine Mindesttiefe respektiert. Für HAA wurde dazu eine Tiefenlage der Mitte des Opalinustons >250 m unter lokaler Erosionsbasis und für SMA eine Tiefenlage der Obergrenze des Opalinustons >350 m unter Terrain berücksichtigt (in Anlehnung an Zielwerte in Tab. 4.4-1 in Nagra 2014b).

3.1.2 Vertikale Abgrenzung des EG

Für die vertikale Abgrenzung des EG wurden die in Frage kommenden Gesteinseinheiten durch erdwissenschaftliche Untersuchungen in Etappe 3 vertieft untersucht. Diverse geologische Datensätze zeigen, dass ober- und unterhalb des Wirtgesteins liegende, mächtige Pakete von Rahmengesteinen zwischen den angrenzenden Aquiferen zu den Sicherheitsfunktionen beisteuern (Kap. 4.9 in Nagra 2024c und Kap. 3.3 in Nagra 2024f). Die Rolle der harten Bänke innerhalb der Rahmengesteine wurde überprüft und ihr Beitrag zur Barrierewirksamkeit aufgezeigt (Kap. 5.2.1 in Nagra 2024d).

3.1.3 Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede im Wirtgestein

Im nächsten Schritt der lateralen Einengung des untertägigen Raums wurde der Opalinuston auf raumwirksame qualitative Unterschiede hinsichtlich seiner Barrierewirkung untersucht. Für jeden betrachteten Aspekt wurde eine Potenzialraumkarte erstellt, welche Hinweise auf bevorzugte und stark bevorzugte Bereiche im Wirtgestein für die Platzierung der Lagerfelder gibt. Die einzelnen Potenzialraumkarten wurden zu einer aggregierten Potenzialraumkarte zusammengefasst, welche die integrierte räumliche Wirkung der qualitativen Unterschiede im Wirtgestein aufzeigt.

Nachfolgend wird für die betrachteten Aspekte erläutert, anhand welcher Indikatoren und Zielwerte die Potenzialraumkarten für HAA und für SMA erstellt wurden.

- Aspekt: Eine grosse *Mächtigkeit des Opalinustons* trägt massgeblich zum Einschluss und zur Rückhaltung der radioaktiven Stoffe und damit zur Qualität der Barriere bei.
 - Indikator: «Mächtigkeit Opalinuston»; bevorzugt ab 100 m / stark bevorzugt ab 110 m (gilt für HAA und SMA) (Kap. 4.1.1 in Nagra 2024d)
- Aspekt: Grosse zusammenhängende Bereiche mit einfachen geologischen Verhältnissen bzw. geringer tektonischer Komplexität bieten Flexibilität bei der Lagerfeldplatzierung. Deshalb wird im Sinne eines sicherheitsgerichteten Vorgehens Abstand gehalten von *seismisch kartierten Störungen auf den Schichtgrenzen des Opalinustons*.
 - Indikator: «Abstand zu Störungen»; bevorzugt ab 100 m / stark bevorzugt ab 200 m (gilt für HAA und SMA) (Kap. 4.2 in Nagra 2024d)

- Aspekt: Die *Tiefenlage* ist von Relevanz für den langfristigen Schutz der technischen und geologischen Barrieren vor Erosionsprozessen an der Erdoberfläche (HAA) sowie hinsichtlich lagerbedingter Einflüsse (SMA).
 - Indikator: «Tiefenlage Mitte Opalinuston unter lokaler Erosionsbasis»; wird aufgrund der unterschiedlich langen Betrachtungszeiträume insbesondere für das HAA-Lager mit Blick auf den Schutz vor Erosion als relevant betrachtet. Aufgrund der unterschiedlichen Charakteristiken der Standortgebiete werden standortspezifische Zielwerte verwendet (in Anlehnung an Zielwerte in Tab. 4.4-1 in Nagra 2014b):
 - Für HAA in NL/ZNO gilt: bevorzugt ab 400 m / stark bevorzugt ab 800 m
 - Für HAA in JO gilt: bevorzugt ab 250 m / stark bevorzugt ab 400 m
 - Indikator: «Tiefenlage Obergrenze Opalinuston unter Terrain»; wird für SMA hinsichtlich Robustheit des EG gegenüber lagerbedingten Einflüssen betrachtet (in Anlehnung an Zielwerte in Tab. 4.4-1 in Nagra 2014b):
 - Für SMA in JO/NL/ZNO gilt: bevorzugt ab 350 m / stark bevorzugt ab 450 m
- Aspekt: Eine *gleichmässige, flache Lagerung* des Wirtgesteins ist von Vorteil für die Lagerauslegung.
 - Indikator: «Neigung Mitte Opalinuston»; bevorzugt <10 % / stark bevorzugt <6 % (gilt für HAA und SMA; in Anlehnung an Zielwerte in Fig. 4-2 im Band 5 in Nagra 2023a; s.a. Fig. 3-2).

3.1.4 Analyse der Rückhaltewirkung des Wirtgesteins

Im nächsten Schritt wurde der Opalinuston innerhalb der potenziellen Lagerzone auf allfällige signifikante Unterschiede in seiner Rückhaltewirkung hin analysiert (Kap. 5.2.1 in Nagra 2024d): Dazu wurde modellunterstützt geprüft, ob bezüglich Rückhaltung aus dem Wirtgestein besonders vorteilhafte Lagerfeldplatzierungen innerhalb der potenziellen Lagerzone bestehen. Für rund 100 einheitliche Flächen in der Grösse eines Lagerfeldes, die gleichmässig in der potenziellen Lagerzone verteilt sind, wurden 3D-Modellrechnungen zur Freisetzung eines konservativen Tracers durchgeführt. Der konservative Tracer wird stellvertretend für langlebige, schwach sorbierende Radionuklide, welche massgeblich zur Gesamtdosis beitragen, verwendet. Diese Betrachtungen wurden primär für die HAA-Lager durchgeführt, da die entsprechenden Freisetzungsraten für ein SMA-Lager sehr tief sind und um mehrere Grössenordnungen unter dem Schutzkriterium von 0.1 mSv/a liegen, wie am Beispiel des SMA-Lagers in NL gezeigt wurde.

3.1.5 Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede in den Rahmengesteinen und Wahl des bevorzugten Bereichs für die Lagerfeldplatzierung

Anschliessend wurden die Rahmengesteine ober- und unterhalb der potenziellen Lagerzone auf raumwirksame qualitative Unterschiede hinsichtlich der Qualität und der Stabilität ihrer Barrierewirkung untersucht. Dazu wurden aufgrund standortspezifischer Unterschiede in den Rahmengesteinen verschiedene Teilbereiche einer potenziellen Lagerzone unterschieden. Diese Teilbereiche wurden auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede hin analysiert und verglichen. Diese Betrachtungen folgen den 13 Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit des SGT (BFE 2008). Das Ergebnis dieser Gegenüberstellung führte zur Wahl des bevorzugten Bereichs für die Lagerfeldplatzierung zum Zweck des sicherheitstechnischen Vergleichs in Etappe 3.

3.1.6 Laterale Abgrenzung des EG und der Platzreserven

Innerhalb des bevorzugten Bereichs für die Lagerfeldplatzierung wurde der EG zum Zweck des Standortvergleichs lateral abgegrenzt und die Platzreserven um den EG herum innerhalb der potenziellen Lagerzone angeordnet. Dabei wurde darauf geachtet, dass die sicherheitstechnischen Eigenschaften eine möglichst geringe Variabilität aufweisen. Als weitere qualitative Aspekte wurden berücksichtigt:

- optimale Abstände von der Oberflächenanlage (OFA) zum Hauptschliessungsbereich (HEB) und vom HEB zum EG (zweckmässige und haushälterische Nutzung des Untergrunds)
- Optimierbarkeit des Lagerfelds
- ggf. weitere standortspezifische Aspekte (beispielsweise vorhandene Tiefbohrungen)

Die EG wurden lateral so dimensioniert, dass sie die doppelte Fläche des Platzbedarfs gemäss aktueller Lagerauslegung umfassen. Der Flächenbedarf (rund 1 km² für HAA; rund 0.6 km² für SMA) für die Anordnung der untertägigen Teile des Lagers gemäss aktuellem Lagerkonzept und -auslegung wurde aus Fig. 4-2 in Band 5 in Nagra (2023a) abgeleitet und ist in Fig. 3-2 erläutert. Für die HAA-Lager umfassen die EG somit rund 2 km² und für die SMA-Lager rund 1.2 km². Das 6-fache des Platzbedarfs gemäss aktueller Auslegung der Lagerfelder wurde für alle Standortgebiete und Lagertypen als Platzangebot inkl. Reserven betrachtet. Die Ausdehnung des EG und der Platzreserven beträgt somit rund 6 km² für das HAA-Lager und rund 3.6 km² für das SMA-Lager.

Die Nagra definiert damit für alle Standortgebiete einen einheitlichen Platzbedarf pro Lagertyp sowie einheitliche Platzreserven, die ein Mehrfaches davon betragen. Dies begründet sich mit der geologischen Datengrundlage, die in Etappe 3 in allen Standortgebieten auf einen gleichwertigen Stand gebracht wurde¹. Der Platzbedarf trägt den Ungewissheiten im erwarteten Abfallinventar und bzgl. Geometrie, Anordnung und Abständen der Lagerkammern sowie den lokalen Gegebenheiten Rechnung.

3.2 Vorläufige Anordnung der Lagerprojekte

Innerhalb des EG wurde anschliessend das Lagerfeld für den Zweck des Standortvergleichs vorläufig platziert. Dabei wurden folgende Aspekte berücksichtigt:

- optimale vertikale Einbettung der Lagerfeldebene im Zentrum des Opalinustons
- Mindestabstand zu bestehenden Tiefbohrungen (ca. 50 m; Wert in Anlehnung an Kap. 4.3 in Nagra 2024d)
- ausreichender Abstand zur äusseren Begrenzung des EG (ca. 200 m; Wert in Anlehnung an Kap. 4.2 in Nagra 2024d)

Dem Standortvergleich legt die Nagra vergleichbare Lagerkonfigurationen pro Lagertyp und Standortgebiet zugrunde. Alle Lagertypen umfassen auf Lagerebene ein Hauptlager, ein Pilotlager, Testbereiche und den Zentralen Bereich (vgl. Kap. 3 in Nagra 2022 zum Beschrieb der Module der Lagerarchitektur und Fig. 3-2 zur exemplarischen Anordnung der Anlagenelemente im Kombilager). Die Lagerkonfigurationen berücksichtigen die Grundlagen des schweizerischen

¹ Dieser Platzbedarf ist kleiner als der in Etappe 2 geschätzte, standortspezifische Platzbedarf (ca. 6 – 12 km² für das HAA-Lager und ca. 3 – 5 km² für das SMA-Lager in den drei verbleibenden Standortgebieten, vgl. Kap. 4.1 in Nagra 2014b). Der Grund dafür liegt in der nunmehr stark verbesserten Datenlage, welche eine wesentliche Reduktion der in Etappe 2 angenommenen Bandbreiten zur Berücksichtigung von Ungewissheiten bei der Anordnung der Lagerfelder erlaubt. Unter Berücksichtigung der Reserven ist der in Etappe 2 und Etappe 3 angenommene Platzbedarf ähnlich.

Lagerkonzepts für die geologische Tiefenlagerung (Kap. 3 in Nagra 2024f), die Lage des HEB und der OFA (Kap. 3 in Nagra 2019) sowie die Abfallzuteilung (Kap. 4.2 in Nagra 2024a) und sind auf die dem Rahmenbewilligungsgesuch zugrunde gelegten Abschätzungen zum Abfallinventar abgestimmt (Kap. 7.1 in Nagra 2023b). Die Anforderungen an den Rohbau der Untertagebauwerke sind in Fig. 4-2 im Band 5 des Bautechnischen Dossiers (Nagra 2023a) zusammengefasst. Während das Haupt- und Pilotlager definitionsgemäss innerhalb des EG angeordnet sind, liegen der Zentrale Bereich mit den Testbereichen und die Zugangsbauwerke ausserhalb des EG. Die Zugänge zur Lagerebene, der Logistikbereich und die Zugänge zu den Lagerfeldern wurden gemäss den sicherheitstechnischen, baulichen und betrieblichen Anforderungen platziert.

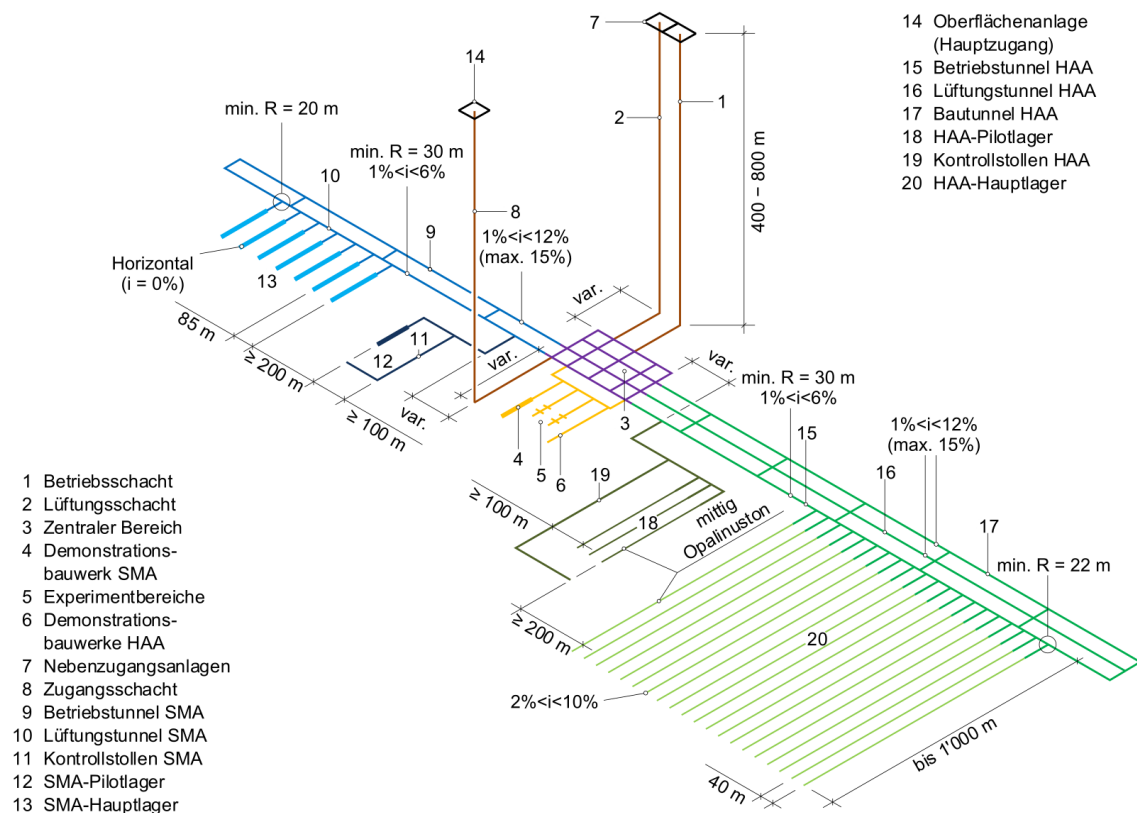


Fig. 3-2: Generisches Kombilager mit Hauptabmessungen gemäss aktueller Lagerauslegung

Für den HAA-Lagerteil wird als Funktion der erwarteten Abfallmenge (Kap. 7.1 in Nagra 2023b) eine Fläche von ca. 1 km² benötigt. Diese Fläche ergibt sich aus einem Abstand zwischen den Lagerstollen von 40 m und einem Abstand zwischen Pilot- und Hauptlager von mindestens 200 m und beinhaltet eine gewisse Reserve hinsichtlich der erwarteten Abfallmenge.

