



ARBEITSBERICHT NAB 24-23 Rev. 1

Qualitative Bewertung für den
sicherheitstechnischen Vergleich in
Etappe 3 des Sachplans geologische
Tiefenlager

Oktober 2024



ARBEITSBERICHT

NAB 24-23 Rev. 1

Qualitative Bewertung für den
sicherheitstechnischen Vergleich in
Etappe 3 des Sachplans geologische
Tiefenlager

Oktober 2024

STICHWÖRTER

Rahmenbewilligungsgesuch, geologische Tiefenlager,
qualitative Bewertung, SGT-Kriterien

**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 24-23, Mai 2025: Grund der Revision

Dieser Bericht wurde im Mai 2025 revidiert. Es wurden Referenzierungen im Kap. 4 und Anhang A präzisiert, ergänzt und bereinigt. Anhang D wurde neu erstellt. Weiter wurde für ausgewählte Indikatoren die Begründung überarbeitet (insbesondere Anhänge A.10 und A.11) und die Charakterisierung ergänzt (insbesondere Kap 4.3.2 und 4.3.3). Dabei wurde in Kr 3.2 der Name des Indikators präzisiert und ein Fehler in der Rangierung der Standortgebiete korrigiert, dies auch in Fig. 5-2 und Tab. 5-1. Weiter wurden Formulierungen optimiert sowie die Fig. 4-1 und A-1 bis A-14 ersetzt.

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

Zusammenfassung

Bei der Ankündigung der Standorte für die Ausarbeitung der Rahmenbewilligungsgesuche im Herbst 2022 hat die Nagra die Wahl von Nördlich Lägern mit der besten Qualität, der grössten Stabilität und der grössten Flexibilität begründet. Für die Begründung der Standortwahl im Rahmenbewilligungsgesuch braucht es gemäss den Vorgaben des Sachplans eine qualitative Bewertung der Standortgebiete anhand der 13 SGT-Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit. Diese qualitative Bewertung hat sich in jedem Standortgebiet und für jeden Lager-typ auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich und das darin erarbeitete, beispielhafte Lager-projekt (sog. Bewertungsobjekt) zu beziehen. Der vorliegende Bericht dokumentiert das Vor-gehen und die Ergebnisse der qualitativen Bewertung.

Auch in Etappe 3 basiert die qualitative Bewertung der Standortgebiete auf einem indikator-basierten Verfahren. Dazu wurden die in Etappe 2 verwendeten Indikatoren und Bewertungs-verfahren überprüft und dem Projektstand der Etappe 3 angepasst. Die Bewertung erfolgt mit drei verschiedenen Methoden der multikriteriellen Entscheidungsfindung. Einerseits werden die Bewertungsobjekte anhand einer Nutzwertanalyse bewertet und die Nutzwerte von der Stufe der Indikatoren auf die Stufe der SGT-Kriterien und weiter auf die Stufe Gesamtbewertung aggre-giert. In der zweiten Methode werden die Bewertungsobjekte auf der Grundlage standort-spezifischer Daten auf Stufe Indikator rangiert (Ranking-Methode). Die dritte Methode basiert auf einem paarweisen Vergleich der Bewertungsobjekte anhand standortspezifischer Daten auf Stufe Indikator (Outranking-Methode).

Die Nutzwertanalyse ergibt für alle Standortgebiete eine günstige bis sehr günstige Bewertung und bestätigt die sicherheitstechnische Eignung der zur Auswahl stehenden Standortgebiete. Die klaren Vorteile, welche für eine Positivwahl notwendig sind, ergeben sich aus den Bewertungs-methoden, mit denen die günstigsten Bedingungen bzw. die grössten Sicherheitsreserven eines Standortes identifiziert werden.

Die Ranking-Methode und Outranking-Methode zeigen übereinstimmend, dass Nördlich Lägern sowohl für HAA als auch für SMA der beste Standort ist. Die ausschlaggebenden Eigenschaften für diese Wahl von Nördlich Lägern sind die grösste Mächtigkeit der geologischen Barriere, die günstigsten hydrogeologischen Bedingungen, die einfachste geologische Situation und der beste Schutz vor Erosion. Zusammengefasst ergibt sich Nördlich Lägern als das Standortgebiet mit den grössten Sicherheitsmargen bezüglich Qualität, Stabilität und Flexibilität.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	VII
Figurenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XI
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 Methodik für die qualitative Bewertung anhand der 13 SGT-Kriterien.....	5
3.1 Zielsetzung und Ausgangslage der qualitativen Bewertung in der SGT-Etappe 3	5
3.2 Definition der Bewertungsmethodik in SGT-Etappe 3.....	7
3.2.1 Fokussierung der Kriteriengruppen	7
3.2.2 Überprüfung der Indikatoren und deren Bewertungsskalen	8
3.2.3 Definition von Methoden zur multikriteriellen Entscheidungsfindung	9
3.3 Vorgehen bei der qualitativen Bewertung	9
3.4 Grundlagen und Definition der Bewertungsobjekte	10
4 Charakterisierung und Bewertung der EG für HAA und SMA	15
4.1 Eigenschaften des EG (Kriteriengruppe 1).....	15
4.1.1 Räumliche Ausdehnung (Kriterium 1.1)	15
4.1.1.1 Platzangebot untertag.....	15
4.1.1.2 Mächtigkeit EG.....	16
4.1.1.3 Seismisch kartierte Störungen an Wirtgesteinsgrenzen.....	16
4.1.1.4 Zusammenstellung der Bewertungen.....	18
4.1.2 Hydraulische Barrierewirkung (Kriterium 1.2)	19
4.1.2.1 Darcy-Fluss im EG	19
4.1.2.2 Tracer-Fluss im EG.....	19
4.1.2.3 Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation	20
4.1.2.4 Zusammenstellung der Bewertungen.....	21
4.1.3 Geochemische Bedingungen (Kriterium 1.3)	22
4.1.3.1 Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Sorptionsvermögen	22
4.1.3.2 Salinität im WG	23
4.1.3.3 Zusammenstellung der Bewertungen.....	23
4.1.4 Freisetzungspfade (Kriterium 1.4).....	24
4.1.4.1 Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums im WG.....	24
4.1.4.2 Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Selbstabdichtungsvermögen	24
4.1.4.3 Störungstransmissivität im WG	25
4.1.4.4 Zusammenstellung der Bewertungen.....	27

4.2	Langzeitstabilität (Kriteriengruppe 2)	28
4.2.1	Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (Kriterium 2.1)	28
4.2.1.1	Seismizität	28
4.2.1.2	Seismisch kartierte Störungen in kompetenten Formationen	29
4.2.1.3	Potenzial für Bildung von Wasserwegsamkeiten im EG durch Lösungsprozesse	30
4.2.1.4	Zusammenstellung der Bewertungen	32
4.2.2	Erosion (Kriterium 2.2)	33
4.2.2.1	Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte	33
4.2.2.2	Zusammenstellung der Bewertungen	36
4.2.3	Lagerbedingte Einflüsse (Kriterium 2.3)	37
4.2.3.1	Länge des Freisetzungspfads im intakten WG	37
4.2.3.2	Thermisch bedingte Porenwasser-Überdrücke im WG	38
4.2.3.3	Gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG	39
4.2.3.4	Zusammenstellung der Bewertungen	41
4.2.4	Nutzungskonflikte (Kriterium 2.4)	42
4.2.4.1	Rohstoffvorkommen	42
4.2.4.2	Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen	43
4.2.4.3	Mineral- und Thermalwassernutzungen	44
4.2.4.4	Zusammenstellung der Bewertungen	45
4.3	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (Kriteriengruppe 3)	46
4.3.1	Charakterisierbarkeit der Gesteine (Kriterium 3.1)	46
4.3.1.1	Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften im Opalinuston	47
4.3.1.2	Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften in den Rahmengesteinen	47
4.3.1.3	Zusammenstellung der Bewertungen	48
4.3.2	Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (Kriterium 3.2)	48
4.3.2.1	Auswirkungen der Ungewissheiten zu den EG-begrenzenden Aquiferen	49
4.3.2.2	Zusammenstellung der Bewertungen	50
4.3.3	Prognostizierbarkeit von Langzeitveränderungen (Kriterium 3.3)	50
4.4	Bautechnische Eignung (Kriteriengruppe 4)	52
4.4.1	Nachweis der bautechnischen Machbarkeit der Lagerprojekte	52
4.4.2	Zusammenstellung der Bewertungen	54
5	Aggregation der Bewertungen und Synthese der Ergebnisse	55
5.1	Zusammenstellung der Ergebnisse	55
5.2	Aggregation der Ergebnisse der Nutzwertanalyse	57
5.3	Aggregation der Ergebnisse der Ranking-Methode	58
5.4	Aggregation der Ergebnisse der Outranking-Methode	61
5.5	Synthese der Ergebnisse	63
6	Literaturverzeichnis	67