Für den SMA-Lagerteil wird als Funktion der erwarteten Abfallmenge eine Fläche von ca. 0.6 km² benötigt. Diese Fläche ergibt sich aus einem Abstand zwischen den Lagerkavernen von 85 m und einem Abstand zwischen Pilot- und Hauptlager von mindestens 200 m und beinhaltet eine gewisse Reserve hinsichtlich der erwarteten Abfallmenge.

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

4 Definition der Bewertungsobjekte für HAA

In diesem Kapitel wird die Umsetzung der Methodik zur Definition der Bewertungsobjekte für den sicherheitstechnischen Vergleich der HAA-Lager pro Standortgebiet erläutert.

4.1 Standortgebiet Jura Ost

4.1.1 Einengung des untertägigen Raums zur Abgrenzung des EG

4.1.1.1 Ermittlung der potenziellen Lagerzone

In Jura Ost liegt der Bereich mit der einfachsten Geologie zwischen den regionalen Störungszonen im Süden und im Norden sowie im Nordosten des Standortgebiets (Fig. 4-60 in Kap. 4.3.3 in Nagra 2024c). Die Ostgrenze der potenziellen Lagerzone (Fig. 4-1a, Fig. 4-2a) verläuft entlang des Aaretals bzw. der in Etappe 1 definierten Grenze des Standortgebiets (Kap. 5.2 in Nagra 2008). Die Nordgrenze wird im nordöstlichen Bereich durch die Siggenthal-Antiklinale und südwestlich angrenzend durch die minimale Tiefenlage des Opalinustons zum Schutz vor Erosion definiert. Die Westgrenze bildet die Effingen-Störung. Die Südgrenze wurde definiert in Anlehnung an die in Etappe 2 beschriebene Strukturzone von Brugg (Kap. 4.4.1 in Nagra 2014b). Die Kontur der potenziellen Lagerzone wurde aufgrund der geometrisch komplexen Platzverhältnisse in JO generalisiert (Berücksichtigung einer «nutzbaren Breite» von 500 m).

4.1.1.2 Vertikale Ausdehnung des EG in der potenziellen Lagerzone

Vertikal leistet in der potenziellen Lagerzone die gesamte Gesteinsabfolge zwischen dem Keuper-Aquifer unterhalb und dem Haupttrogenstein-Aquifer oberhalb des Opalinustons Beiträge zur Barrierewirkung des Gesamtsystems und wird deshalb als EG betrachtet (Fig. 4-2b). Der EG weist in der potenziellen Lagerzone somit Mächtigkeiten von rund 200 – 260 m auf (basierend auf Enclosure 3-9a in Nagra 2024b).

In den Rahmengesteinen findet sich eine Abfolge von harten Bänken mit geringen Mächtigkeiten, die in tonmineralreiche Gesteinsschichten eingebettet sind. In diesen harten Bänken wurde keine Wasserführung festgestellt (Kap. 4.5.3.2 in Nagra 2024c) und auch die modellunterstützte Prüfung zeigt, dass sie lateral keine advektiven Freisetzungspfade darstellen (Kap. 5.2.1 in Nagra 2024d). Der Radionuklidtransport erfolgt im ganzen EG überwiegend diffusiv und in vertikaler Richtung.

4.1.1.3 Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede im Wirtgestein

Die Potenzialraumkarten zu den raumwirksamen qualitativen Unterschieden im Wirtgestein sind in Fig. 4-1 dargestellt. Für eine Platzierung des HAA-Lagerfelds wird praktisch die gesamte potenzielle Lagerzone als gleichwertig bevorzugt eingestuft.

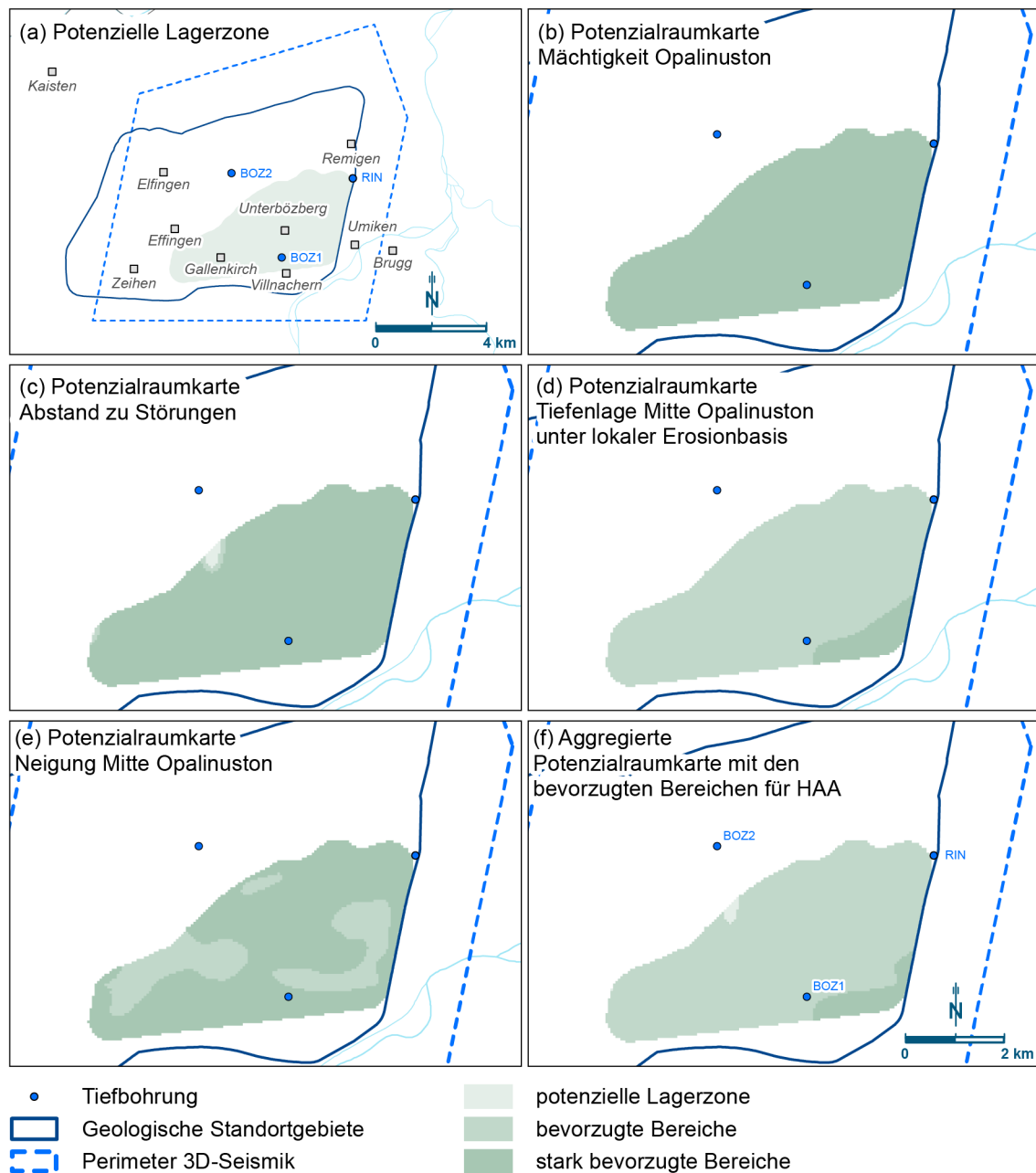


Fig. 4-1: Potenzielle Lagerzone für die Platzierung des HAA-Lagerfelds im Standortgebiet Jura Ost

4.1.1.4 Analyse der Rückhaltewirkung des Wirtgesteins

Die Prüfung der Rückhaltewirkung des Opalinustons zeigt, dass die mit den Tracer-Freisetzungsraten berechneten Dosen für alle betrachteten Felder um mehr als zwei Grössenordnungen unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/a liegen (Kap. 4.4.2 in Nagra 2024d). Die laterale Variabilität in diesen Freisetzungsraten ist gering. Die betrachteten Flächen werden deshalb in Bezug auf die Rückhaltewirkung im Opalinuston als gleichwertig eingestuft. Hinsichtlich der Rückhaltewirkung des Opalinustons ist die potenzielle Lagerzone im Standortgebiet JO somit in sich homogen.

4.1.1.5 Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede in den Rahmengesteinen

Für die Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede in den Rahmengesteinen wird in JO vereinfachend zwischen einem westlichen und einem östlichen Teil der potenziellen Lagerzone unterschieden (Fig. 4-2c). Die beiden Bereiche unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich der seismisch kartierten Störungen (Kap. 4.3.4 in Nagra 2024c). Im westlichen Teil der potenziellen Lagerzone wurden auf der Obergrenze der Muschelkalk-Gruppe in der 3D-Seismik zahlreiche, im östlichen Bereich nur wenige Störungen kartiert. In der folgenden Tabelle werden die Teilbereiche anhand der Kriterien des Sachplans verglichen.

Tab. 4-1: Gegenüberstellung der Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Bereiche JO West und Ost anhand der 13 SGT-Kriterien

Kriterien und wichtige Aspekte	West	Ost	Argumente
1.1 Räumliche Ausdehnung (vertikale und laterale Ausdehnung des EG, Flexibilität bei der Anordnung der Lagerfelder)	=		Die Verteilung der EG-Mächtigkeit ist in beiden Bereichen gleichwertig (basierend auf Enclosure 3-9a in Nagra 2024b). Die Flächen der zwei Bereiche sind ähnlich gross (Fig. 4-2c). In beiden Bereichen sind auf den Schichtgrenzen des Opalinustons keine Störungen seismisch kartiert (Kap. 4.3.4 in Nagra 2024c). Die beiden Bereiche weisen deshalb diesbezüglich eine gleichwertige Flexibilität für die Lagerfeldplatzierung auf.
1.2 Hydraulische Barrierenwirkung (hydraulische Barriere, Transportbarriere, regionale hydrogeologische Situation)	=		Die hydrogeologische Situation und die Qualität der geologischen Barriere (Wasserflüsse, Transportbarriere) ist im heutigen Zustand in beiden Bereichen gleichwertig (basierend auf Kap. 5.6.3 und 5.9 in Nagra 2024c sowie auf Kap. 5 und Enclosure 7 in Nagra 2024b). Bzgl. des Austauschs von meteorischen Wässern und Porenwasser im EG sind die Bedingungen in beiden Bereichen auch hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen gleichwertig. Die Grund- und Porenwasseruntersuchungen zeigen ein durch die Wechselwirkung mit oberflächennahem meteorischem Wasser beeinflusstes System (basierend auf Kap. 4.6 in Nagra 2024c).
1.3 Geochemische Bedingungen (Mineralogie, Porenwasserchemie)	=		Die Bedingungen im Opalinuston zur Gewährleistung eines stabilen geochemischen und geomechanischen Umfeldes für die Lagerkammern sind in beiden Bereichen gleichwertig (basierend auf Kap. 5.2 und 5.4 in Nagra 2024c).
1.4 Freisetzungspfade (Art des Porenraums im intakten WG, Art der Transportpfade im WG, Selbstabdichtungsvermögen WG)	=		Art und Eigenschaften der Freisetzungspfade im Opalinuston sind aufgrund der feinen Porenstruktur und des ausgeprägten Selbstabdichtungsvermögens in beiden Bereichen gleichwertig (basierend auf Kap. 5.10 Nagra 2024c).

Tab. 4-1: Fortsetzung

Kriterien und wichtige Aspekte	West	Ost	Argumente
2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (Störung des Gesteinsverbandes durch differenzielle Bewegungen (Neotektonik), Bildung neuer Wasser- und Gaswegsamkeiten durch geochemische Vorgänge)	=		Beide Bereiche liegen ausserhalb von Zonen mit erhöhter Erdbebenaktivität in der Schweiz; sie sind bzgl. Seismizität gleichwertig (Fig. 1-3 und Kap. 6.2.3 in Nagra 2024c).
	-	+	Der Bereich JO Ost hat weniger seismisch kartierte Störungen auf der Obergrenze der Muschelkalk-Gruppe (Kap. 4.3.4 in Nagra 2024c).
	=		In beiden Bereichen besteht im EG kein Karstentwicklungspotenzial (basierend auf Kap. 6.5.2 in Nagra 2024c).
2.2 Erosion (Tiefenlage, Hebungsrate, Erosionsrate, fluviale Erosion, glaziale Tiefenerosion)	=		Dank ausreichender Tiefenlage bieten beide Bereiche einen genügenden Schutz vor Prozessen an der Erdoberfläche; für das heutige Entwässerungsszenario sind gleichwertige Restüberdeckungen der Lagerebene am Ende des Betrachtungszeitraums zu erwarten (basierend auf Kap. 4 in Nagra 2024g).
2.3 Lagerbedingte Einflüsse (Auflockerungszone, gas- und thermisch bedingte Effekte im WG)	=		Lagerbedingte Einflüsse können in beiden Bereichen mit baulichen Massnahmen kontrolliert werden. Die in Lagertiefe vorherrschenden Gebirgsspannungen und die massgeblichen Gesteinseigenschaften sowie die in-situ-Temperatur im Opalinuston sind im Osten und Westen gleichwertig (basierend auf Kap. 5.5 in (Nagra 2024c)).
2.4 Nutzungskonflikte (Vorkommen wirtschaftlich nutzungswürdiger Rohstoffe / Ressourcen)	=		In keinem der beiden Bereiche sind Ressourcen in einem für die Schweiz besonderen Masse vorhanden (basierend auf Nagra 2014c).
3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine (Fazies-Variabilität, Strömungs- und Transporteigenschaften des WG, Rolle der oberen und unteren Rahmengesteine)	=		Die Faziesvariabilität des Opalinustons sowie der unteren und oberen Rahmengesteine ist in beiden Bereichen gleichwertig (basierend auf Kap. 4.2.10 in Nagra 2024c und auf Kap. 5.2.1 in Nagra 2024d).
3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (insb. Schichtmächtigkeiten)	=		Die räumliche Explorierbarkeit der Rahmengesteine ist in beiden Bereichen gleichwertig (basierend auf Enclosure 3-9a in Nagra 2024b).
3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen (lagerbedingte Einflüsse, geologische Langzeitentwicklung)	=		Alternative Entwicklungen der Topographie aufgrund alternativer Entwässerungsszenarien sind in beiden Bereichen möglich. Die Sicherheitsmargen bzgl. lagerbedingter Einflüsse und Erosion werden auch unter Annahme alternativer (ungünstigerer) Langzeitveränderungen im Osten und Westen insgesamt als gleichwertig eingestuft (basierend auf Kap. 4 in Nagra 2024g sowie auf Kap. 5.1 und Kap. 5.2.3 in Nagra 2024d).

Tab. 4-1: Fortsetzung

Kriterien und wichtige Aspekte	West	Ost	Argumente
4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	=		In beiden Bereichen kann mit bewährten Bauverfahren ein sicheres HAA-Lager gleichermaßen gebaut, betrieben und verschlossen werden; die verbleibenden standortspezifischen Baurisiken können mit bekannten und erprobten Massnahmen kontrolliert werden (basierend auf Kap. 5 und 6 in Band 9 in Nagra 2023a). Die häuslicherische Nutzung des Untergrundes ist im Bereich JO Ost durch die Nähe zum HEB besser als im Bereich JO West (Fig. 4-2).
4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung	-	+	

Fazit zum bevorzugten Bereich für das vorläufige HAA-Lagerfeld im Standortgebiet Jura Ost:

Der argumentative Vergleich zeigt, dass die Bereiche JO West und Ost bzgl. der meisten SGT-Kriterien gleichwertig sind. Wo es Unterschiede gibt, fallen sie jedoch zu Gunsten des östlichen Teils aus. Deshalb wird der östliche Bereich in JO für die vorläufige Platzierung des HAA-Lagerfelds zum Zweck des Standortvergleichs gewählt.

4.1.1.6 Laterale Abgrenzung des EG und der Platzreserven

Im für das HAA-Lagerfeld bevorzugten Bereich JO Ost werden der EG und die Platzreserven zum Zweck des Standortvergleichs lateral gemäss Beschreibung in Kap. 3.1.6 definiert. Der EG wird in der Nähe des HEB und die Platzreserven um den EG herum angeordnet (Fig. 4-2d). Dabei wird darauf geachtet, die seismisch kartierten Störungen soweit möglich zu meiden. Die so abgegrenzte Fläche beansprucht den Hauptteil des Bereichs JO Ost und ist frei von seismisch kartierten Störungen auf der Ober- und Untergrenze des Wirtgesteins.

4.1.2 Vorläufige Auslegung und Projektierung des geologischen Tiefenlagers

Innerhalb des so definierten EG erfolgt die vorläufige Anordnung des HAA-Lagerfelds für den Zweck des Standortvergleichs. Die Lagerfeldebene kann innerhalb des Opalinustons gut eingebettet werden, da überall eine geeignete Kombination aus Schichtmächtigkeit und -neigung vorliegt (Fig. 4-1). Dabei wird mit den Lagerkammern ein ausreichender Abstand zu bestehenden Tiefbohrungen und zur äusseren Begrenzung des EG eingehalten.

Auf dieser Basis und unter den in Kap. 3.2 genannten standortspezifischen Randbedingungen und Anforderungen wurde das beispielhafte Lagerprojekt erarbeitet (Fig. 4-2d; und Kap. 6.2 in Band 6 in Nagra 2023a). Haupt- und Pilotlager des HAA-Lagers liegen auf rund 500 m Tiefe, der Zentrale Bereich mit den Testbereichen und die Zugangsbauwerke liegen ausserhalb des EG. Erschlossen wird der Bereich untertag mittels eines Zugangstunnels von der OFA in der «Riedmatt» (JO-3+) aus. Der Lüftungsschacht ist von der Nebenzugangsanlage im Taleinschnitt «Itele» – «Matten» – «Riniken» vorgesehen.

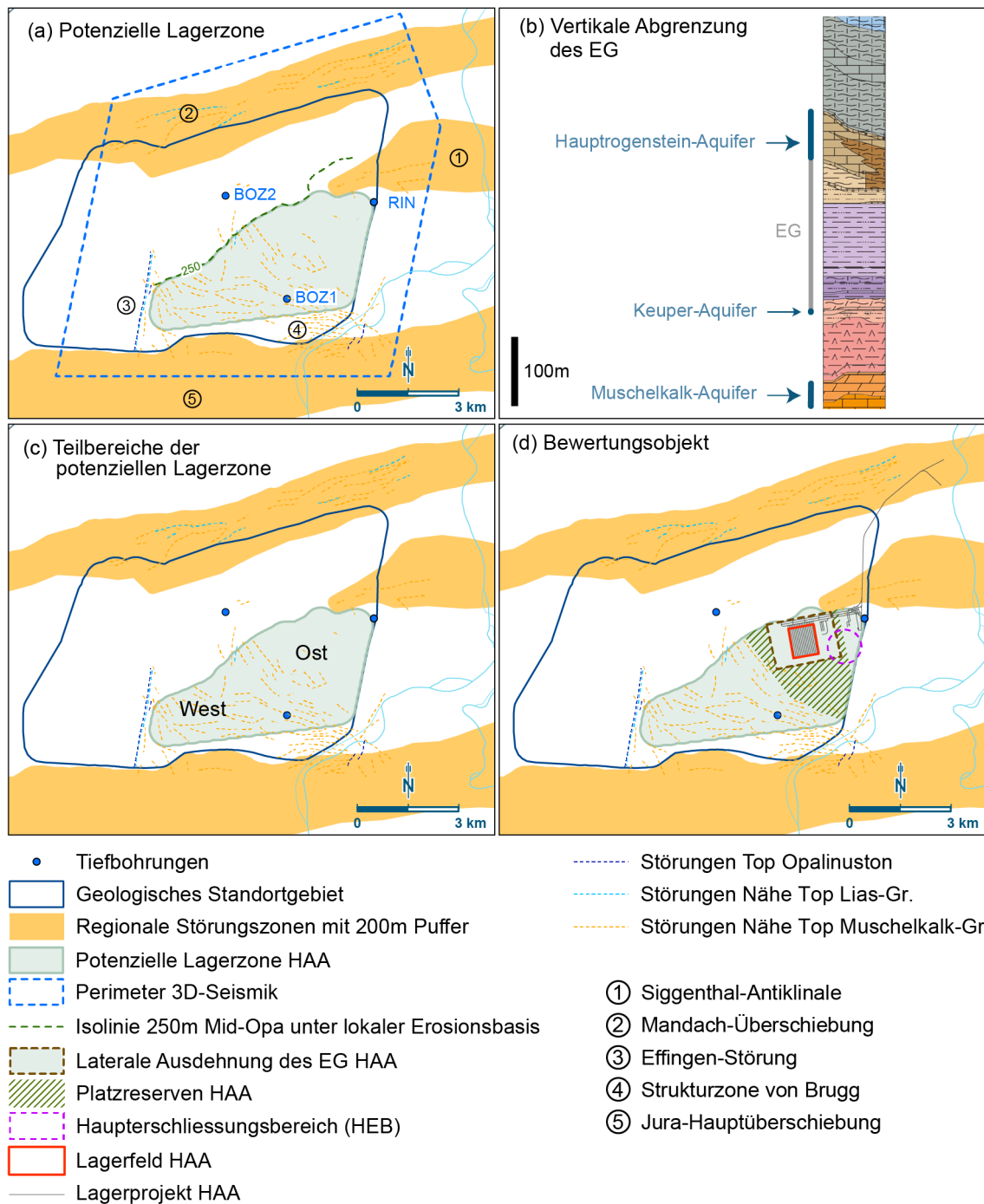


Fig. 4-2: Definition des Bewertungsobjektes HAA Jura Ost

4.2 Standortgebiet Nördlich Lägern

4.2.1 Einengung des untertägigen Raums zur Abgrenzung des EG

4.2.1.1 Ermittlung der potenziellen Lagerzone

In Nördlich Lägern liegt der Bereich mit der einfachsten Geologie zwischen den regionalen Störungszonen im Süden und im Norden des Standortgebiets (Fig. 4-60 in Kap. 4.3.3 in Nagra 2024c). Die Ostgrenze der potenziellen Lagerzone (Fig. 4-3a, Fig. 4-4a) fällt mit der in Etappe 1 geologisch begründeten Standortgebietsgrenze zusammen (Kap. 5.2 in Nagra 2008). Die Nordgrenze folgt mit einem Sicherheitsabstand von 200 m dem Weiach-Glattfelden-Eglisau-Lineament. Die Westgrenze der potenziellen Lagerzone orientiert sich am Rand des 3D-Seismik-perimeters. Die Südgrenze der potenziellen Lagerzone entspricht im Westen der in Etappe 1 geologisch begründeten Standortgebietsgrenze (Kap. 5.2 in Nagra 2008) und verläuft mit 200 m Sicherheitsabstand nördlich des Baden-Irchel-Herdern-Lineaments. Weiter östlich orientiert sich die Südgrenze an einem Ausläufer dieses Lineaments.

4.2.1.2 Vertikale Ausdehnung des EG in der potenziellen Lagerzone

Vertikal leistet in der potenziellen Lagerzone die gesamte Gesteinsabfolge zwischen dem Keuper-Aquifer unterhalb und dem Malm-Aquifer oberhalb des Opalinustons Beiträge zur Barriere-wirkung des Gesamtsystems und wird deshalb als EG betrachtet (Fig. 4-4b). Der EG weist in der potenziellen Lagerzone somit Mächtigkeiten von rund 290 – 380 m auf (basierend auf Enclosure 3-9b in Nagra 2024b).

In den Rahmengesteinen findet sich eine Abfolge von harten Bänken, die in tonmineralreiche Gesteinsschichten eingebettet sind. In diesen harten Bänken wurde keine Wasserführung festgestellt (Kap. 4.5.3.2 in Nagra 2024c) und auch die modellunterstützte Prüfung zeigt, dass sie lateral keine advektiven Freisetzungspfade darstellen (Kap. 5.2.1 in Nagra 2024d). Dies gilt sowohl für die Abfolgen von harten Bänken mit geringen Mächtigkeiten als auch für die «Herrenwis-Einheit». Diese im östlichen Teil der potenziellen Lagerzone oberhalb des Opalinustons auftretende Karbonatplattform mit einer Mächtigkeit von ca. 40 m ist in tonmineralreiche Gesteinsschichten eingebettet und hydraulisch isoliert, es wurde keine Wasserführung festgestellt (Kap. 4.5.3.7 in Nagra 2024c). Der Radionuklidtransport erfolgt im ganzen EG überwiegend diffusiv und in vertikaler Richtung.

4.2.1.3 Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede im Wirtgestein

Die Potenzialraumkarten zu den raumwirksamen qualitativen Unterschieden im Wirtgestein sind in Fig. 4-3 dargestellt. Für eine Platzierung des HAA-Lagerfelds wird praktisch die gesamte potenzielle Lagerzone als gleichwertig bevorzugt eingestuft.

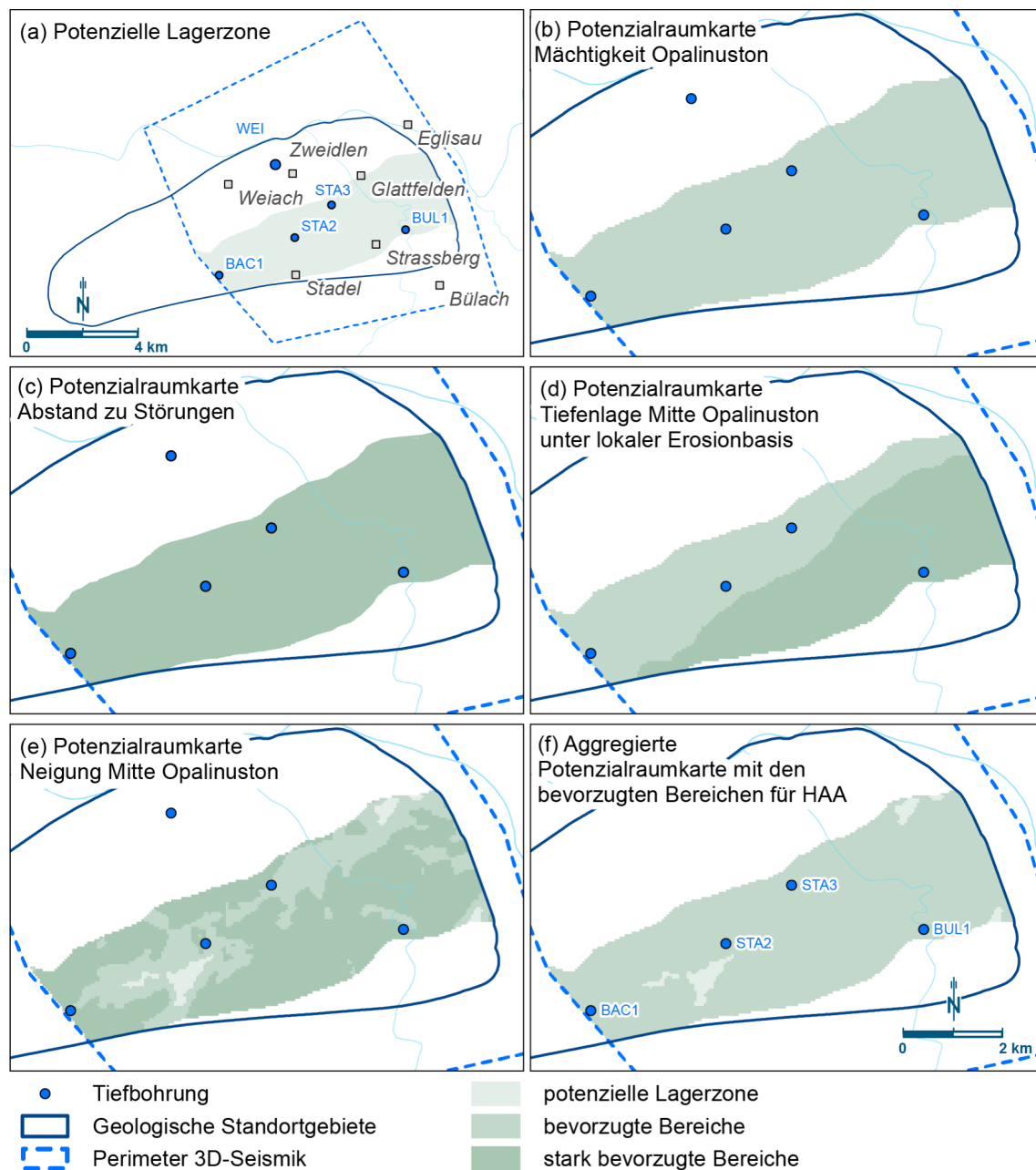


Fig. 4-3: Potenzielle Lagerzone für die Platzierung des HAA-Lagerfelds im Standortgebiet Nördlich Lägern

4.2.1.4 Analyse der Rückhaltewirkung des Wirtgesteins

Die Prüfung der Rückhaltewirkung des Opalinustons zeigt, dass die mit den Tracer-Freisetzungsraten berechneten Dosen für alle betrachteten Felder um mehr als zwei Grössenordnungen unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/a liegen (Kap. 4.4.3 in Nagra 2024d). Die laterale Variabilität in diesen Freisetzungsraten ist gering. Die betrachteten Flächen werden deshalb in Bezug auf die Rückhaltewirkung im Opalinuston als gleichwertig eingestuft. Hinsichtlich der Rückhaltewirkung des Opalinustons ist die potenzielle Lagerzone im Standortgebiet NL somit in sich homogen.