Anhang A	Begründung der in Etappe 3 verwendeten Indikatoren und Bewertungsskalen	A-1
A.1	Räumliche Ausdehnung (Kriterium 1.1)	A-1
A.1.1	Platzangebot untertag	A-2
A.1.2	Mächtigkeit EG	A-2
A.1.3	Seismisch kartierte Störungen an Wirtgesteinsgrenzen	A-3
A.1.4	Zusammenfassung	A-4
A.2	Hydraulische Barrierewirkung (Kriterium 1.2)	A-4
A.2.1	Darcy-Fluss im EG	A-5
A.2.2	Tracer-Fluss im EG	A-6
A.2.3	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation	A-7
A.2.4	Zusammenfassung	A-8
A.3	Geochemische Bedingungen (Kriterium 1.3)	A-9
A.3.1	Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Sorptionsvermögen	A-9
A.3.2	Salinität im WG	A-10
A.3.3	Zusammenfassung	A-11
A.4	Freisetzungspfade (Kriterium 1.4)	A-11
A.4.1	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums im WG	A-12
A.4.2	Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Selbstabdichtungsvermögen	A-13
A.4.3	Störungstransmissivität im WG	A-14
A.4.4	Zusammenfassung	A-15
A.5	Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (Kriterium 2.1)	A-16
A.5.1	Seismizität	A-17
A.5.2	Seismisch kartierte Störungen in kompetenten Formationen	A-17
A.5.3	Potenzial für Bildung von Wasserwegsamkeiten im EG durch Lösungsprozesse	A-18
A.5.4	Zusammenfassung	A-19
A.6	Erosion (Kriterium 2.2)	A-20
A.6.1	Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte	A-20
A.6.2	Zusammenfassung	A-21
A.7	Lagerbedingte Einflüsse (Kriterium 2.3)	A-22
A.7.1	Länge des Freisetzungspfads im intakten WG	A-23
A.7.2	Thermisch bedingte Porenwasser-Überdrücke im WG	A-23
A.7.3	Gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG	A-24
A.7.4	Zusammenfassung	A-25
A.8	Nutzungskonflikte (Kriterium 2.4)	A-26
A.8.1	Rohstoffvorkommen	A-28
A.8.2	Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrundes	A-28
A.8.3	Mineral- und Thermalwassernutzungen	A-28
A.8.4	Zusammenfassung	A-29
A.9	Charakterisierbarkeit der Gesteine (Kriterium 3.1)	A-30
A.9.1	Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften im Opalinuston / in den Rahmengesteinen	A-31
A.9.2	Zusammenfassung	A-32

A.10	Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (Kriterium 3.2).....	A-32
A.10.1	Auswirkungen der Ungewissheiten zu den EG-begrenzenden Aquiferen.....	A-33
A.10.2	Zusammenfassung	A-33
A.11	Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen (Kriterium 3.3).....	A-34
A.11.1	Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte	A-35
A.11.2	Thermisch und gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG.....	A-36
A.11.3	Zusammenfassung	A-36
A.12	Bautechnische Eignung (Kriteriengruppe 4)	A-37
A.12.1	Nachweis der bautechnischen Machbarkeit der Lagerprojekte	A-40
A.12.2	Zusammenfassung	A-40
A.13	Zusammenstellung der Bewertungsskalen.....	A-42
Anhang B	Gegenüberstellung der in Etappe 2 und 3 verwendeten Indikatoren	B-1
Anhang C	Beschrieb der verwendeten Bewertungsmethoden	C-1
C.1	Nutzwertanalyse	C-1
C.2	Ranking-Methode	C-2
C.3	Outranking-Methode.....	C-2
Anhang D	Berücksichtigung der für die SGT-Kriterien zu beurteilenden Aspekte in der qualitativen Bewertung	D-1

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1:	Hauptunterschiede zwischen den SGT-Etappe 2 und 3 mit Auswirkungen auf das indikatorbasierte Bewertungsverfahren.....	5
Tab. 4-1:	Kennzahlen und Daten zu den Indikatoren für die qualitative Bewertung und das Ranking der EG HAA und SMA für das Kriterium 1.1 «Räumliche Ausdehnung»	18
Tab. 4-2:	Kennzahlen, qualitative Merkmale und Daten zu den Indikatoren für die qualitative Bewertung und das Ranking der EG HAA und SMA für das Kriterium 1.2 «Hydraulische Barrierewirkung»	21
Tab. 4-3:	Kennzahlen und Daten zu den Indikatoren für die qualitative Bewertung und das Ranking der EG HAA und SMA für das Kriterium 1.3 «Geochemische Bedingungen»	23
Tab. 4-4:	Kennzahlen, qualitative Merkmale und Daten zu den Indikatoren für die qualitative Bewertung und das Ranking der EG HAA und SMA für das Kriterium 1.4 «Freisetzungspfade»	27
Tab. 4-5:	Kennzahlen, qualitative Merkmale und Daten zu den Indikatoren für die qualitative Bewertung und das Ranking der EG HAA und SMA für das Kriterium 2.1 «Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften»	32
Tab. 4-6:	Kennzahlen und Daten zu den Indikatoren für die qualitative Bewertung und das Ranking der EG HAA und SMA für die Kriterien 2.2 «Erosion» und 3.3 «Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen»	36
Tab. 4-7:	Kennzahlen und Daten zu den Indikatoren für die qualitative Bewertung und das Ranking der EG HAA und SMA für die Kriterien 2.3 «Lagerbedingte Einflüsse» und 3.3 «Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen»	41
Tab. 4-8:	Qualitative Merkmale und Daten zu den Indikatoren für die qualitative Bewertung und das Ranking der EG HAA und SMA für das Kriterium 2.4 «Nutzungskonflikte»	45
Tab. 4-9:	Kennzahlen und Daten zu den Indikatoren für die qualitative Bewertung und das Ranking der EG HAA und SMA für das Kriterium 3.1 «Charakterisierbarkeit der Gesteine»	48
Tab. 4-10:	Kennzahlen und Daten zu den Indikatoren für die qualitative Bewertung und das Ranking der EG HAA für das Kriterium 3.2 «Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse»	50
Tab. 4-11:	Kennzahlen und Daten zu den Indikatoren für die qualitative Bewertung und das Ranking der EG HAA und SMA für das Kriterium 3.3 «Prognostizierbarkeit von Langzeitveränderungen»	51
Tab. 4-12:	Kennzahlen, qualitative Merkmale und Daten zu den Indikatoren für die qualitative Bewertung und das Ranking der EG HAA und SMA für die Kriterien 4.1 «Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen» und 4.2 «Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung»	54
Tab. 5-1:	Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse der Nutzwertanalyse und der Ranking-Methode	56
Tab. A-1:	Zu beurteilende Aspekte und verwendete Indikatoren mit ihren Bewertungsskalen für das SGT-Kriterium 1.1 «Räumliche Ausdehnung»	A-4

Tab. A-2:	Zu beurteilende Aspekte und verwendete Indikatoren mit ihren Bewertungsskalen für das SGT-Kriterium 1.2 «Hydraulische Barrierewirkung»	A-8
Tab. A-3:	Zu beurteilende Aspekte und verwendete Indikatoren mit ihren Bewertungsskalen für das SGT-Kriterium 1.3 «Geochemische Bedingungen»	A-11
Tab. A-4:	Zu beurteilende Aspekte und verwendete Indikatoren mit ihren Bewertungsskalen für das SGT-Kriterium 1.4 «Freisetzungspfade»	A-15
Tab. A-5:	Zu beurteilende Aspekte und verwendete Indikatoren mit ihren Bewertungsskalen für das SGT-Kriterium 2.1 «Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften»	A-19
Tab. A-6:	Zu beurteilende Aspekte und verwendeter Indikator mit zugehöriger Bewertungsskala für das SGT-Kriterium 2.2 «Erosion»	A-21
Tab. A-7:	Zu beurteilende Aspekte und verwendete Indikatoren mit ihren Bewertungsskalen für das SGT-Kriterium 2.3 «Lagerbedingte Einflüsse»	A-25
Tab. A-8:	Zu beurteilende Aspekte und verwendete Indikatoren mit ihren Bewertungsskalen für das SGT-Kriterium 2.4 «Nutzungskonflikte»	A-29
Tab. A-9:	Zu beurteilende Aspekte und verwendeter Indikator mit Bewertungsskala für das SGT-Kriterium 3.1 «Charakterisierbarkeit der Gesteine»	A-32
Tab. A-10:	Zu beurteilende Aspekte und verwendeter Indikator mit Bewertungsskala für das SGT-Kriterium 3.2 «Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse»	A-34
Tab. A-11:	Zu beurteilende Aspekte und verwendete Indikatoren mit ihren Bewertungsskalen für das SGT-Kriterium 3.3 «Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen»	A-37
Tab. A-12:	Zu beurteilende Aspekte und verwendeter Indikator mit Bewertungsskala für die SGT-Kriterien 4.1 «Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen» und 4.2 «Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung»	A-41
Tab. A-13:	SGT-Kriterien, zu beurteilende Aspekte und zugeordnete Indikatoren mit ihren Bewertungsskalen für HAA und SMA	A-42
Tab. B-1:	Überprüfung der Indikatoren in SGT-Etappe 3	B-1
Tab. D-1:	Übersicht über die Berücksichtigung der zu beurteilenden Aspekte in der qualitativen Bewertung der SGT-Kriterien	D-1