4.2.1.5 Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede in den Rahmengesteinen

Für die Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede in den Rahmengesteinen wird in NL zwischen einem westlichen und einem östlichen Teil der potenziellen Lagerzone unterschieden (Fig. 4-4c). Die beiden Bereiche unterscheiden sich hinsichtlich der oberen Rahmengesteine. Direkt über dem Opalinuston treten zusätzliche tonmineralreiche Gesteine auf, welche eine mit dem Wirtgestein zusammenhängende, zentrale tonreiche Zone bilden (Kap. 4.2.7 in Nagra 2024c). Im Osten wird diese Zone von einer isolierten Karbonatplattform («Herrenwis-Einheit») überlagert (Kap. 4.2.7 in Nagra 2024c). In der folgenden Tabelle werden die Teilbereiche anhand der Kriterien des Sachplans verglichen.

Tab. 4-2: Gegenüberstellung der Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Bereiche NL West und Ost anhand der 13 SGT-Kriterien

Legende: = gleichwertig / + Vorteil / - Nachteil

Kriterien und wichtige Aspekte	West	Ost	Argumente
1.1 Räumliche Ausdehnung (vertikale und laterale Ausdehnung des EG, Flexibilität bei der Anordnung der Lagerfelder)	=		Zwar ist die Mächtigkeit des EG im Bereich NL West noch grösser als im Bereich Ost (basierend auf Enclosure 3-9b in Nagra 2024b), aber im Osten fällt die zentrale tonreiche Zone zwischen der Basis des Opalinustons und der Basis der «Herrenwis-Einheit» mächtiger aus als im Westen (Kap. 4.2.7 in Nagra 2024c).
	-	+	Der Bereich NL Ost weist insgesamt eine etwas grössere Fläche mit geeigneter Kombination aus Schichtmächtigkeit und -neigung auf als der Bereich West (Fig. 4-4c). Dies dient der Flexibilität bei Lagerfeldplatzierung inkl. Linienführung der Lagerfeldzugänge.
	=		In beiden Bereichen sind auf den Schichtgrenzen des Opalinustons keine Störungen seismisch kartiert (Kap. 4.3.4 in Nagra 2024c). Die beiden Bereiche weisen diesbezüglich eine gleichwertige Flexibilität für die Lagerfeldplatzierung auf.
1.2 Hydraulische Barrierenwirkung (hydraulische Barriere, Transportbarriere, regionale hydrogeologische Situation)	=		Die hydrogeologische Situation und die Qualität der geologischen Barriere (Wasserflüsse, Transportbarriere) im heutigen Zustand ist insgesamt gleichwertig (basierend auf Kap. 5.6.3 und 5.9 in Nagra 2024c sowie auf Kap. 5 und Enclosure 7 in Nagra 2024b). Die «Herrenwis-Einheit» im Osten ist hydraulisch isoliert und trägt zur Barrierewirkung bei (Kap. 4.5.3.7 in Nagra 2024c). Bzgl. hydrogeologischer Situation sind die Bedingungen in beiden Bereichen auch hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen gleichwertig. Insgesamt zeigen die Grund- und Porenwasseruntersuchungen aus NL, dass in der Vergangenheit sehr wenig Austausch mit oberflächennahem meteorischem Wasser stattgefunden hat (basierend auf Kap. 4.6 in Nagra 2024c).

Tab. 4-2: Fortsetzung

Kriterien und wichtige Aspekte	West	Ost	Argumente
1.3 Geochemische Bedingungen (Mineralogie, Porenwasserchemie)	=		Die Bedingungen im Opalinuston zur Gewährleistung eines stabilen geochemischen und geomechanischen Umfeldes für die Lagerkammern sind in beiden Bereichen gleichwertig (basierend auf Kap. 5.2 und 5.4 in Nagra 2024c).
1.4 Freisetzungspfade (Art des Porenraums im intakten WG, Art der Transportpfade im WG, Selbstabdichtungsvermögen WG)	=		Art und Eigenschaften der Freisetzungspfade im Opalinuston sind aufgrund der feinen Porenstruktur und des ausgeprägten Selbstabdichtungsvermögens in beiden Bereichen gleichwertig (basierend auf Kap. 5.10 in Nagra 2024c).
2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (Störung des Gesteinsverbandes durch differenzielle Bewegungen (Neotektonik), Bildung neuer Wasser- und Gaswegsamkeiten durch geochemische Vorgänge)	=		Beide Bereiche liegen ausserhalb von Zonen mit erhöhter Erdbebenaktivität der Schweiz; sie sind bzgl. Seismizität gleichwertig (Fig. 1-3 und Kap. 6.2.3 in Nagra 2024c). In der potenziellen Lagerzone ist nur eine Störung auf der Obergrenze der Muschelkalk-Gruppe kartiert (Kap. 4.3.4 in Nagra 2024c). Die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften diesbezüglich ist gleichwertig. In beiden Bereichen im EG besteht kein Karstentwicklungspotenzial (basierend auf Kap. 6.5.2 in Nagra 2024c).
2.2 Erosion (Tiefenlage, Hebungsrate, Erosionsrate, fluvial Erosion, glaziale Tiefenerosion)	=		Dank der sehr grossen Tiefenlage bieten beide Bereiche einen ausgezeichneten Schutz vor Prozessen an der Erdoberfläche (basierend auf Kap. 4 in Nagra 2024g).
2.3 Lagerbedingte Einflüsse (Auflockerungszone, gas- und thermisch bedingte Effekte im WG)	=		Lagerbedingte Einflüsse können in beiden Bereichen mit baulichen Massnahmen kontrolliert werden. Die in Lagertiefe vorherrschenden Gebirgsspannungen und die massgeblichen Gesteinseigenschaften sowie die in-situ-Temperatur im Opalinuston sind im Osten und Westen gleichwertig (basierend auf Kap. 5.5 in Nagra 2024c).
2.4 Nutzungskonflikte (Vorkommen wirtschaftlich nutzungswürdiger Rohstoffe / Ressourcen)	=		In keinem der beiden Bereiche sind Ressourcen in einem für die Schweiz besonderen Masse vorhanden (basierend auf Nagra 2014c).
3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine (Fazies-Variabilität, Strömungs- und Transporteigenschaften des WG, Rolle der oberen und unteren Rahmengesteine)	=		Die oberen Rahmengesteine in Nördlich Lägern zeigen räumliche Variabilität in Aufbau und Gesteinseigenschaften, während der Opalinuston und die unteren Rahmengesteine im Vergleich dazu wenig Variabilität zeigen. Die Auswirkungen dieser Ungewissheiten auf die Rückhaltung sind in beiden Bereichen gleichwertig niedrig (basierend auf Kap. 4.2.10 in Nagra 2024c und Kap. 5.2.1 in Nagra 2024d).
3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (insb. Schichtmächtigkeiten)	=		Die räumliche Explorierbarkeit der Rahmengesteine ist in beiden Bereichen gleichwertig (basierend auf Enclosure 3-9b in Nagra 2024b).

Tab. 4-2: Fortsetzung

Kriterien und wichtige Aspekte	West	Ost	Argumente
3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen (lagerbedingte Einflüsse, geologische Langzeitentwicklung)	=		Die Sicherheitsmargen bzgl. lagerbedingter Einflüsse und Erosion sind im Osten und im Westen sehr gross (basierend auf Kap. 4 in (Nagra 2024g) sowie auf Kap. 5.1 und Kap. 5.2.3 in (Nagra 2024d).
4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	=		In beiden Bereichen kann mit bewährten Bauverfahren ein sicheres HAA-Lager gleichermassen gebaut, betrieben und verschlossen werden; die verbleibenden standortspezifischen Baurisiken können mit bekannten und erprobten Massnahmen kontrolliert werden (basierend auf Kap. 5 und 6 in Band 9 in Nagra 2023a). In beiden Bereichen ist eine gleichwertige häuslicherische Nutzung des Untergrundes möglich (Fig. 4-4).
4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung	=		

Fazit zum bevorzugten Bereich für das vorläufige HAA-Lagerfeld im Standortgebiet Nördlich Lägern:

Der argumentative Vergleich zeigt, dass die Bereiche NL West und Ost bzgl. praktisch aller SGT-Kriterien gleichwertig sind. Zwischen den Bereichen bestehen mit Ausnahme von Kriterium 1.1 kaum Unterschiede. Aufgrund der grösseren Mächtigkeit der tonreichen Zone zwischen der Basis des Opalinustons und der Basis der «Herrenwis-Einheit» sowie der insgesamt etwas grösseren Fläche mit flach gelagertem Opalinuston wird der Bereich NL Ost für die vorläufige Platzierung des HAA-Lagerfelds zum Zweck des Standortvergleichs gewählt.

4.2.1.6 Laterale Ausdehnung des EG und der Platzreserven

Im für das HAA-Lagerfeld bevorzugten Bereich NL Ost werden der EG und die Platzreserven zum Zweck des Standortvergleichs lateral gemäss Beschreibung in Kap. 3.1.6 definiert. Der EG wird in der Nähe des HEB und die Platzreserven um den EG herum angeordnet (Fig. 4-4d). Die so abgegrenzte Fläche beansprucht den Hauptteil des Bereichs NL Ost und ist frei von seismisch kartierten Störungen.

4.2.2 Vorläufige Auslegung und Projektierung des geologischen Tiefenlagers

Innerhalb des so definierten EG erfolgt die vorläufige Anordnung des HAA-Lagerfelds für den Zweck des Standortvergleichs. Die Lagerfeldebene kann innerhalb des Opalinustons gut eingebettet werden, da überall eine geeignete Kombination aus Schichtmächtigkeit und -neigung vorliegt (Fig. 4-3). Dabei wird mit den Lagerkammern ein ausreichender Abstand zu bestehenden Tiefbohrungen und zur äusseren Begrenzung des EG eingehalten.

Auf dieser Basis und unter den in Kap. 3.2 genannten standortspezifischen Randbedingungen und Anforderungen wurde das beispielhafte Lagerprojekt erarbeitet (Fig. 4-4d; und Kap. 6.1 in Band 6 in Nagra 2023a). Haupt- und Pilotlager des HAA-Lagers liegen auf rund 900 m Tiefe, der Zentrale Bereich mit den Testbereichen und die Zugangsbauwerke liegen ausserhalb des EG. Erschlossen wird der Bereich untertag mittels Schächte von der Oberflächenanlage sowie von den Nebenzugangsanlagen aus dem Haberstal in der Gemeinde Stadel im Kanton Zürich aus.

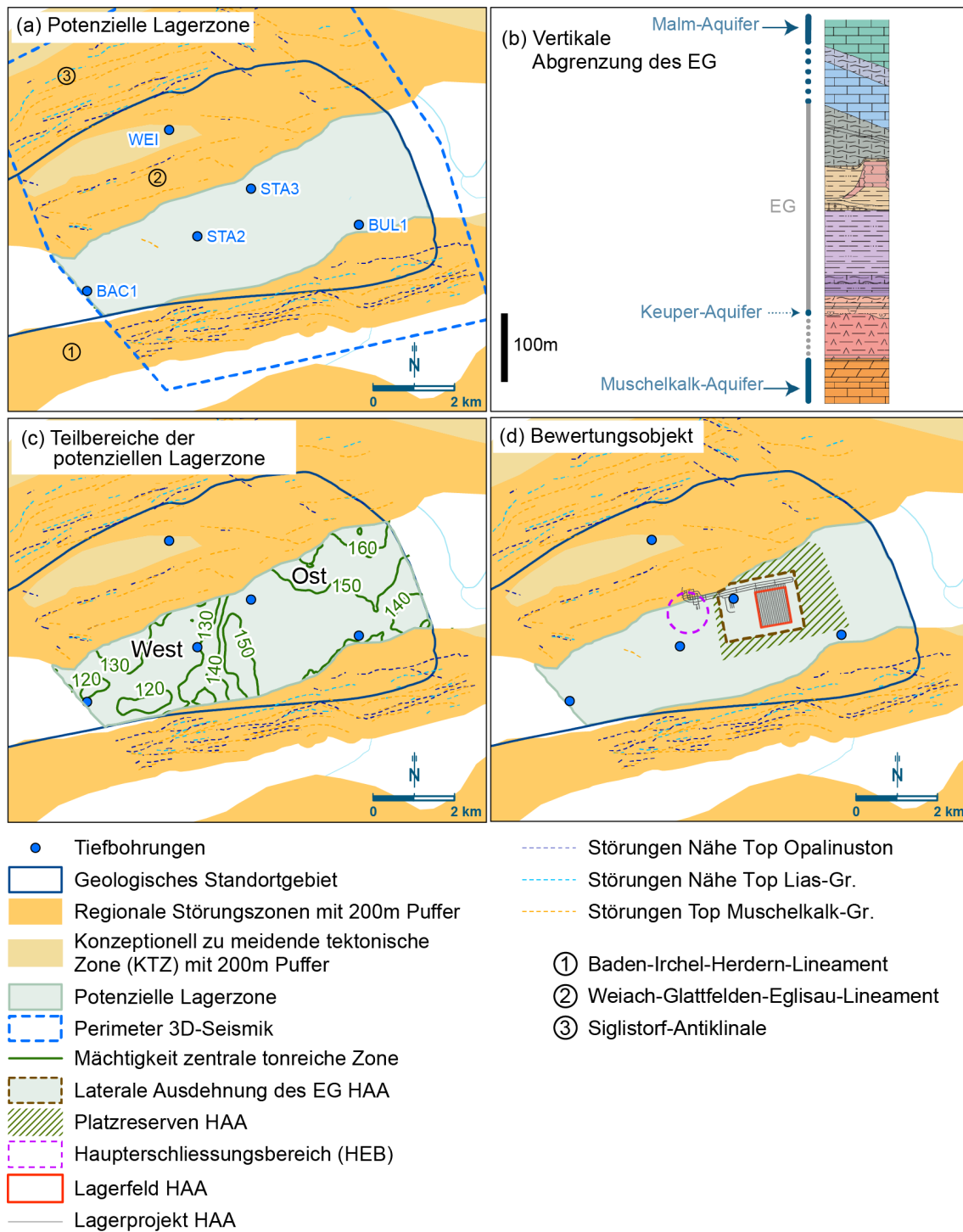


Fig. 4-4: Definition des Bewertungsobjektes HAA Nördlich Lägern

4.3 Standortgebiet Zürich Nordost

4.3.1 Einengung des untertägigen Raums zur Abgrenzung des EG

4.3.1.1 Ermittlung der potenziellen Lagerzone

In Zürich Nordost liegt der Bereich mit der einfachsten Geologie zwischen mehreren regionalen tektonischen Elementen im zentralen Bereich des Standortgebiets (Fig. 4-60 in Kap. 4.3.3 in Nagra 2024c). Die Ostgrenze der potenziellen Lagerzone (Fig. 4-5a, Fig. 4-6a) wird durch die Grenze des Untersuchungsgebiets der 3D-Seismik gebildet (Kap. 4.2.1 in Nagra 2014a), welche bereits für den Entsorgungsnachweis mit Blick auf die Umsetzung eines HAA-Lagers definiert wurde (Kap. 4.2.2 in Nagra 2002). Die Nordgrenze orientiert sich an der Neuhausen-Störung und der Wildensbuch-Flexur, die Westgrenze an der Rheinau-Störung und die Südgrenze an der Rafz-Marthalen-Flexur. Zu diesen tektonischen Elementen wird ein Sicherheitsabstand von 200 m eingehalten.