Figurenverzeichnis

Fig. 2-1:	Die Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit gemäss SGT.....	3
Fig. 3-1:	Bewertungsobjekte Jura Ost für HAA (links) und SMA (rechts).....	11
Fig. 3-2:	Bewertungsobjekte Nördlich Lägern für HAA (links) und SMA (rechts)	12
Fig. 3-3:	Bewertungsobjekte Zürich Nordost für HAA (links) und SMA (rechts)	13
Fig. 4-1:	Mittlere hydraulische Durchlässigkeit aus in-situ-Packer-Tests als Funktion des mittleren Tonmineralgehalts im EG und in den Aquiferen oberhalb des EG.....	26
Fig. 4-2:	Hydraulische Transmissivitäten aus in-situ-Packer-Tests im Opalinuston.....	26
Fig. 4-3:	Instrumentell und historisch erfasste Seismizität in der Schweiz und Umgebung	29
Fig. 4-4:	Karten mit berechneten Restüberdeckungen nach 1 Mio. Jahren für verschiedene Erosionsszenarien in den Standortgebieten JO, NL und ZNO.....	35
Fig. 5-1:	Zusammenfassung der Ergebnisse der Nutzwertanalyse für das HAA- und SMA-Lager in den Standortgebieten JO, NL und ZNO	58
Fig. 5-2:	Zusammenfassung der Ergebnisse der «Ranking-Methode» für das HAA- und SMA-Lager in den Standortgebieten JO, NL und ZNO	60
Fig. 5-3:	Zusammenfassung der Ergebnisse der «Outranking-Methode» für das HAA- und SMA-Lager in den Standortgebieten JO, NL und ZNO	62
Fig. A-1:	Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 1.1 «Räumliche Ausdehnung»	A-1
Fig. A-2:	Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 1.2 «Hydraulische Barrierewirkung».....	A-5
Fig. A-3:	Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 1.3 «Geochemische Bedingungen».....	A-9
Fig. A-4:	Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 1.4 «Freisetzungspfade».....	A-12
Fig. A-5:	Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 2.1 «Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften».....	A-16
Fig. A-6:	Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 2.2 «Erosion»	A-20
Fig. A-7:	Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 2.3 «Lagerbedingte Einflüsse»	A-22
Fig. A-8:	Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 2.4 «Nutzungskonflikte».....	A-26
Fig. A-9:	Schematische Darstellung zur qualitativen Beurteilung des Nutzungspotenzials für das SGT-Kriterium 2.4 «Nutzungskonflikte».....	A-27
Fig. A-10:	Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 3.1 «Charakterisierbarkeit der Gesteine»	A-30
Fig. A-11:	Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 3.2 «Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse»	A-33
Fig. A-12:	Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 3.3 «Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen»	A-35

Fig. A-13:	Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 4.1 «Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen»	A-38
Fig. A-14:	Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 4.2 «Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung»	A-38
Fig. A-15:	Systemskizze mit Visualisierung der räumlichen Abgrenzung der bautechnischen Risikoanalyse zwischen den Kriterien 4.1 und 4.2	A-39
Fig. C-1:	Präferenzfunktion zur Bestimmung des Präferenzwerts eines Standortgebiets im paarweisen Vergleich.....	C-3

Abkürzungsverzeichnis

BFE	Bundesamt für Energie
BZR	Betrachtungszeitraum
E2, E3	Etappen 2 und 3 des Sachplans geologische Tiefenlager
EDZ	engl. Abkürzung für «excavation disturbed zone» (Auflockerungszone)
EG	einschlusswirksamer Gebirgsbereich
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
De	effektiver Diffusionskoeffizient
FPI	engl. Abkürzung für «Failure potential of intact host rock»
gTL	Geologische(s) Tiefenlager
HAA	Hochaktive Abfälle (abgebrannte Brennelemente und hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung)
HEB	Haupterschliessungsbereich
JO	Jura Ost
KG	Kriteriengruppe
Kr	Kriterium
NAB	Nagra Arbeitsbericht
NL	Nördlich Lägern
NTB	Nagra Technischer Bericht
NTF	Normierte Tracer-Freisetzung
OFA	Oberflächenanlage
RBG	Rahmenbewilligungsgesuch
RG (uRG / oRG)	Rahmengesteine (untere / obere)
RPL	engl. Abkürzung für «reduced path length in the intact host rock»
SGT	Sachplan geologische Tiefenlager
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle
T	hydraulische Transmissivität
vD	Darcy-Fluss
WG	Wirtgestein
ZNO	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, Nördlich Lägern und Zürich Nordost den Standort aus, an welchem das Tiefenlager realisiert werden soll. Die Standortwahl erfolgt anhand eines sicherheitstechnischen Vergleichs und basiert auf der geologischen Situation in den Standortgebieten, den abgegrenzten einschlusswirksamen Gebirgsbereichen (EG) der Standortgebiete, den darin erarbeiteten, beispielhaften Lagerprojekten, den Sicherheitsanalysen für den Standortvergleich und der qualitativen Bewertung der EG bezüglich der 13 SGT-Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit (ENSI 2018).

In vorliegendem Bericht definiert die Nagra die Methodik für die qualitative Bewertung in Etappe 3 und hält die Bewertungsergebnisse bezüglich der 13 SGT-Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit für HAA und SMA fest. Die Ergebnisse aus der qualitativen Bewertung fliessen in die vergleichenden Gesamtbewertungen je für HAA und SMA im Bericht zur Begründung der Standortwahl (Nagra 2025).

Mit diesem Bericht werden die Ergebnisse der qualitativen Bewertung als Grundlage für den sicherheitstechnischen Vergleich der Standorte für ein geologisches Tiefenlager dargelegt. Der Bericht bietet somit eine Grundlage für die Prüfung der Nachvollziehbarkeit der Bewertungen der 13 sicherheitstechnischen Kriterien des Sachplans und der daraus abgeleiteten gesamtheitlichen Bewertung (Prüffrage Nr. 5 aus ENSI 2018).

Das bautechnische Dossier (Nagra 2023) basiert auf einer Version des geologischen Schichtmodells aus dem Jahr 2022. Die Bewertung der für die Langzeitsicherheit relevanten Aspekte basiert auf einem weiter entwickelten Schichtmodell (Nagra 2024g). Die dabei gemachten Anpassungen der Schichtmächtigkeiten und Tiefenangaben sind nicht signifikant für die Bewertung der bautechnischen Aspekte. Der Informationsstand für externe Daten, Gesetze und Verordnungen entspricht dem Stand per 31.01.2024.

1.2 Struktur des Berichts

Im Kapitel 2 werden die relevanten Vorgaben zum Vorgehen bei der qualitativen Bewertung aus Sicht der Nagra zusammengefasst.

Kapitel 3 beschreibt die Methodik und die Grundlagen, anhand derer die Nagra die Vorgaben umsetzt. Das schrittweise Vorgehen umfasst eine Fokussierung der Kriteriengruppen, die Überprüfung der Indikatoren sowie die Definition einer geeigneten Beurteilungsmethodik und Bewertungsskala pro Indikator und die Definition der verwendeten Methoden zur multi-kriteriellen Entscheidungsfindung.

Die Umsetzung dieser Schritte für das HAA- und SMA-Lager und für alle Standortgebiete erfolgt in Kapitel 4. Kapitel 5 enthält eine Zusammenstellung der Ergebnisse, Erläuterungen zur Aggregation der Bewertungen für die drei Bewertungsmethoden und eine Synthese der Ergebnisse.

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 Kapitel 4 von (ENSI 2018) enthalten. Für vorliegenden Bericht relevant sind die Vorgaben hinsichtlich der *qualitativen Bewertung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs anhand der 13 Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit*. Nachfolgend werden die Kernpunkte aus Sicht der Nagra zusammengefasst.

Die qualitative Bewertung der EG beim Standortvergleich in Etappe 3 basiert auf den 13 Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit des Sachplans (Fig. 2-1). Die dabei zu beurteilenden Aspekte sind im Konzeptteil des SGT festgehalten (vgl. auch Anhang I in ENSI 2018).

Kriterien zur Standortevaluation hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit	
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)

Grundlage für die qualitative Bewertung der EG anhand der 13 Kriterien des Sachplans sollen nach wie vor die in den Etappen 1 und 2 verwendeten Indikatoren sein. Im bisherigen Verlauf des Sachplanverfahrens wurden die Standortoptionen stark eingeengt. Die Standortwahl in Etappe 3 erfolgt als Positivwahl. Gemäss ENSI sind die Indikatoren in Etappe 3 zu überprüfen.

In Etappe 3 ist die qualitative Bewertung der 13 Kriterien SGT auf den EG zu beziehen, Ausnahmen sind zu begründen. Für einzelne Kriterien mit ausschliesslicher Wirkung im Nahfeld kann der Bezug auf das Wirtgestein (WG) weiterhin sinnvoll sein. Des Weiteren beziehen sich einzelne Kriterien und Indikatoren auf den umgebenden geologisch-tektonischen Grossraum. Die bautechnischen Kriterien 4.1 und 4.2 sind anhand der in Etappe 3 zu erarbeitenden standortspezifischen Lagerprojekte zu bewerten. Die Auswirkungen der lagerbedingten Einflüsse (Kriterium 2.3) auf das Wirtgestein sind unter Berücksichtigung des einzulagernden Abfallinventars und des standortspezifischen Lagerprojektes zu bewerten. Die Grösse der Bandbreiten ist mit der Kriteriengruppe 3 (Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen) zu bewerten.

Die qualitative Bewertung der EG hat sich auf das von den Entsorgungspflichtigen vorgeschlagene standortspezifische Referenzszenario zu beziehen, welches die erwartete Entwicklung des Tiefenlagersystems repräsentiert. Dabei gilt es zu beachten, dass die Referenzszenarien und Bandbreiten für den gesamten Prozess des Standortvergleichs (Sicherheitsanalysen, vergleichende Gesamtbewertung und Sicherheitsnachweis) einheitlich zu verwenden sind. Die Ungewissheiten sind dabei systematisch auszuweisen.

3 Methodik für die qualitative Bewertung anhand der 13 SGT-Kriterien

In diesem Kapitel wird die Bewertungsmethodik der Nagra in SGT-Etappe 3 beschrieben.

3.1 Zielsetzung und Ausgangslage der qualitativen Bewertung in der SGT-Etappe 3

Die qualitative Bewertung in SGT-Etappe 3 unterscheidet sich in der Zielsetzung und Ausgangslage von früheren Etappen. Die wichtigsten Änderungen sind, dass drei Standortgebiete mit demselben Wirtgestein verglichen werden und die Auswahl des besten Standortgebiets je für HAA und SMA als Positivwahl getroffen wird. Weitere Möglichkeiten zur Präzisierung der Indikatoren ergeben sich insbesondere durch den vertieften Kenntnisstand und durch die standortspezifischen Lagerprojekte und Systemanalysen. Die Hauptunterschiede zwischen den Etappen 2 und 3 mit Auswirkungen auf das indikatorbasierte Bewertungsverfahren sind in Tab. 3-1 zusammengefasst.

Tab. 3-1: Hauptunterschiede zwischen den SGT-Etappe 2 und 3 mit Auswirkungen auf das indikatorbasierte Bewertungsverfahren

Thema	SGT-Etappe 2	SGT-Etappe 3	Auswirkungen auf Auswahl Indikatoren in Etappe 3 (Beispiele)
Festlegung Wirtgestein für SMA-Lager	Ausgehend von 4 Wirtgesteinen für SMA: Auswahl eines prioritären Wirtgesteins für SMA (für HAA erfolgte die Wahl des Opalinustons als Wirtgestein bereits in SGT-Etappe 1)	Ausgangslage: Opalinuston für SMA und HAA als Wirtgestein gesetzt	Indikatoren zur Erfassung von Eigenschaften geklüfteter oder heterogen aufgebauter Wirtgesteine werden in E3 nicht mehr verwendet, z. B. «Kolloide» (Nr. 16), «Homogenität des Gesteinsaufbaus» (Nr. 18), «Erfahrungen» (Nr. 40), «Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)» (Nr. 49)
Beurteilung maximale Tiefenlage	Bevorzugte Tiefenlage der Lagerebene: ≤600 m u. T. (SMA) ≤700 m u. T. (HAA)	Tiefenlage der Lagerebene muss nicht mehr beschränkt werden. Gründe: • Reduktion Bandbreite felsmechanische Parameter • zugrunde gelegte Bauverfahren / Ausbaukonzepte	Die bereits in E2 durchgeführte bautechnische Risikoanalyse wird vertieft. In E3 erfolgt eine integrale Beurteilung aller bautechnisch relevanten Aspekte. Folgende E2-Indikatoren werden nicht mehr einzeln beurteilt: «Max. Tiefenlage i.H. auf bautechnische Machbarkeit» (Nr. 1), «Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften» (Nr. 47)

Tab. 3-1: Fortsetzung

Thema	SGT-Etappe 2	SGT-Etappe 3	Auswirkungen auf Auswahl Indikatoren in Etappe 3 (Beispiele)
Einengung Standortgebiete	Ausgehend von 6 bzw. 3 Standortgebieten für SMA und HAA («heterogene Kandidatenliste»): Auswahl von mind. 2 Standorten je für SMA und HAA	Ausgehend von 3 Standortgebieten je für SMA und HAA («homogene Kandidatenliste»): Standortwahl und RBG für SMA und HAA	Präzisierung der Indikatoren, sodass Unterschiede in EG-Eigenschaften besser sichtbar werden («stärkere Lupe») und Fokussierung auf Indikatoren für Positivwahl; betrifft zahlreiche Indikatoren der KG 1 und KG 2
Datengrundlage	Heterogene und teilweise unvollständige Datenlage (keine 3D-Seismik in JO/NL, keine Tiefbohrungen innerhalb der Standortgebiete JO/NL)	Veränderte standort-spezifische Datengrundlage vorhanden	Präzisierung der Indikatoren: Feinere Differenzierung und höherer Grad an Quantifizierung möglich; betrifft zahlreiche Indikatoren der KG 1 und KG 2
Lagerprojekte	Stufengerechte Projektkonzepte (Detaillierungsgrad entspricht der Stufe Vorstudie in Anlehnung an SIA-Normen, mit standortspezifischen Baugrundmodellen und Konzepten für die Zugangsbauwerke)	Standortspezifische Lagerprojektierung (Detaillierungsgrad entspricht der Stufe Vorprojekt in Anlehnung an SIA-Normen)	Standortspezifische Beurteilung der bautechnischen Eignung (bautechnische Risikoanalyse): Indikatoren der KG 4, sowie der lagerbedingten Einflüsse (Kr 2.3)
Methodik	Identifikation und Zurückstellung von Standortgebieten mit eindeutigen Nachteilen	Auswahl «günstigstes» Standortgebiet je für SMA und HAA (Positivwahl) Bei identischen «günstigsten» Standortgebieten für SMA und HAA: Kombilager	Fokussierung auf Indikatoren für Positivwahl (keine Aggregation mehr bzgl. «entscheidrelevanter Merkmale / Indikatoren zur Identifizierung eindeutiger Nachteile»)
Werkzeuge für Systemanalysen	Vereinfachte Daten und Modelle, u. a. zur Hydrogeologie, Felsmechanik, zu lagerbedingten Einflüssen (Systemanalysen) und zum Radionuklidtransport	Standortspezifische Daten und (3D-) Modelle zu hydraulischen Verhältnissen, Gebirgsspannungen, Felsmechanik, lagerbedingten Einflüssen und Hebung / Erosion, Stofffrachten (standortspezifische Systemanalysen) und zum Radionuklidtransport	Präzisierung der Indikatoren: Feinere Differenzierung und höherer Grad an Quantifizierung möglich; betrifft zahlreiche Indikatoren der KG 1, KG 2 und KG 3

3.2 Definition der Bewertungsmethodik in SGT-Etappe 3

Die Entwicklung der Methodik für die qualitative Bewertung in SGT-Etappe 3 umfasst die folgenden Vorgehensschritte, die im Anschluss beschrieben werden:

- Fokussierung der Kriteriengruppen
- Überprüfung der Indikatoren sowie Definition einer geeigneten Beurteilungsmethodik und Bewertungsskala pro Indikator
- Definition der von der Nagra verwendeten Methoden zur multikriteriellen Entscheidungsfindung

3.2.1 Fokussierung der Kriteriengruppen

Die Kriteriengruppen werden in SGT-Etappe 3 auf nachfolgende Bewertungsperspektiven fokussiert. Damit ergeben sich weitere Interpretationsverschiebungen im Vergleich zu Etappe 2.

- Die Kriteriengruppe 1 «Eigenschaften des WG bzw. EG» bewertet die geologischen Eigenschaften, welche die Wirksamkeit der natürlichen Barriere zu Beginn der Nachverschlussphase gewährleisten. Im Unterschied zu Etappe 2, wo bei der Bewertung verschiedener Kriterien auch Langzeitaspekte einfließen, führt dies in Etappe 3 zu einer zeitlichen Entflechtung zwischen den Kriteriengruppen 1 und 2.
- Mit der Kriteriengruppe 2 «Langzeitstabilität» wird bewertet, wie die Barriereigenschaften im gesamten Betrachtungszeitraum in Anbetracht der langfristig zu erwartenden Prozesse erhalten bleiben.
- Mit der Kriteriengruppe 3 «Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen» werden die Auswirkungen der verbleibenden, mit erdwissenschaftlichen Untersuchungen zum jetzigen Projektstand nicht weiter reduzierbaren Ungewissheiten auf die Barrierewirkung bewertet.
- In Kriteriengruppe 4 «Bautechnische Eignung» erfolgt eine integrale Beurteilung aller bautechnisch relevanten Aspekte (anstelle einer individuellen Beurteilung von Einzelaspekten wie in noch Etappe 2).