Bei der Ermittlung der potenziellen Lagerzone für das HAA-Lager werden die Bereiche unmittelbar nördlich der Wildensbuch-Flexur nicht berücksichtigt. Bezüglich Tiefenlage und Mächtigkeit ist dieser Bereich etwas weniger gut geeignet als die Bereiche südlich der Wildensbuch-Flexur. Deren Berücksichtigung würde das Gesamtbild aufgrund des mehr als ausreichenden Platzangebotes nicht ändern.

4.3.1.2 Vertikale Ausdehnung des EG in der potenziellen Lagerzone

Vertikal leistet in der potenziellen Lagerzone die gesamte Gesteinsabfolge zwischen dem Keuper-Aquifer unterhalb und dem Malm-Aquifer oberhalb des Opalinustons Beiträge zur Barrierewirkung des Gesamtsystems und wird deshalb als EG betrachtet (Fig. 4-6b). Der EG weist in der potenziellen Lagerzone somit Mächtigkeiten von rund 260 – 300 m auf (basierend auf Enclosure 3-9c in Nagra 2024b).

In den Rahmengesteinen findet sich eine Abfolge von harten Bänken mit geringen Mächtigkeiten, die in tonmineralreiche Gesteinsschichten eingebettet sind. In diesen harten Bänken wurde keine Wasserführung festgestellt (Kap. 4.5.3.2 in Nagra 2024c) und auch die modellunterstützte Prüfung zeigt, dass sie lateral keine advektiven Freisetzungspfade darstellen (Kap. 5.2.1 in Nagra 2024d). Der Radionuklidtransport erfolgt deshalb im ganzen EG überwiegend diffusiv und in vertikaler Richtung.

4.3.1.3 Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede im Wirtgestein

Die Potenzialraumkarten zu den raumwirksamen qualitativen Unterschieden im Wirtgestein sind in Fig. 4-5 dargestellt. Auch wenn sich die potenzielle Lagerzone in Zürich Nordost hinsichtlich der einzelnen Indikatoren räumlich leicht strukturiert präsentiert, wird der überwiegende Teil als bevorzugt für eine Platzierung des HAA-Lagerfelds eingestuft.

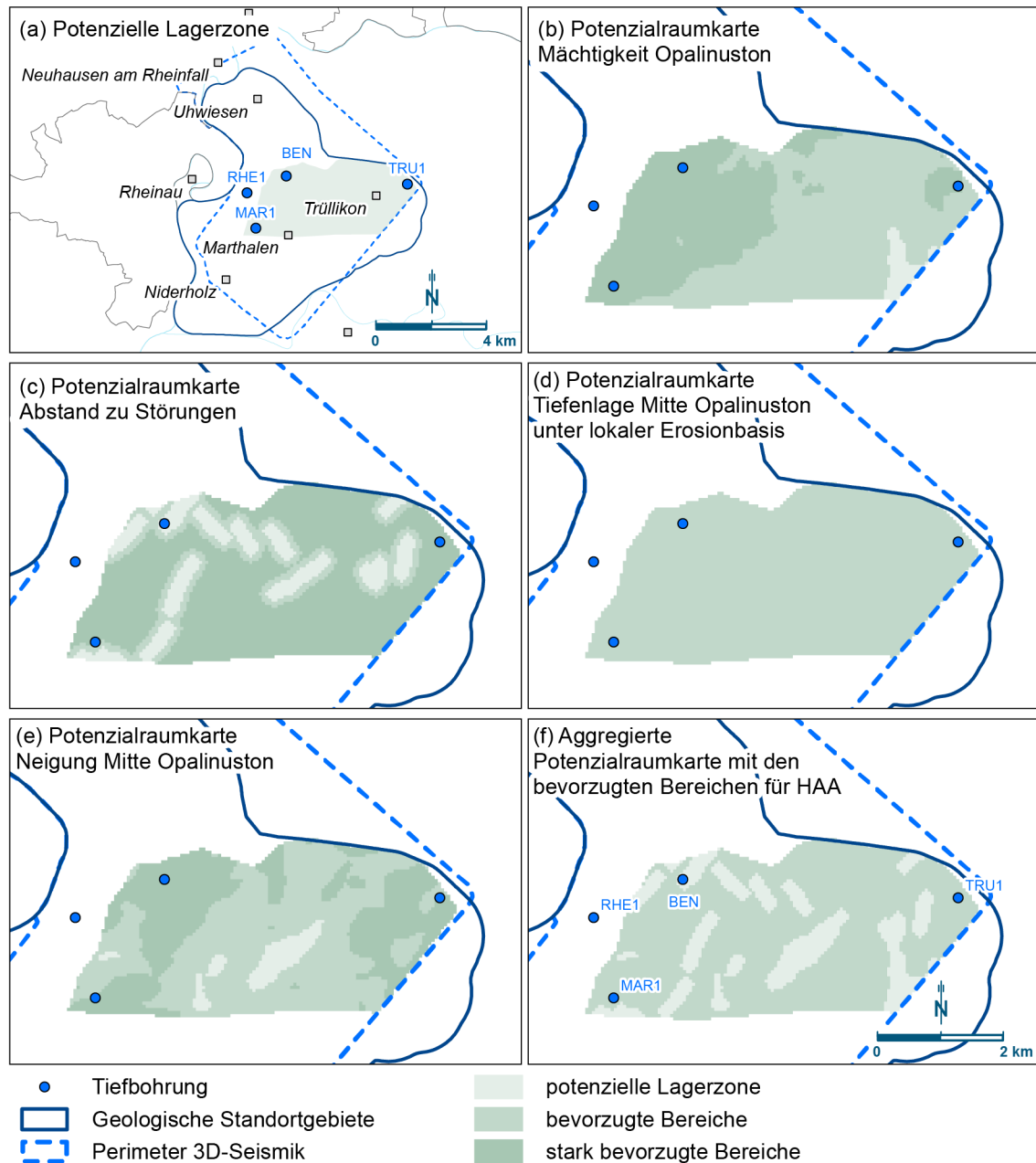


Fig. 4-5: Potenzielle Lagerzone für die Platzierung des HAA-Lagerfelds im Standortgebiet Zürich Nordost

4.3.1.4 Analyse der Rückhaltewirkung des Wirtgesteins

Die Prüfung der Rückhaltewirkung des Opalinustons zeigt, dass die mit den Tracer-Freisetzungsraten berechneten Dosen für alle betrachteten Felder um mehr als zwei Grössenordnungen unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/a liegen (Kap. 4.4.4 in Nagra 2024d). Die laterale Variabilität in diesen Freisetzungsraten ist gering. Die betrachteten Flächen werden deshalb in Bezug auf die Rückhaltewirkung im Opalinuston als gleichwertig eingestuft. Hinsichtlich der Rückhaltewirkung des Opalinustons ist die potenzielle Lagerzone im Standortgebiet ZNO somit in sich homogen.

4.3.1.5 Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede in den Rahmengesteinen

Für die Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede in den Rahmengesteinen wird in ZNO aufgrund der zunehmenden Tiefenlage vereinfachend zwischen einem westlichen, einem mittleren und einem östlichen Teil der potenziellen Lagerzone unterschieden (Fig. 4-6c). In der folgenden Tabelle werden die Teilbereiche anhand der Kriterien des Sachplans verglichen.

Tab. 4-3: Gegenüberstellung der Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Bereiche ZNO West, Mitte und Ost anhand der 13 SGT-Kriterien

Legende: = gleichwertig / + Vorteil / - Nachteil / 0 indifferent

Kriterien und wichtige Aspekte	West	Mitte	Ost	Argumente
1.1 Räumliche Ausdehnung (vertikale und laterale Ausdehnung des EG, Flexibilität bei der Anordnung der Lagerfelder)	0	0	-	Die Mächtigkeit des Opalinustons nimmt von Westen nach Osten leicht ab, im Bereich Ost liegt sie teilweise geringfügig unter 100 m (basierend auf Enclosure 3-7c in Nagra 2024b). Die Mächtigkeiten der oberen und unteren Rahmengesteine sind gleichmässig verteilt (basierend auf Enclosure 3-6c und 3-8c in Nagra 2024b).
	+	-	+	Die Bereiche West und Ost weisen eine flachere Lagerung des Opalinustons auf als der Bereich Mitte (Fig. 4-5e).
	=			Die Flächen der drei Bereiche sind gleichwertig, jede für sich weist aber nicht die für HAA angestrebten Platzreserven auf (Fig. 4-6c). In Bezug auf die Anzahl an seismisch kartierten Störungen auf den Schichtgrenzen des Opalinustons sind die drei Bereiche gleichwertig (Kap. 4.3.4 in Nagra 2024c). Die drei Bereiche weisen deshalb diesbezüglich eine gleichwertige Flexibilität für die Lagerfeldplatzierung auf.
1.2 Hydraulische Barrierenwirkung (hydraulische Barriere, Transportbarriere, regionale hydrogeologische Situation)	=			In den drei Bereichen ist die hydrogeologische Situation und die Qualität der geologischen Barriere (Wasserflüsse, Transportbarriere) im heutigen Zustand gleichwertig (basierend auf Kap. 5.6.3 und 5.9 in Nagra 2024c sowie auf Kap. 5 und Enclosure 7 in Nagra 2024b). Bzgl. des Austauschs von meteorischen Wässern und Porenwasser im EG sind die Bedingungen in allen Bereichen auch hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen gleichwertig. Insgesamt zeigen die Grund- und Porenwasseruntersuchungen aus ZNO, dass vergleichsweise wenig Austausch mit oberflächennahem meteorischem Wasser stattgefunden hat (basierend auf Kap. 4.6 in Nagra 2024c).

Tab. 4-3: Fortsetzung

Kriterien und wichtige Aspekte	West	Mitte	Ost	Argumente
1.3 Geochemische Bedingungen (Mineralogie, Porenwasserchemie)		=		Die Bedingungen im Opalinuston zur Gewährleistung eines stabilen geochemischen und geomechanischen Umfeldes für die Lagerkammern sind in beiden Bereichen gleichwertig (basierend auf Kap. 5.2 und 5.4 in Nagra 2024c).
1.4 Freisetzungspfade (Art des Porenraums im intakten WG, Art der Transportpfade im WG, Selbstabdichtungsvermögen WG)		=		Art und Eigenschaften der Freisetzungspfade im Opalinuston sind aufgrund der feinen Porenstruktur und des ausgeprägten Selbstabdichtungsvermögens in allen Bereichen gleichwertig (basierend auf Kap. 5.10 in Nagra 2024c).
2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (Störung des Gesteinsverbandes durch differenzielle Bewegungen (Neotektonik), Bildung neuer Wasser- und Gaswegsamkeiten durch geochemische Vorgänge)		=		Die drei Bereiche liegen ausserhalb von Zonen mit erhöhter Erdbebenaktivität in der Schweiz; sie sind bzgl. Seismizität gleichwertig (Fig. 1-3 und Kap 6.2.3 in Nagra 2024c). Das Vorkommen an seismisch kartierten Störungen in den kompetenten Schichten um den EG ist in den drei Bereichen gleichwertig (Kap. 4.3.4 in Nagra 2024c). In allen Bereichen besteht im EG kein Karstentwicklungspotenzial (basierend auf Kap. 6.5.2 in Nagra 2024c).
2.2 Erosion (Tiefenlage, Hebungsrate, Erosionsrate, fluviale Erosion, glaziale Tiefenerosion)		=		Alle drei Bereiche bieten einen guten Schutz vor Prozessen an der Erdoberfläche; für das heutige Entwässerungsszenario sind gleichwertige Restüberdeckungen am Ende des Betrachtungszeitraums zu erwarten (basierend auf Kap. 4 in Nagra 2024g).
2.3 Lagerbedingte Einflüsse (Auflockerungszone, gas- und thermisch bedingte Effekte im WG)		=		Lagerbedingte Einflüsse können in allen drei Bereichen mit baulichen Massnahmen kontrolliert werden. Lagertiefe, Gebirgsspannungen, Gesteinsfestigkeiten und in-situ-Temperatur nehmen von Westen nach Osten leicht zu. Die erwarteten Auswirkungen von lagerbedingten Einflüssen im Opalinuston sind in den Bereichen West, Mitte und Ost insgesamt gleichwertig (basierend auf Kap. 5.5 in Nagra 2024c).
2.4 Nutzungskonflikte (Vorkommen wirtschaftlich nutzungswürdiger Rohstoffe / Ressourcen)		=		In keinem der drei Bereiche sind Ressourcen in einem für die Schweiz besonderen Masse vorhanden (basierend auf Nagra 2014c).
3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine (Fazies-Variabilität, Strömungs- und Transporteigenschaften des WG, Rolle der oberen und unteren Rahmengesteine)		=		Die Faziesvariabilität des Opalinustons sowie der unteren und oberen Rahmengesteine ist in den drei Bereichen gleichwertig (basierend auf Kap. 4.2.10 in Nagra 2024c und Kap. 5.2.1 in Nagra 2024d).
3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (insb. Schichtmächtigkeiten)		=		Die räumliche Explorierbarkeit der Rahmengesteine ist in allen drei Bereichen gleichwertig (basierend auf Enclosure 3-9c in Nagra 2024b).

Tab. 4-3: Fortsetzung

Kriterien und wichtige Aspekte	West	Mitte	Ost	Argumente
3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen (lagerbedingte Einflüsse, geologische Langzeitentwicklung)	-	0	+	Die Sicherheitsmargen bzgl. lagerbedingter Einflüsse und Erosion nehmen unter anderem mit der Tiefenlage von West nach Ost insgesamt zu (basierend auf Kap. 4 in Nagra 2024g sowie auf Kap. 5.1 und Kap. 5.2.3 in Nagra 2024d).
4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	=			In allen drei Bereichen kann mit bewährten Bauverfahren ein sicheres HAA-Lager gleichermassen gebaut, betrieben und verschlossen werden; die verbleibenden standortspezifischen Baurisiken können mit bekannten und erprobten Massnahmen kontrolliert werden (basierend auf Kap. 5 und 6 in Band 9 in Nagra 2023a).
4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung	+	0	-	Die haushälterische Nutzung des Untergrunds ist im Bereich ZNO West durch die Nähe zum HEB am besten (Fig. 4-6).

Fazit zum bevorzugten Bereich für das HAA-Lager im Standortgebiet Zürich Nordost:

Der argumentative Vergleich zeigt, dass die Bereiche ZNO West, Mitte und Ost bzgl. der meisten SGT-Kriterien gleichwertig sind. Sie weisen jedoch unterschiedliche Konfigurationen von Schichtmächtigkeiten, Schichtneigungen, Tiefenlage und Abstand zum HEB auf. Um das HAA-Lagerfeld in einer möglichst ausgewogenen Konfiguration vorläufig anzuordnen, wird der Bereich ZNO Mitte bevorzugt.