Die zeitliche Entflechtung der Kriteriengruppen 1 und 2 bewirkt in Etappe 3 auch eine Entflechtung bzgl. der Langzeitsicherheitsfunktionen:

- In Kriteriengruppe 1 liegt der Schwerpunkt auf der Sicherheitsfunktion «Immobilisierung, Rückhaltung und langsame Freisetzung» (und untergeordnet auch auf der Sicherheitsfunktion «vollständiger Einschluss»), welche durch günstige geologische Eigenschaften gewährleistet wird.
- In Kriteriengruppe 2 liegt der Schwerpunkt auf dem Erhalt der Sicherheitsfunktionen «Langzeitstabilität» (des Mehrfachbarrierensystems bezüglich geologischer und klimatischer Langzeitentwicklungen), «Kompatibilität» (der Elemente des Mehrfachbarrierensystems und der radioaktiven Abfälle untereinander und mit anderen Materialien) und «Isolation» (der radioaktiven Abfälle von der Erdoberfläche: Nutzungskonflikte & menschliche Aktivitäten).

3.2.2 Überprüfung der Indikatoren und deren Bewertungsskalen

Vor diesem Hintergrund werden die Indikatoren überprüft und zum Teil neu definiert. Für jeden Indikator wird eine geeignete Beurteilungsmethodik sowie die Bewertungsskalen für HAA und SMA definiert.

Dazu werden pro SGT-Kriterium unter Berücksichtigung der Zielsetzung und Ausgangslage der Etappe 3 die zu *beurteilenden Aspekte analysiert* und geeignete *Indikatoren* zur Erfassung dieser Aspekte *definiert*. Dabei wird der Wirkung der natürlichen Barriere hinsichtlich der Langzeitsicherheit besonderes Gewicht gegeben und auf die standortspezifische Barrierefunktion des EG mit seiner räumlichen Ausdehnung fokussiert. Das heisst, die Indikatoren werden so formuliert, dass geologische, langzeitsicherheitsrelevante Unterschiede zwischen den Standortgebieten bewertet werden, nicht aber z. B. Unterschiede in der Lagerauslegung oder in den Kosten.

Die *Beurteilungsmethodik* der Indikatoren orientiert sich an der jeweiligen Zielsetzung und an den verfügbaren Daten. Grundlage für die indikatorbasierte Bewertung sind die Bewertungsobjekte (Kap. 3.4). In Abhängigkeit der zu beurteilenden Aspekte können sich Indikatoren auf Teile davon oder auf den umgebenden geologischen Grossraum beziehen. Das jeweilige Bewertungsteilobjekt wird ebenfalls begründet.

Wo immer möglich erfolgt die qualitative Bewertung direkt anhand von geologischen Daten:

- Das können Messwerte aus in-situ-Tests oder Labortests an Kernproben sein. So werden z. B. in Kriterium 1.2 «Hydraulische Barrierewirkung» Daten aus in-situ-Tests und Labortests an Kernproben verwendet.
- Wo flächenhafte geologische Daten vorliegen, können GIS-Auswertungen der Platzreserven als Grundlage für die qualitative Bewertung verwendet werden. Beispielsweise wird im Kriterium 1.1 «Räumliche Ausdehnung» die räumliche Verteilung von Störungen betrachtet, die mittels 3D-Seismik kartiert wurden.
- Wo die langfristige zeitliche Entwicklung des Tiefenlagers oder die Barrierewirksamkeit des EG zu berücksichtigen ist, wird auf Ergebnisse standortspezifischer Systemanalysen zurückgegriffen. So wird zum Beispiel die Robustheit des EG mittels Modellrechnungen zu lagerbedingten Einflüssen auf die Geologie (Kr 2.3) bewertet oder die Relevanz von nicht weiter zu reduzierenden Ungewissheiten mittels Modellrechnungen zu Stofffrachten aus dem EG aufgezeigt (Kr 3.1). Die Systemanalysen berücksichtigen die standortspezifischen geologischen Verhältnisse und Lagerprojekte.
- Auch die integrale Beurteilung und Interpretation der Datenbasis mittels standardisierter Methoden wird angewandt. Beispiele sind der modellbasierte Ansatz zur Berechnung der verbleibenden Restüberdeckung am Ende des Betrachtungszeitraums zur Beurteilung der Erosion (Kr 2.2) und die integrale Beurteilung der bautechnischen Eignung mittels Bautechnischer Risikoanalysen (KG 4).

Schliesslich werden für alle Indikatoren *Bewertungsskalen* definiert. Die Bewertungsskalen werden, wo angebracht, für HAA und SMA separat und gemessen an den jeweiligen sicherheitstechnischen Anforderungen definiert.

Die detaillierte Analyse der Kriterien, die Begründungen für die verwendeten Indikatoren, die Definition der Beurteilungsmethodik und der Bewertungsskalen sind Gegenstand von Anhang A. Wie die zu beurteilenden Aspekte in die qualitative Bewertung eingeflossen sind, ist in Anhang D zusammengefasst. Die Hauptunterschiede zwischen den in Etappen 2 und 3 verwendeten Indikatoren sind im Anhang B aufgeführt und begründet.

3.2.3 Definition von Methoden zur multikriteriellen Entscheidungsfindung

Von der Nagra werden in Etappe 3 mit Blick auf die Positivwahl des besten Standortes je für HAA und SMA drei verschiedene Methoden der multikriteriellen Entscheidungsfindung angewandt:

Nutzwertanalyse: Die Nutzwertanalyse dient in Etappe 3 der Bewertung der sicherheitstechnischen Eignung der drei Standortgebiete für HAA und SMA anhand der 13 SGT-Kriterien. Die Bewertung erfolgt anhand von Bewertungsskalen mit diskreten Bewertungsstufen gemäss SGT-Vorgabe: *sehr günstig, günstig, bedingt günstig* – die Stufen *ungünstig* und *ungeeignet* werden in E3 nicht benötigt. Die Ergebnisse der Nutzwertanalyse werden von der Stufe der Indikatoren auf die Stufe der 13 SGT-Kriterien und von dort auf die Stufe Gesamtbewertung aggregiert. Diese Aggregationsschritte erfolgen jeweils durch gleichgewichtete arithmetische Mittelung der betreffenden Nutzwerte.

Rangfolge (Ranking): Die «Ranking-Methode» erlaubt die Identifikation eindeutiger Vorteile durch systematische Rangierung der Standortgebiete (Positivwahl des «günstigsten» Standortgebiets je für HAA und SMA). Das Ranking der Standortgebiete erfolgt bezüglich eines Indikators anhand standortspezifischer Daten oder rangierbarer, qualitativer Merkmale. Die Ergebnisse des Rankings werden von der Stufe der Indikatoren auf die Stufe der 13 SGT-Kriterien und von dort auf die Stufe Gesamtbewertung aggregiert. Diese Aggregationsschritte erfolgen jeweils durch Summation der betreffenden Rangpunkte.

Paarweiser Vergleich (Outranking): Die «Outranking-Methode» erlaubt die Identifikation eindeutiger Vorteile durch einen systematischen paarweisen Vergleich der Standortgebiete (Positivwahl je für HAA und SMA). Der paarweise Vergleich der Standortgebiete bezüglich eines Indikators erfolgt anhand der Wertedifferenz standortspezifischer Daten oder rangierbarer, qualitativer Merkmale durch Anwendung einer Präferenzfunktion zur Wertung der Differenzen. Die Ergebnisse des Outrankings werden von der Stufe der Indikatoren auf die Stufe der 13 SGT-Kriterien und von dort auf die Stufe Gesamtbewertung aggregiert. Diese Aggregationsschritte erfolgen jeweils durch (normierte) Summation der betreffenden Präferenzwerte.

Im Vergleich zur Nutzwertanalyse erlauben das Ranking- und das Outranking-Verfahren auch innerhalb einer Bewertungsstufe eine Rangfolge der Standortgebiete festzulegen. Ein Beschrieb der drei Bewertungsmethoden ist im Anhang C zu finden.

3.3 Vorgehen bei der qualitativen Bewertung

Charakterisierung und Bewertung

In einem ersten Schritt werden die Grundlagen pro Kriterium zusammengetragen und mit deren Hilfe die Bewertungsobjekte im Raster der Indikatoren charakterisiert und bewertet. Dies umfasst einen qualitativen Beschrieb sowie die Bewertung bestehend aus Nutzwertanalyse und Rangfolge (Ranking) auf Stufe Indikator. Dabei liegt der Fokus auf geologischen, langzeitsicherheitsrelevanten Unterschieden zwischen den Bewertungsobjekten, nicht aber z. B. auf Unterschieden in der Lagerauslegung oder in den Kosten. Im Zweifelsfall, oder wenn bei der Auswahl des Bewertungsobjektes auch Bereiche mit qualitativ leicht besseren Eigenschaften möglich wären, erfolgt die Bewertung zugunsten des schlechter gestellten Bewertungsobjekts. Dies erhöht die Robustheit der Standortwahl. Die Ergebnisse sind in Kap. 4 festgehalten und werden in Kap 5.1 zusammengefasst.

Aggregation der Bewertungen

In einem zweiten Schritt werden die Bewertungen von der Stufe der Indikatoren auf die Stufe der SGT-Kriterien und weiter auf die Stufe Gesamtbewertung aggregiert. Dieser Schritt erfolgt für die drei verwendeten Methoden zur multikriteriellen Entscheidungsfindung separat und ist Gegenstand der Kap. 5.2 bis 5.4. In der Nutzwertanalyse erfolgt die Aggregation durch gleichgewichtete arithmetische Mittelung der Nutzwerte. In der Ranking-Methode erfolgt die Aggregation durch Summation der Rangpunkte. In der Outranking-Methode erfolgt die Aggregation durch (normierte) Summation der Präferenzwerte.