4.3.1.6 Laterale Ausdehnung des EG und der Platzreserven

Im für das HAA-Lagerfeld bevorzugten Bereich ZNO Mitte werden der EG und die Platzreserven zum Zweck des Standortvergleichs lateral gemäss Beschreibung in Kap. 3.1.6 definiert. Der EG wird in der Nähe des HEB und die Platzreserven östlich angrenzend zum EG angeordnet (Fig. 4-6d). Die so abgegrenzte Fläche beansprucht den Hauptteil der Bereiche ZNO Mitte und Ost.

4.3.2 Vorläufige Auslegung und Projektierung des geologischen Tiefenlagers

Innerhalb des so definierten EG erfolgt die vorläufige Anordnung des HAA-Lagerfelds für den Zweck des Standortvergleichs. Die Lagerfeldebene kann innerhalb des Opalinustons gut eingebettet werden, da überall eine geeignete Kombination aus Schichtmächtigkeit und -neigung vorliegt (Fig. 4-5). Dabei wird mit den Lagerkammern ein ausreichender Abstand zu bestehenden Tiefbohrungen und zur äusseren Begrenzung des EG eingehalten.

Auf dieser Basis und unter den in Kap. 3.2 genannten standortspezifischen Randbedingungen und Anforderungen wurde das beispielhafte Lagerprojekt erarbeitet (Fig. 4-6d; und Kap. 6.3 in Band 6 in Nagra 2023a). Haupt- und Pilotlager des HAA-Lagers liegen auf rund 700 m Tiefe, der Zentrale Bereich mit den Testbereichen und die Zugangsbauwerke liegen ausserhalb des EG. Erschlossen wird der Bereich untertag mittels Schächte von der Oberflächenanlage sowie von den Nebenzugangsanlagen im Bereich Isenbuck – Berg und «Rinauer Feld» auf dem Gemeindegebiet von Marthalen und Rheinau aus.

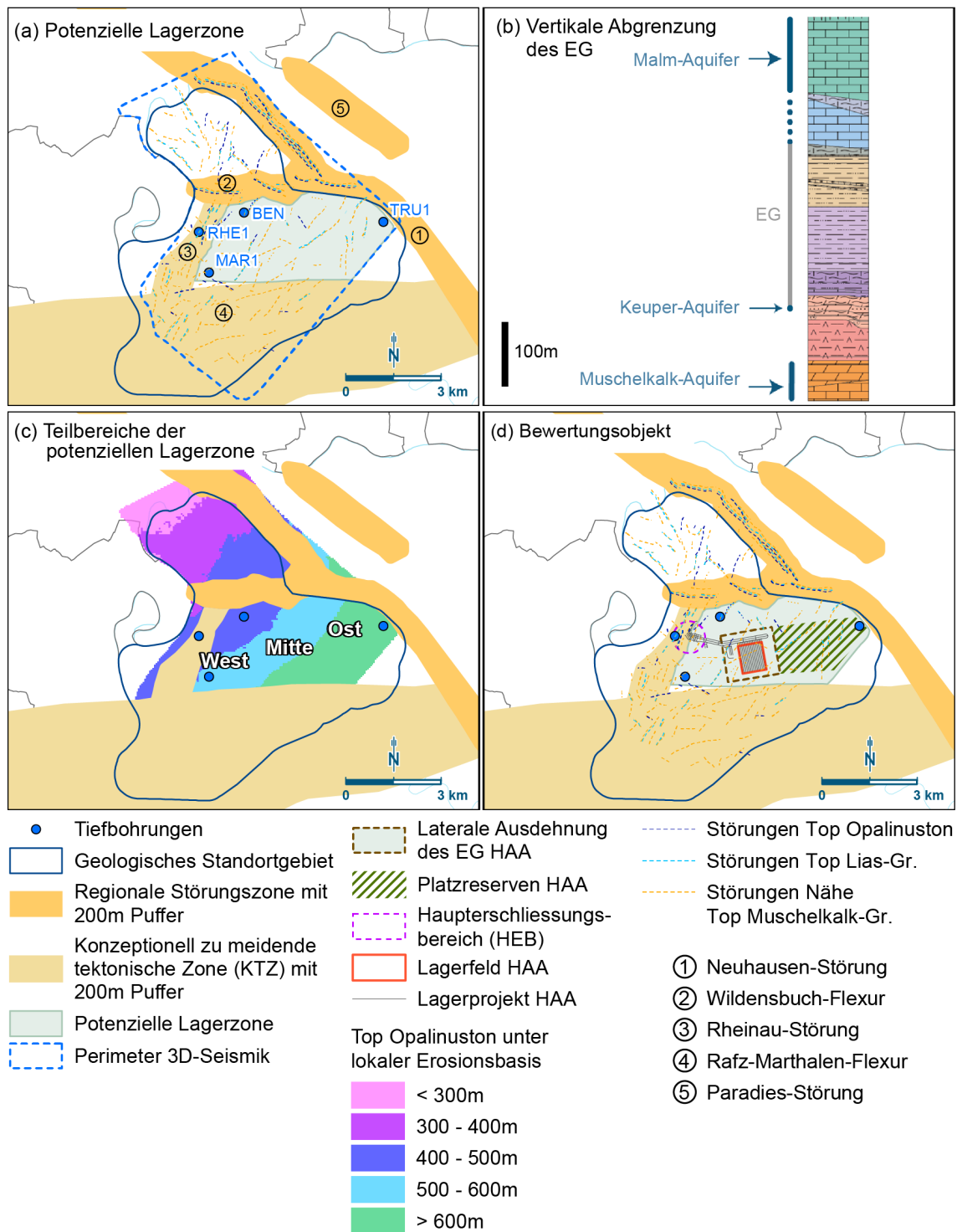


Fig. 4-6: Definition des Bewertungsobjektes HAA Zürich Nordost

5 Definition der Bewertungsobjekte für SMA

In diesem Kapitel wird die Umsetzung der Methodik zur Definition der Bewertungsobjekte für den sicherheitstechnischen Vergleich der SMA-Lager pro Standortgebiet erläutert.

5.1 Standortgebiet Jura Ost

5.1.1 Einengung des untertägigen Raums zur Abgrenzung des EG

Ermittlung der potenziellen Lagerzone

Die potenzielle Lagerzone für SMA im Standortgebiet JO (Fig. 5-1a, Fig. 5-2a) ist weitgehend identisch mit derjenigen für HAA und ist analog begründet (vgl. Kap. 4.1.1.1). Sie weist aber im nordwestlichen Bereich eine grössere Ausdehnung auf, da die Anforderungen an die Tiefenlage zum Schutz vor Erosion für SMA weniger einschränkend sind als für HAA (vgl. Kap. 3.1.1).

Vertikale Ausdehnung des EG in der potenziellen Lagerzone

Vertikal wird für SMA, analog wie für HAA, die gesamte Gesteinsabfolge zwischen dem Keuper-Aquifer unterhalb und dem Hauptrogenstein-Aquifer oberhalb des Opalinustons als EG betrachtet, welcher in der potenziellen Lagerzone Mächtigkeiten von rund 200 – 260 m aufweist (vgl. Kap. 4.1.1.2).

Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede im Wirtgestein

Die Potenzialraumkarten zu den raumwirksamen qualitativen Unterschieden im Wirtgestein sind in Fig. 5-1 dargestellt. Für eine Platzierung des SMA-Lagerfelds wird praktisch die gesamte potenzielle Lagerzone als bevorzugt bis stark bevorzugt eingestuft.

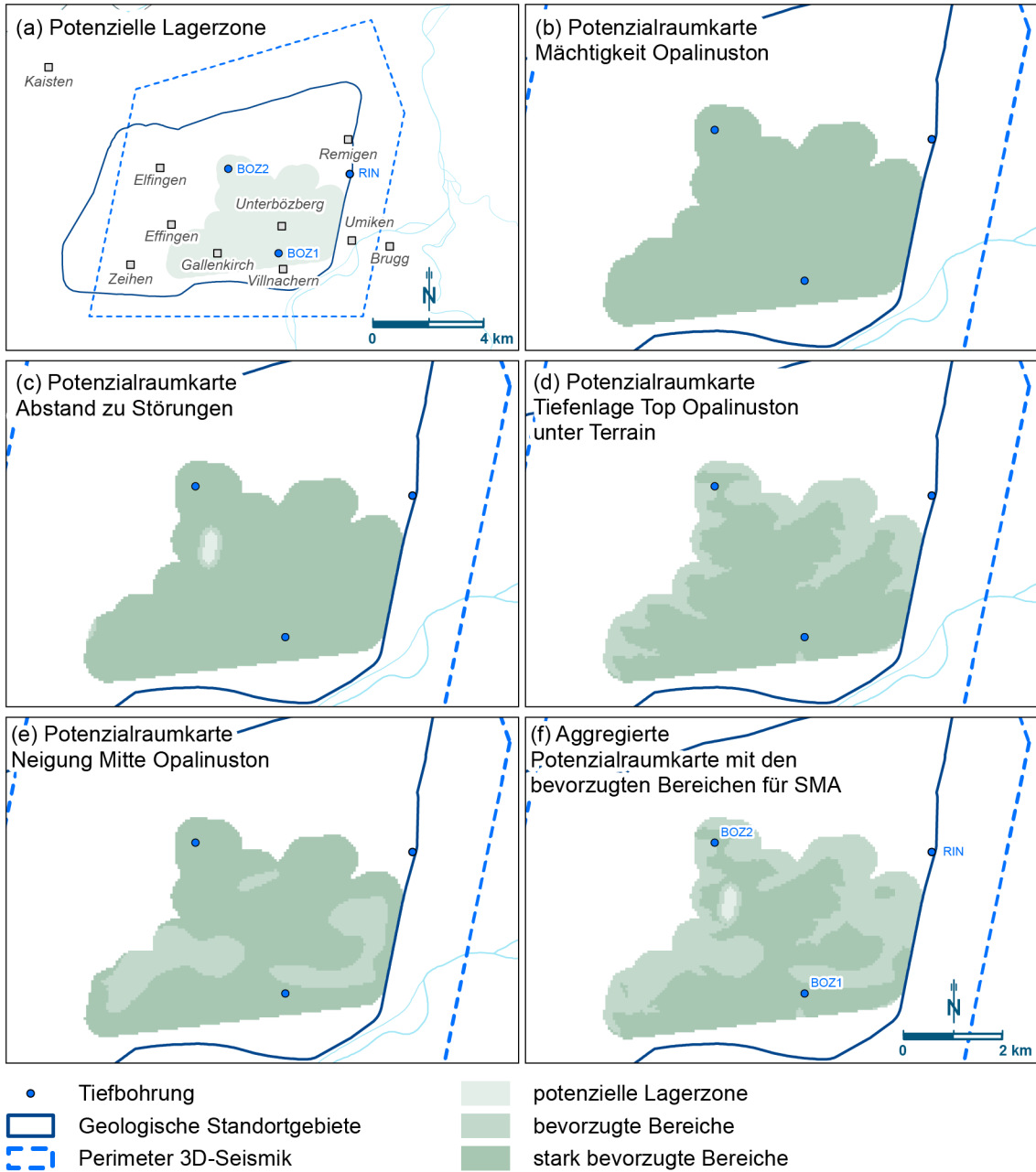


Fig. 5-1: Potenzielle Lagerzone für die Platzierung des SMA-Lagerfelds im Standortgebiet Jura Ost

Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede in den Rahmengesteinen

Für die Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede in den Rahmengesteinen wird, analog wie bei HAA, zwischen einem westlichen und östlichen Teil der potenziellen Lagerzone unterschieden (Fig. 5-2c). Die Ergebnisse der qualitativen Beurteilung dieser beiden Teilbereiche für SMA fallen analog aus zu denjenigen für HAA (vgl. Tab. 4-1). Der argumentative Vergleich zeigt, dass die Bereiche JO West und Ost bzgl. der meisten SGT-Kriterien gleichwertig sind. Analog zu HAA wird aufgrund der Unterschiede im seismisch kartierten Störungsinventar und der Nähe zum HEB der östliche Bereich in JO auch für die vorläufige Platzierung des SMA-Lagerfelds zum Zweck des Standortvergleichs gewählt.

Laterale Abgrenzung des EG und der Platzreserven

Im für das SMA-Lagerfeld bevorzugten Bereich JO Ost werden der EG und die Platzreserven zum Zweck des Standortvergleichs lateral gemäss Beschreibung in Kap. 3.1.6 definiert. Der EG wird in der Nähe des HEB und die Platzreserven werden nordwestlich und südlich des EG angeordnet (Fig. 5-2d). Dabei wird darauf geachtet, die kartierten Störungen soweit möglich zu meiden. Die so abgegrenzte Fläche beansprucht den Hauptteil des Bereichs JO Ost und ist frei von seismisch kartierten Störungen auf der Ober- und Untergrenze des Opalinustons.

5.1.2 Vorläufige Auslegung und Projektierung des geologischen Tiefenlagers

Innerhalb des so definierten EG erfolgt die vorläufige Anordnung des SMA-Lagerfelds für den Zweck des Standortvergleichs unter Berücksichtigung der in Kap. 3.2 aufgeführten Aspekte. Die Lagerfeldebene kann innerhalb des Opalinustons gut eingebettet werden, da überall eine geeignete Kombination aus Schichtmächtigkeit und -neigung vorliegt (Fig. 5-1). Dabei wird mit den Lagerkammern ein ausreichender Abstand zu bestehenden Tiefbohrungen und zur äusseren Begrenzung des EG eingehalten.

Auf dieser Basis und unter den in Kap. 3.2 genannten standortspezifischen Randbedingungen und Anforderungen wurde das beispielhafte Lagerprojekt erarbeitet (Fig. 5-2d). Haupt- und Pilotlager des SMA-Lagers liegen auf rund 500 m Tiefe, der Zentrale Bereich mit den Testbereichen und die Zugangsbauwerke liegen ausserhalb des EG. Erschlossen wird der Bereich untertag analog zum HAA-Lager (vgl. Kap. 4.1.2).

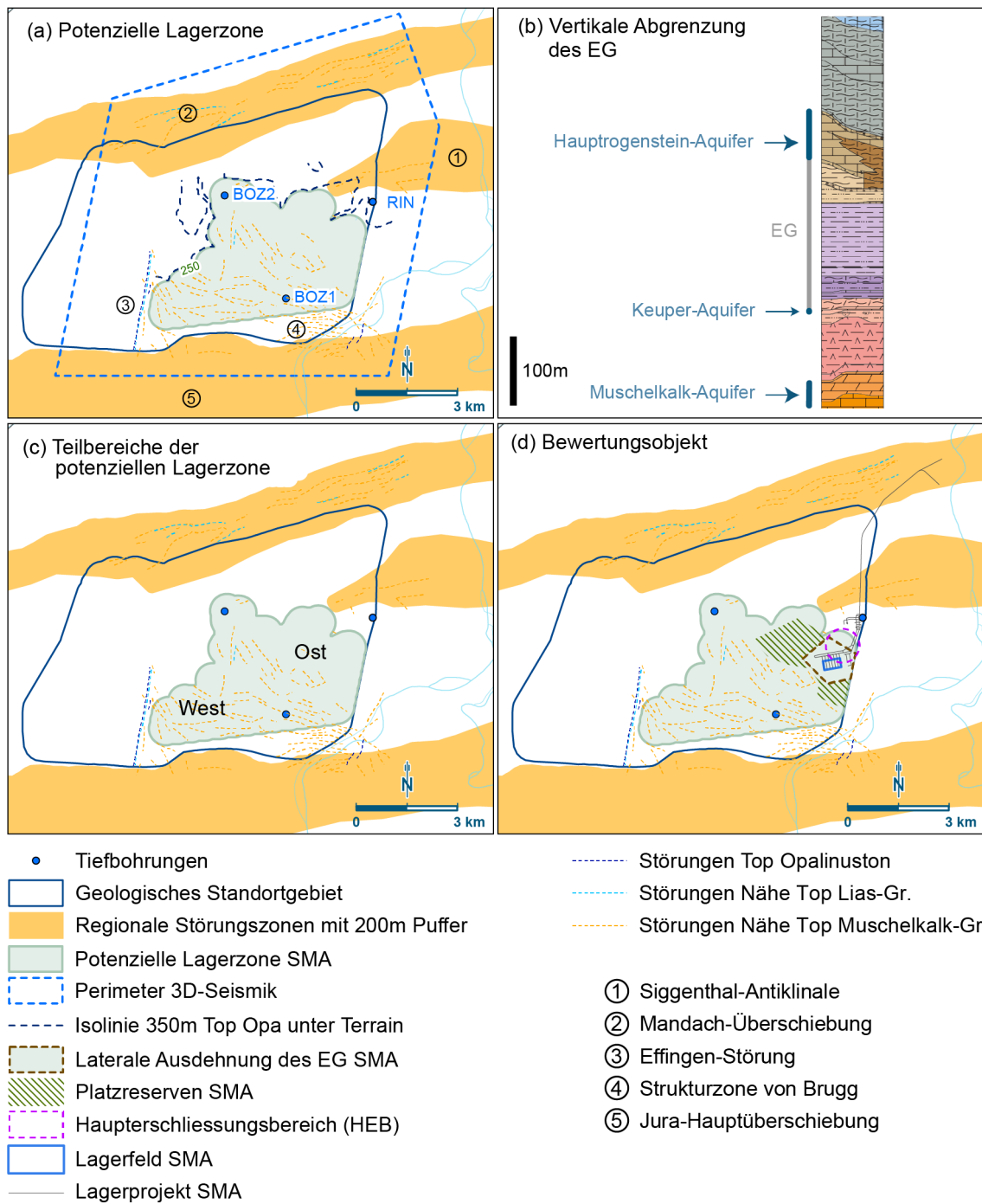


Fig. 5-2: Definition des Bewertungsobjektes SMA Jura Ost

5.2 Standortgebiet Nördlich Lägern

5.2.1 Einengung des untertägigen Raums zur Abgrenzung des EG

Ermittlung der potenziellen Lagerzone

Die potenzielle Lagerzone für SMA im Standortgebiet NL (Fig. 5-3a, Fig. 5-4a) ist identisch mit derjenigen für HAA und ist analog begründet (vgl. Kap. 4.2.1.1).

Vertikale Ausdehnung des EG in der potenziellen Lagerzone

Vertikal wird für SMA, analog wie für HAA, die gesamte Gesteinsabfolge zwischen dem Keuper-Aquifer unterhalb und dem Malm-Aquifer oberhalb des Opalinustons als EG betrachtet, welcher in der potenziellen Lagerzone Mächtigkeiten von rund 290 – 380 m aufweist (vgl. Kap. 4.2.1.2).

Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede im Wirtgestein

Die Potenzialraumkarten zu den raumwirksamen qualitativen Unterschieden im Wirtgestein sind in Fig. 5-3 dargestellt. Für eine Platzierung des SMA-Lagerfelds wird praktisch die gesamte potenzielle Lagerzone als gleichwertig bevorzugt eingestuft.

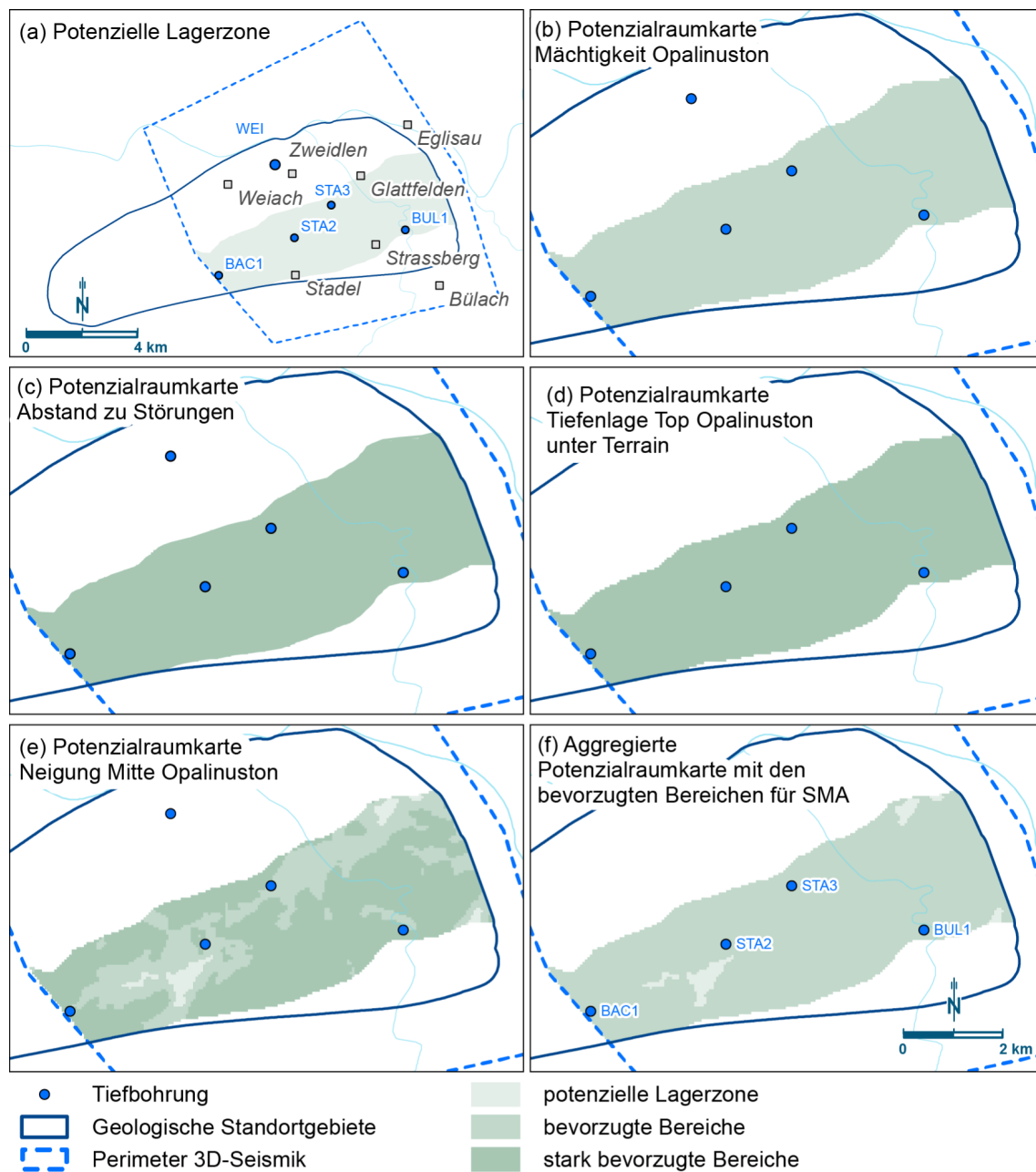


Fig. 5-3: Potenzielle Lagerzone für die Platzierung des SMA-Lagerfelds im Standortgebiet Nördlich Lägern

Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede in den Rahmengesteinen

Für die Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede in den Rahmengesteinen wird, analog wie bei HAA, zwischen einem westlichen und östlichen Teil der potenziellen Lagerzone unterschieden (Fig. 5-4c). Die Ergebnisse der qualitativen Beurteilung dieser beiden Teilbereiche fallen für SMA sehr ähnlich aus wie für HAA (vgl. Tab. 4-2), wobei für SMA zu berücksichtigen ist, dass NL als Standortgebiet für ein HAA-Lager gewählt wurde (Nagra 2025). Die Flächen, die dem sicherheitstechnischen Vergleich der HAA-Lager zugrunde gelegt wurden (Fig. 5-4c) stehen für den Vergleich der SMA-Lager nicht mehr zur Verfügung. Für ein SMA-Lagerfeld verbleibt auch im Bereich Ost noch ausreichend Platz, jedoch entfällt der Vorteil beim Platzangebot (Kriterium 1.1). Es wäre zudem eine grössere Distanz zwischen SMA-Lagerfeld und HEB in Kauf zu nehmen, was im Sinne der häushälterischen Nutzung des Untergrunds einen Nachteil beim Kriterium 4.2 mit sich bringen würde.

Deshalb wird der Bereich NL West wegen der höheren Flexibilität für die vorläufige Platzierung des SMA-Lagerfelds über die nicht vom HAA-Lagerfeld beanspruchten Teilbereiche in NL Ost bevorzugt.

Laterale Ausdehnung des EG und der Platzreserven

Im für das SMA-Lagerfeld bevorzugten Bereich NL West werden der EG und die Platzreserven zum Zweck des Standortvergleichs lateral gemäss Beschreibung in Kap. 3.1.6 definiert. Der EG wird in der Nähe des HEB und die Platzreserven westlich und südlich angrenzend angeordnet (Fig. 5-4d). Dabei wird darauf geachtet, Bereiche mit günstiger Neigung zu berücksichtigen. Die so abgegrenzte Fläche beansprucht den nördlichen Teil des Bereichs NL West und ist frei von seismisch kartierten Störungen auf der Ober- und Untergrenze des Opalinustons.

5.2.2 Vorläufige Auslegung und Projektierung des geologischen Tiefenlagers

Innerhalb des so definierten EG erfolgt die vorläufige Anordnung des SMA-Lagerfelds für den Zweck des Standortvergleichs unter Berücksichtigung der in Kap. 3.2 aufgeführten Aspekte. Dabei wird ein Lagerfeld gewählt, dass eine besonders geeignete Kombination aus Schichtmächtigkeit und -neigung innerhalb des Opalinustons aufweist (Fig. 5-3). Weiter wird mit den Lagerkammern ein ausreichender Abstand zu bestehenden Tiefbohrungen und zur äusseren Begrenzung des EG eingehalten.

Auf dieser Basis und unter den in Kap. 3.2 genannten standortspezifischen Randbedingungen und Anforderungen wurde das beispielhafte Lagerprojekt erarbeitet (Fig. 5-4d). Haupt- und Pilotlager des SMA-Lagers liegen auf rund 900 m Tiefe, der Zentrale Bereich mit den Testbereichen und die Zugangsbauwerke liegen ausserhalb des EG. Erschlossen wird der Bereich untertag analog zum HAA-Lager (vgl. Kap. 4.2.2).

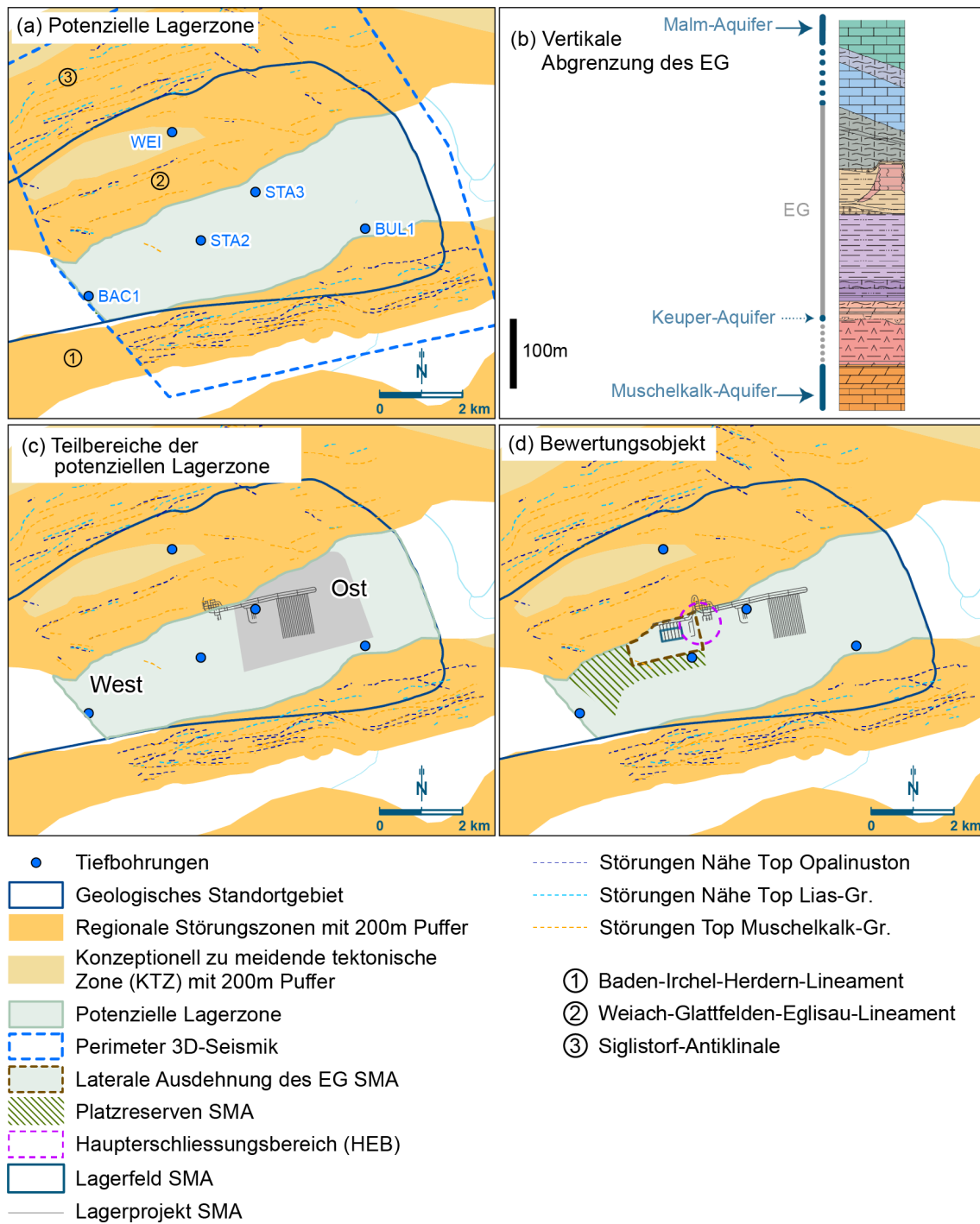


Fig. 5-4: Definition des Bewertungsobjektes SMA Nördlich Lägern

5.3 Standortgebiet Zürich Nordost

5.3.1 Einengung des untertägigen Raums zur Abgrenzung des EG

Ermittlung der potenziellen Lagerzone

Die potenzielle Lagerzone für SMA im Standortgebiet ZNO (Fig. 5-5a, Fig. 5-6a) ist identisch mit derjenigen für HAA und ist analog begründet (vgl. Kap. 4.3.1.1). Die Bereiche nördlich der Wildensbuch-Flexur würden sich für ein SMA-Lager auch eignen. Sie werden aber aufgrund des grosszügigen Platzangebots beim Standortvergleich nicht berücksichtigt, da sie bzgl. Tiefenlage und Mächtigkeit höchstens gleich gut geeignet sind wie die Bereiche südlich der Wildensbuch-Flexur. Deren Berücksichtigung würde das Gesamtbild nicht ändern.