Synthese der Ergebnisse

Auf dieser Basis werden in Kap. 5.5 Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Standortgebieten hinsichtlich sicherheitsrelevanter Aspekte herauskristallisiert und Schlussfolgerungen gezogen bzgl. Qualität und Stabilität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sowie bzgl. der vorhandenen Flexibilität bei der Platzierung der Lagerfelder in den drei Standortgebieten. Weiter werden die Schlussfolgerungen aus den drei verwendeten Bewertungsmethoden gezogen.

Die Ergebnisse der qualitativen Bewertung fliessen in den sicherheitstechnischen Vergleich der Standortgebiete ein und liefern die Grundlage für die Begründung des Standortvorschlags in Nagra (2025).

3.4 Grundlagen und Definition der Bewertungsobjekte

Die zur Definition der Beurteilungsmethodik (Anhang A) sowie zur Charakterisierung und Bewertung verwendeten Grundlagen (Kap. 4) werden pro Indikator im jeweiligen Abschnitt referenziert.

Bewertungsobjekt der qualitativen Bewertung ist gemäss SGT (BFE 2008) und im Einklang mit den ENSI-Vorgaben zur SGT-Etappe 3 der einschlusswirksame Gebirgsbereich und das darin erarbeitete, beispielhafte Lagerprojekt. In (Nagra 2024d) hält die Nagra fest, wie sie diese Bewertungsobjekte zum Zweck des sicherheitstechnischen Vergleichs der geologischen Standortgebiete in Etappe 3 definiert. Die Lagerauslegung aus früheren Projektphasen wurde weitgehend beibehalten und mit einer standortspezifischen Erschliessung ergänzt. Somit werden im sicherheitstechnischen Vergleich Unterschiede in den geologischen Eigenschaften der Standorte und nicht Unterschiede in der Lagerauslegung bewertet. Nachfolgend werden die Bewertungsobjekte je für HAA und SMA pro Standortgebiet kurz beschrieben.

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 ausreichendem Abstand zu regionalen Störungszonen.

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.

Die exemplarische Umsetzung der sechs standortspezifischen Lagerprojekte ist im «Bautechnischen Dossier Standortvergleich» enthalten (Nagra 2023).

Bewertungsobjekte HAA und SMA in Jura Ost

Als potenzielle Lagerzone wird in Jura Ost der zentrale Bereich mit einer einfachen Geologie betrachtet, in welchem der Opalinuston eine minimale Tiefenlage zum Schutz vor Erosion aufweist (Fig. 3-1). Vertikal umfasst der EG die gesamte Gesteinsabfolge zwischen dem Keuper-Aquifer unterhalb und dem Hauptrogenstein-Aquifer oberhalb des Opalinustons und weist Mächtigkeiten von rund 200 – 260 m auf.

Die Bewertungsobjekte HAA und SMA sind im östlichen Teil der potenziellen Lagerzonen angeordnet, der kaum seismisch kartierte Störungen aufweist. 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 (OFA) auf dem Gebiet der Gemeinde Villigen aus. Die Lüftungsschächte sind von der Nebenzugangsanlage im Taleinschnitt «Itele» – «Matten» – «Riniken» vorgesehen.

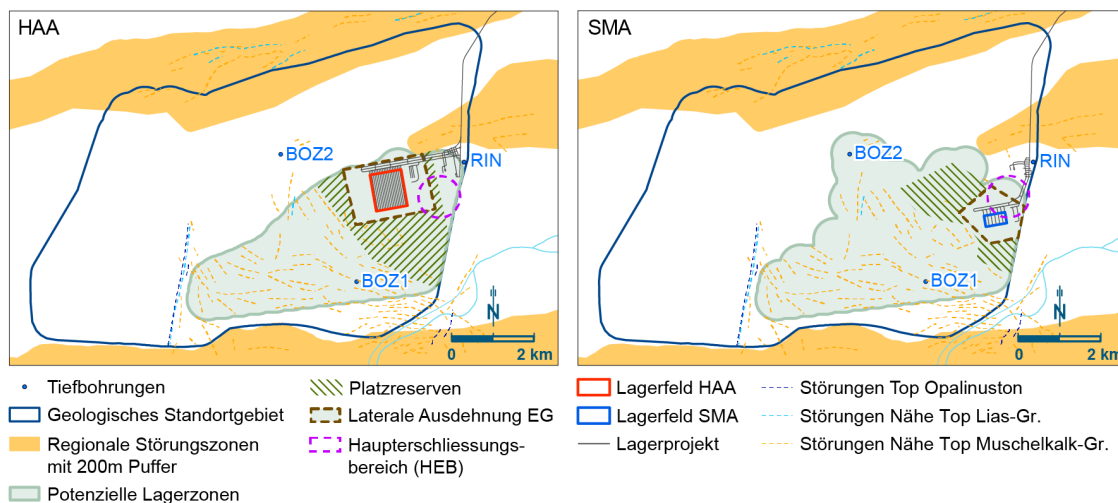


Fig. 3-1: Bewertungsobjekte Jura Ost für HAA (links) und SMA (rechts)

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 umfasst die potenzielle Lagerzone den ruhig gelagerten Bereich mit sehr hoher Kontinuität zwischen den regionalen tektonischen Elementen im Norden und Süden (Fig. 3-2). Hier umfasst der EG vertikal die gesamte Gesteinsabfolge 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 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 Haupterschliessungsbereichs (HEB) gewählt. Die vorläufigen Haupt- und Pilotlager sind auf rund 900 m Tiefe

im EG platziert. 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.

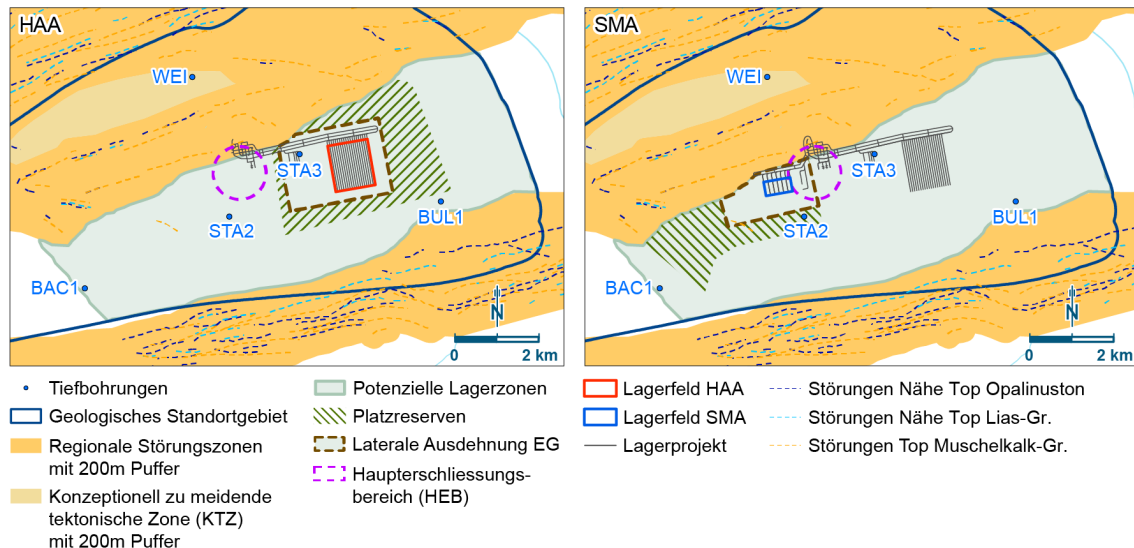


Fig. 3-2: Bewertungsobjekte Nördlich Lägern für HAA (links) und SMA (rechts)

Die potenziellen Lagerzonen für HAA und SMA sind in Nördlich Lägern identisch.

Bewertungsobjekte HAA und SMA in Zürich Nordost

In Zürich Nordost umfasst die potenzielle Lagerzone den Bereich mit der einfachsten Geologie zwischen mehreren regionalen tektonischen Elementen im Zentrum des Standortgebiets (Fig. 3-3). Vertikal umfasst der EG darin die gesamte Gesteinsabfolge zwischen dem Keuper-Aquifer unterhalb und dem Malm-Aquifer oberhalb des Opalinustons und weist Mächtigkeiten von rund 260 – 300 m auf.

Die potenzielle Lagerzone weist unterschiedliche Konfigurationen hinsichtlich Schichtmächtigkeiten, -neigungen, Tiefenlage und Abstand zum HEB 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 HAA östlich angrenzend angeordnet. Die vorläufigen Haupt- und Pilotlager sind auf rund 700 m Tiefe im EG platziert. 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.