Vertikale Ausdehnung des EG in der potenziellen Lagerzone

Vertikal wird für SMA, analog wie für HAA, die gesamte Gesteinsabfolge zwischen dem Keuper-Aquifer unterhalb und dem Malm-Aquifer oberhalb des Opalinustons als EG betrachtet, welcher in der potenziellen Lagerzone Mächtigkeiten von rund 260 – 300 m aufweist (vgl. Kap. 4.3.1.2).

Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede im Wirtgestein

Die Potenzialraumkarten zu den raumwirksamen qualitativen Unterschieden im Wirtgestein sind in Fig. 5-5 dargestellt. Auch wenn sich die potenzielle Lagerzone in Zürich Nordost hinsichtlich der einzelnen Indikatoren räumlich leicht strukturiert präsentiert, wird der überwiegende Teil als bevorzugt für eine Platzierung des SMA-Lagerfelds eingestuft.

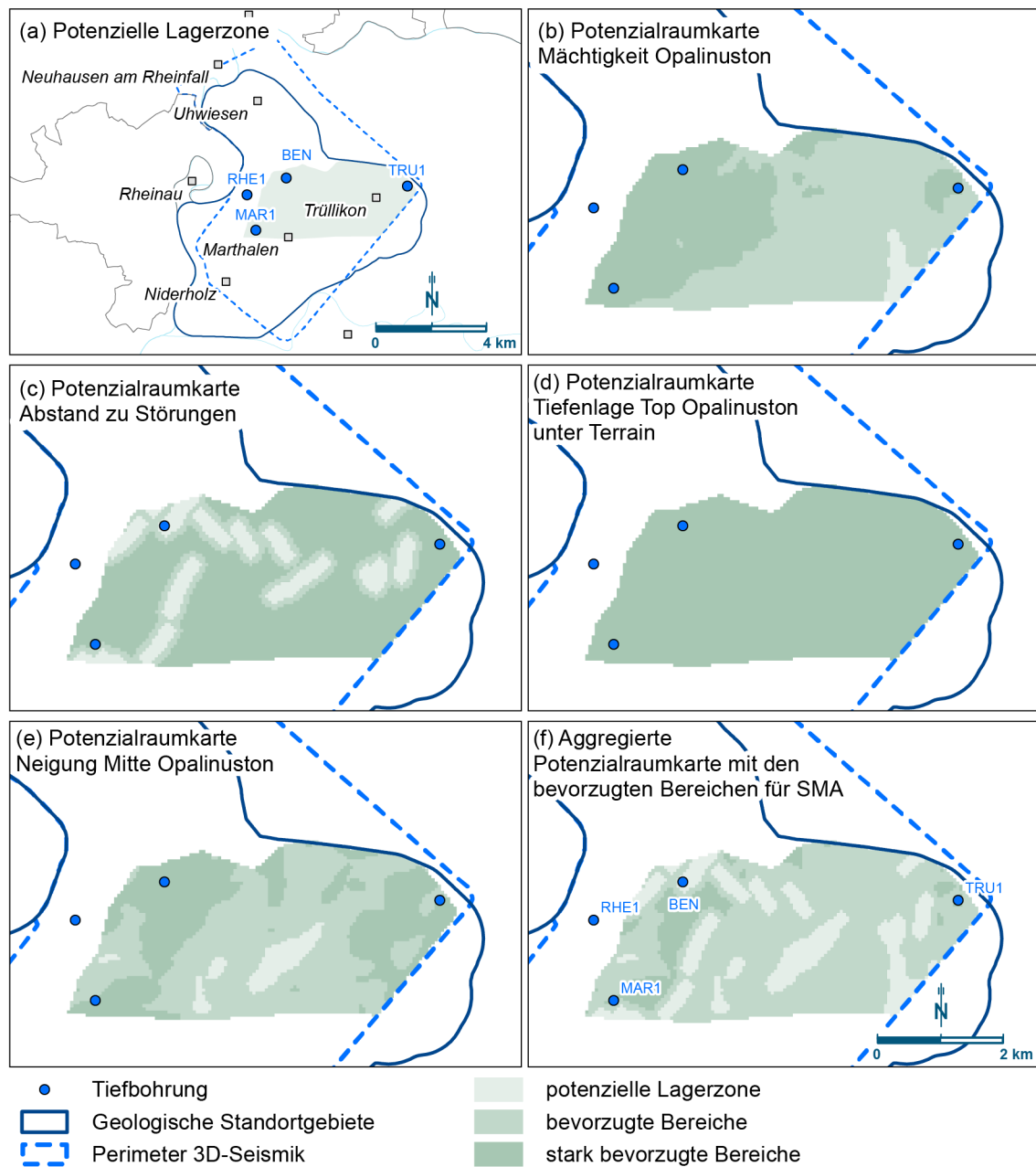


Fig. 5-5: Potenzielle Lagerzone für die Platzierung des SMA-Lagerfelds im Standortgebiet Zürich Nordost

Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede in den Rahmengesteinen

Für die Analyse raumwirksamer qualitativer Unterschiede in den Rahmengesteinen wird, analog wie bei HAA, zwischen den Teilen West, Mitte und Ost der potenziellen Lagerzone unterschieden (Fig. 5-6c). Die Ergebnisse der qualitativen Beurteilung dieser Teilbereiche fallen sehr ähnlich aus wie diejenigen für HAA (vgl. Tab. 4-3), wobei für SMA speziell zu berücksichtigen ist, dass sich der Opalinuston in allen Bereichen in einer grossen Tiefenlage von mehr als 450 m unter Terrain befindet. Dies gewährleistet für SMA wegen des im Vergleich zu HAA kürzeren Betrachtungszeitraums einen mehr als ausreichenden Schutz vor Prozessen an der Erdoberfläche (Klima, Erosion) (Kriterien 2.2, 3.3).

Der argumentative Vergleich zeigt, dass die Bereiche ZNO West, Mitte und Ost bzgl. der meisten SGT-Kriterien auch für ein SMA-Lager gleichwertig sind. Analog zu HAA wird der Bereich ZNO Mitte bevorzugt, um das SMA-Lagerfeld in einer möglichst ausgewogenen Konfiguration vorläufig anzuordnen.

Laterale Ausdehnung des EG und der Platzreserven

Im für das SMA-Lagerfeld bevorzugten Bereich ZNO Mitte werden der EG und die Platzreserven zum Zweck des Standortvergleichs lateral gemäss Beschreibung in Kap. 3.1.6 definiert. Der EG wird in der Nähe des HEB und die Platzreserven darum herum angeordnet (Fig. 5-6d).

5.3.2 Vorläufige Auslegung und Projektierung des geologischen Tiefenlagers

Innerhalb des so definierten EG erfolgt die vorläufige Anordnung des SMA-Lagerfelds für den Zweck des Standortvergleichs unter Berücksichtigung der in Kap. 3.2 aufgeführten Aspekte. Die Lagerfeldebene kann innerhalb des Opalinustons gut eingebettet werden, da überall eine geeignete Kombination aus Schichtmächtigkeit und -neigung vorliegt (Fig. 5-5). Dabei wird mit den Lagerkammern ein ausreichender Abstand zu bestehenden Tiefbohrungen und zur äusseren Begrenzung des EG eingehalten.

Auf dieser Basis und unter den in Kap. 3.2 genannten standortspezifischen Randbedingungen und Anforderungen wurde das beispielhafte Lagerprojekt erarbeitet (Fig. 5-6d). Haupt- und Pilotlager des SMA-Lagers liegen auf rund 700 m Tiefe, der Zentrale Bereich mit den Testbereichen und die Zugangsbauwerke liegen ausserhalb des EG. Erschlossen wird der Bereich untertag analog zum HAA-Lager (vgl. Kap. 4.3.2).

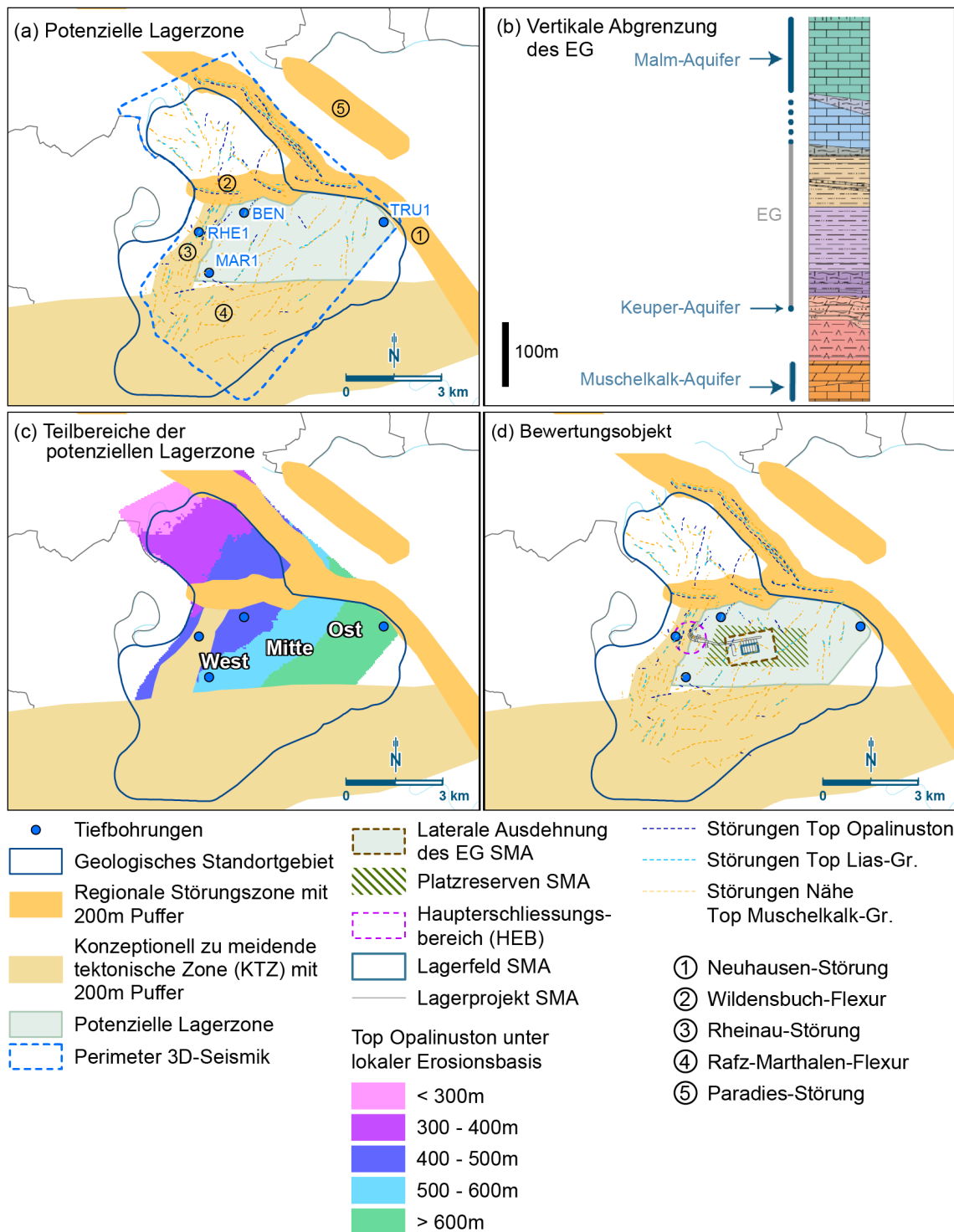


Fig. 5-6: Definition des Bewertungsobjektes SMA Zürich Nordost

6 Schlussfolgerungen

Die Analyse des untertägigen Raums zeigt, dass das Platzangebot in allen Standortgebieten ein Mehrfaches des Platzbedarfs sowohl für ein HAA- als auch für ein SMA-Lager beinhaltet. Es besteht in allen Standortgebieten eine grosse Flexibilität bei der Lagerfeldplatzierung. Dank identischer Anforderungen pro Lagertyp bei der Ausarbeitung der beispielhaften standortspezifischen Lagerprojekte liegt der Fokus des sicherheitstechnischen Vergleichs auf den geologischen Standorteigenschaften. Die Bewertungsobjekte sind so definiert, dass eine möglichst gute Qualität des Barriersystems gewährleistet ist, so dass im Rahmen des sicherheitstechnischen Vergleichs für die Standortwahl eine korrekte Bewertung vorgenommen werden kann.

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 behutsame Umgang mit den Mitteln für eine bessere Umsetzung und Reduktion der Auswirkungen auf Raum und Umwelt.

7 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.
- 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.
- KEV (2004): Kernenergieverordnung (KEV) vom 10. Dezember 2004, Stand am 1. Januar 2024. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.11, Schweiz.
- Nagra (2002): Project Opalinus Clay: Safety report: Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Technical Report NTB 02-05.
- 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 (2014a): Konzepte der Standortuntersuchungen für SGT Etappe 3. Nagra Arbeitsbericht NAB 14-83.
- Nagra (2014b): Textband: Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT-Etappe 2: Sicherheits-technischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete. Nagra Technischer Bericht NTB 14-01.
- Nagra (2014c): SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen Dossier VII Nutzungskonflikte. Nagra Technischer Bericht NTB 14-02 Dossier VII.
- Nagra (2019): Platzierung der Hauptschliessungsbereiche (HEB) in den Standortgebieten Jura Ost, Nördlich Lägern und Zürich Nordost. Nagra Arbeitsbericht NAB 19-19.
- 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): Geological Properties of the Jura Ost, Nördlich Lägern and Zürich Nordost Siting Regions for Safety Assessment. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-10 Rev. 1.
- Nagra (2024c): Geosynthesis of Northern Switzerland. Nagra Technical Report NTB 24-17.

Nagra (2024d): Model Supported Assessment of the Containment-Providing Rock Zone in Support of the Site Selection. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-26.

Nagra (2024e): Qualitative Bewertung für den sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-23 Rev. 1.

Nagra (2024f): Safety and Repository Concept and Provisional Design. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-18 Rev. 1.

Nagra (2024g): Geological long-term evolution: Erosion. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-15.

Nagra (2025): Rahmenbewilligungsgesuch für das geologische Tiefenlager – Begründung der Standortwahl. Nagra Technischer Bericht NTB 24-03.