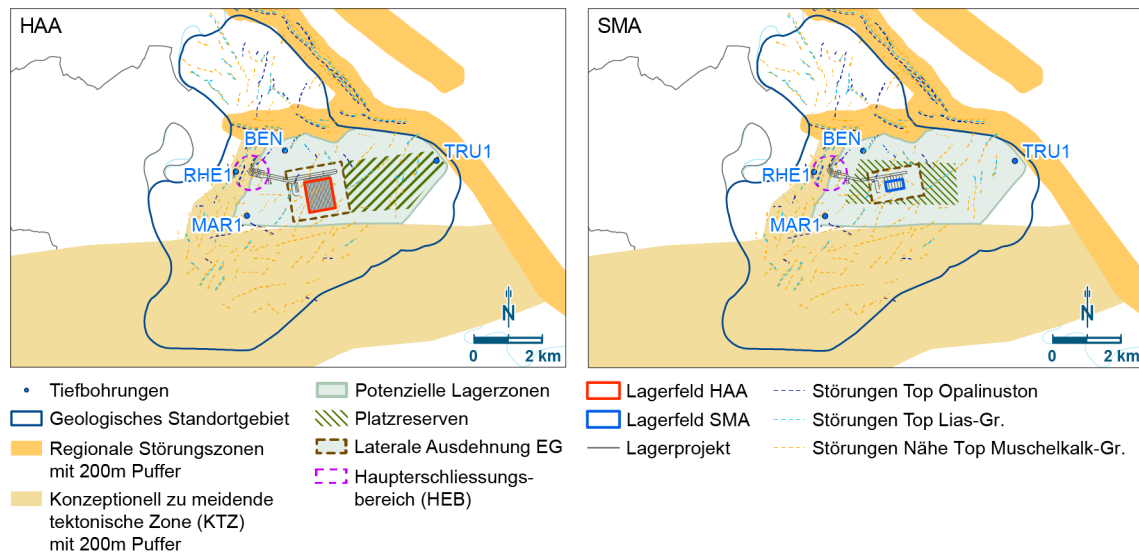


Fig. 3-3: Bewertungsobjekte Zürich Nordost für HAA (links) und SMA (rechts)

Die potenziellen Lagerzonen für HAA und SMA sind in Zürich Nordost identisch.

4 Charakterisierung und Bewertung der EG für HAA und SMA

In diesem Kapitel werden die EG HAA und SMA mittels der in Anhang A definierten Indikatoren für alle drei Standortgebiete charakterisiert, qualitativ bewertet und in eine Rangfolge gebracht. Diese Darlegung folgt den 13 SGT-Kriterien (Fig. 2-1) und enthält nebst der Charakterisierung der Bewertungsobjekte auch die Präsentation der Daten zu den berücksichtigten Kennzahlen und qualitativen Merkmalen.

4.1 Eigenschaften des EG (Kriteriengruppe 1)

Mit der Kriteriengruppe 1 werden anhand von vier Kriterien die geologischen Eigenschaften des EG bewertet, welche die Wirksamkeit der natürlichen Barriere zu Beginn der Nachverschlussphase gewährleisten. Es sind dies die räumliche Ausdehnung (Kap. 4.1.1), die hydraulische Barrierewirkung (Kap. 4.1.2), die geochemischen Bedingungen (Kap. 4.1.3) und die Freisetzungspfade (Kap. 4.1.4).

4.1.1 Räumliche Ausdehnung (Kriterium 1.1)

Für die Langzeitsicherheit günstig sind räumliche Verhältnisse, in denen der EG derart beschaffen und ausgedehnt ist, dass die Radionuklide grösstenteils im EG zurückgehalten werden.

Die räumlichen Verhältnisse werden mit den drei Indikatoren «Platzangebot untertag» (Kap. 4.1.1.1), «Mächtigkeit EG» (Kap. 4.1.1.2) und «Seismisch kartierte Störungen an Wirtgesteinsgrenzen» (Kap. 4.1.1.3) erfasst. Die Indikatoren und Bewertungsskalen sind im Anhang A.1 begründet. Nachfolgend werden die Charakterisierung und Bewertung pro Indikator für das Kriterium 1.1 erläutert und in Kap. 4.1.1.4 zusammengefasst.

4.1.1.1 Platzangebot untertag

Charakterisierung: Alle drei Standortgebiete weisen potenzielle Lagerzonen für die geologischen Tiefenlager auf, die gut untersucht und tektonisch ruhig gelagert sind sowie eine Konfiguration des Opalinustons in geeigneter Tiefenlage und mit der erforderlichen Mächtigkeit und Beschaffenheit aufweisen (siehe Kap. 3.4 als Zusammenfassung von Nagra (2024d)): Die potenziellen Lagerzonen weisen in allen Standortgebieten eine grosse laterale Ausdehnung auf und übertreffen den Platzbedarf der Lager gemäss aktueller Auslegung bei weitem. In allen potenziellen Lagerzonen konnte ein einheitlicher EG und Platzreserven definiert werden, deren laterale Ausdehnung ein Mehrfaches des Platzbedarfs pro Lagertyp umfasst.

Kennzahlen und Bewertung: Für alle HAA-Lager umfasst die laterale Ausdehnung des EG und der Platzreserven die angestrebten 6 km² und für alle SMA-Lager die angestrebten 3.6 km². In Nördlich Lägern steht ausreichend Raum für den EG und die Platzreserven sowohl für das HAA-Lager als auch für das SMA-Lager zur Verfügung.

Entsprechend wird der Indikator «Platzangebot untertag» in allen Standortgebieten für HAA und SMA mit *sehr günstig* bewertet, ohne Abstufung bei der Rangfolge.

Fazit: Alle Standortgebiete verfügen über ein sehr günstiges Platzangebot untertag.

4.1.1.2 Mächtigkeit EG

Charakterisierung: Der Opalinuston liefert als Wirtgestein wesentliche Beiträge zu den Sicherheitsfunktionen der Langzeitsicherheit. Die Anforderungen an die Länge der vertikalen Transportpfade im intakten Gestein sind durch den Opalinuston sowohl für HAA als auch für SMA in allen Standortgebieten mehr als erfüllt (Kap. 4.1 in Nagra 2024i). Innerhalb der potenziellen Lagerzonen erwies sich zudem die gesamte Gesteinsabfolge zwischen den nächstliegenden Aquiferen oberhalb und unterhalb des Opalinustons als geringdurchlässig (Kap. 4.5.3 in Nagra 2024h). Sie tragen als einschlusswirksame Rahmengesteine nachweislich zur guten geologischen Barrierewirkung bei (Kap. 5.2.1 in Nagra 2024i). Der EG umfasst vertikal somit in allen Standortgebieten zusätzlich zum Opalinuston mächtige Pakete von einschlusswirksamen Rahmengesteinen (vgl. Kap. 3.4). Die vertikale Ausdehnung des EG ist in NL mit über 300 m am mächtigsten.

Kennzahlen und Bewertung: In JO beträgt die gemittelte Mächtigkeit des EG in den Platzreserven für HAA rund 225 m, in NL 315 m und in ZNO 280 m (Werte basierend auf Kap. 3.3 und Enclosure 3-9a bis 3-9c in Nagra 2024g). Für SMA ergeben sich ähnliche Mächtigkeiten des EG wie für HAA.

Damit wird der Indikator «Mächtigkeit EG» für HAA und SMA für alle EG mit *sehr günstig* bewertet und die Rangfolge der EG wird wie folgt eingestuft: NL steht auf Rang 1, ZNO auf Rang 2 und JO auf Rang 3.

Weitere Betrachtungen: Insbesondere die Distanz von der Lagerebene zum nächstliegenden Aquifer oberhalb des Opalinustons ist in NL am grössten. Die Distanz von der Lagerebene zum Keuper-Aquifer unterhalb des Opalinustons ist in allen Standortgebieten ähnlich. In NL besteht aufgrund des räumlich heterogenen Auftretens des Keuper-Aquifers (an lokal auftretende, mit Sandstein gefüllte Rinnen gebunden (Kap. 4.2.4 und 4.5.3.10 in Nagra 2024h)) zudem die Möglichkeit auf zusätzliche barrierewirksame untere Rahmengesteine bis zum Muschelkalk-Aquifer (Enclosure 3-10 in Nagra 2024g). In dieser Situation fällt auch der Transportpfad für Radionuklide zur unteren Begrenzung des EG erheblich länger aus und die Rückhaltewirkung wird verstärkt (Kap. 5.2.2 in Nagra 2024i). Dies ist insbesondere für das HAA-Lager relevant, was im Kriterium 3.2 bewertet wird (Kap. 4.3.2).

Fazit: Alle Standortgebiete weisen eine sehr günstige Mächtigkeit des EG auf, in NL ist der EG am mächtigsten.

4.1.1.3 Seismisch kartierte Störungen an Wirtgesteinsgrenzen

Charakterisierung: Die potenziellen Lagerzonen (siehe Kap. 3.4) halten überall einen genügenden Abstand zu regionalen tektonischen Elementen ein, insb. zu regionalen Störungszonen, sodass die Wirksamkeit der geologischen Barriere gegeben ist. Es gibt aber Unterschiede in der strukturellen Komplexität (Kap. 4.3.3 in Nagra 2024h), die anhand des Vorkommens an seismisch kartierten Störungen innerhalb der potenziellen Lagerzonen beurteilt werden. Zur Gewährleistung des bestmöglichen Rückhaltevermögens des Opalinustons werden für die Anordnung der Lagerfelder Bereiche ohne seismisch kartierte Störungen an der Ober- und Untergrenze des Wirtgesteins (Wirtgesteinsgrenzen) gesucht. NL weist den grössten Bereich ohne seismisch kartierte Störungen an den Wirtgesteinsgrenzen auf, während in ZNO innerhalb der potenziellen Lagerzone an den Wirtgesteinsgrenzen am meisten Störungen seismisch kartiert sind (Kap. 4.3.4 in Nagra 2024h).

Kennzahlen und Bewertung: In JO und NL kann bei der Abgrenzung des EG und der Platzreserven kartierten Störungen an den Wirtgesteinsgrenzen ausgewichen werden. Dies gilt für HAA und SMA. Der ungestörte Flächenanteil des EG und der Platzreserven beträgt 100 %, unter Berücksichtigung eines Abstands sowohl von 100 m wie auch von 200 m zu den nächsten

seismisch kartierten Störungen. Transportmodellierungen bestätigen, dass bei entsprechenden lateralen Transportpfadlängen im Opalinuston die Radionuklidfreisetzung vernachlässigbar ist (Kap. 4.2 in Nagra 2024i). Diesbezüglich weisen die beiden Standortgebiete eine grosse Flexibilität für die Anordnung der Lagerfelder auf.

In ZNO kann kartierten Störungen an den Wirtgesteinsgrenzen bei der Abgrenzung des EG und der Platzreserven sowohl für HAA wie auch für SMA nicht überall ausgewichen werden. Der ungestörte Flächenanteil beträgt bei einem Abstand von 100 m rund 75 % und nimmt bei einem Abstand von 200 m zu diesen kartierten Störungen weiter ab.

Da die Wirksamkeit der geologischen Barriere auch unter Berücksichtigung der seismisch kartierten Störungen gegeben ist (Kap. 4.2 in Nagra 2024i), wird der Indikator «Seismisch kartierte Störungen an Wirtgesteinsgrenzen» für alle EG und für beide Lagertypen mit *sehr günstig* bewertet. Aufgrund der angestrebten Vermeidung der Störungen bei der Anordnung der Lagerfelder werden die Unterschiede bzgl. des Vorkommens von Störungen bei der Rangfolge der EG berücksichtigt: JO und NL sind gleichwertig und stehen beide auf Rang 1, während ZNO auf Rang 3 steht. Dies gilt für HAA und SMA.

Fazit: Alle Standortgebiete verfügen über sehr günstige räumliche Verhältnisse in der potenziellen Lagerzone, auch wenn in ZNO an den Wirtgesteinsgrenzen am meisten Störungen seismisch kartiert sind.

4.1.1.4 Zusammenstellung der Bewertungen

Tab. 4-1: Kennzahlen und Daten zu den Indikatoren für die qualitative Bewertung und das Ranking der EG HAA und SMA für das Kriterium 1.1 «Räumliche Ausdehnung»

Legende Bewertung gem. Nutzwertanalyse: dunkelgrün = sehr günstig, hellgrün = günstig, gelb = bedingt günstig

Legende Rangfolge: Die Zahlen entsprechen den Rängen 1 – 3.

Kennzahlen / qualitatives Merkmal		JO HAA	NL HAA	ZNO HAA	JO SMA	NL SMA	ZNO SMA	Quelle
Indikator «Platzangebot untertag»								
Fläche des EG und der Platzreserven	km²	6	6	6	3.6	3.6	3.6	siehe Kap. 3.4 als Zusammenfassung von Nagra (2024d)
	Bewertung							
	Rangfolge	1	1	1	1	1	1	
Indikator «Mächtigkeit EG»								
Mächtigkeit EG über den Bereich des EG und der Platzreserven gemittelt	m (Werte gerundet)	225	315	280	220	340	280	Basierend auf Kap. 3.3 und Enclosure 3-9a bis 3-9c und 3-10 in Nagra (2024g)
	Bewertung							
	Rangfolge	3	1	2	3	1	2	
Mächtigkeit EG mit potenziell zusätzlichen uRG	m	-	400	-	-	-	-	
	Bewertung und Rangfolge	siehe Kriterium 3.2						
Indikator «Seismisch kartierte Störungen an Wirtgesteinsgrenzen»								
Ungestörter Flächenanteil auf den Wirtgesteinsgrenzen im Bereich des EG und der Platzreserven für 100 m (200 m) Sicherheitsabstand	% (Werte gerundet)	100 (100)	100 (100)	75 (60)	100 (100)	100 (100)	75 (55)	Basierend auf Kap. 4.3.4 in Nagra (2024h)
	Bewertung							
	Rangfolge	1	1	3	1	1	3	

4.1.2 Hydraulische Barrierewirkung (Kriterium 1.2)

Zur Sicherstellung der langfristigen Isolation und des Einschlusses der radioaktiven Abfälle werden Gesteine mit limitierter Grundwasserbewegung gesucht.

Die hydraulische Barrierewirkung des EG wird mit den drei Indikatoren «Darcy-Fluss im EG» (Kap. 4.1.2.1), «Tracer-Fluss im EG» (Kap. 4.1.2.2) und «Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation» (Kap. 4.1.2.3) erfasst. Die Indikatoren und Bewertungsskalen sind in Anhang A.2 begründet. Nachfolgend werden die Charakterisierung und Bewertung pro Indikator für das Kriterium 1.2 erläutert und in Kap. 4.1.2.4 zusammengefasst.

4.1.2.1 Darcy-Fluss im EG

Charakterisierung: Die hydraulische Barrierefunktion des EG wird durch die hydraulische Durchlässigkeit und den hydraulischen Gradienten bestimmt. Aufgrund der tonmineralreichen Gesteinszusammensetzung, der feinen Porenstruktur und des ausgeprägten Selbstabdichtungsvermögens weist der Opalinuston in allen Standortgebieten eine äusserst geringe hydraulische Durchlässigkeit auf (Kap. 5.10 in Nagra 2024h).

Die Bandbreite der Werte für die vertikale hydraulische Durchlässigkeit im Opalinuston in den drei Standortgebieten beträgt ca. 10^{-13} m/s bis deutlich unter 10^{-14} m/s, mit einem «best estimate»-Wert von 10^{-14} m/s. Auch die oberen und unteren Rahmengesteine weisen geringe hydraulische Durchlässigkeiten auf, die wichtigste Einflussgrösse ist der Tonmineralgehalt (im Bereich $<10^{-13}$ m/s für Testintervalle mit Tonmineralgehalten >40 Gew.-%; im Bereich $<10^{-11}$ m/s für Testintervalle mit Tonmineralgehalten >20 Gew.-%). Die auf Basis der Datengrundlage abgeschätzten maximalen Werte für den hydraulischen Gradienten zwischen den Aquiferen betragen ca. 0.5 – 1 m/m, mit geringen Unterschieden zwischen den Standortgebieten. Die hydraulischen Eigenschaften sind in Kap. 5 und Enclosure 7 in Nagra (2024g) dokumentiert.

Kennzahlen und Bewertung: Als Indikator für die hydraulische Barrierefunktion wird der Darcy-Fluss (spezifischer Wasserfluss) im EG betrachtet. Er wird in allen Standortgebieten durch den Opalinuston bestimmt, dem hydraulisch dichtesten Element im Schichtstapel, und beträgt für alle EG ca. 10^{-14} m/s.

Der Indikator «Darcy-Fluss im EG» wird für HAA und SMA in allen Standortgebieten mit *sehr günstig* bewertet, ohne Abstufung bei der Rangfolge.

Fazit: Alle EG weisen sehr günstige hydraulische Eigenschaften auf.

4.1.2.2 Tracer-Fluss im EG

Charakterisierung: Der Stofftransport, und somit der Transport der Radionuklide, wird im EG durch Diffusion dominiert (Kap. 5.10 in Nagra 2024h). Die Beurteilung der Wirkung der EG als Transportbarriere für Radionuklide wird deshalb anhand der effektiven Diffusionskoeffizienten und mittels des Indikators «Tracer-Fluss im EG» beurteilt.

Kennzahlen und Bewertung: Die effektiven Diffusionskoeffizienten liegen überwiegend im Bereich von 10^{-10} – 10^{-12} m²/s, teilweise noch tiefer (Kap. 3 und elektronische Look-up Tabellen in Glaus et al. 2024). Es zeigt sich, dass die für den vertikalen Stofftransport massgebenden, harmonisch gemittelten effektiven Diffusionskoeffizienten in allen EG durch den Opalinuston bestimmt werden und für zwei dosisrelevante Radionuklide (d. h. für das dosisdominierende Radionuklid ¹²⁹I im HAA-Lager und für ¹⁴C im SMA-Lager) im Bereich $\leq 10^{-11}$ m²/s liegen.

Der Indikator «Tracer-Fluss im EG» wird für HAA und SMA in allen Standortgebieten mit *sehr günstig* bewertet, ohne Abstufung bei der Rangfolge.

Fazit: Alle EG zeigen ein sehr günstiges diffusionsdominiertes Transportverhalten.

4.1.2.3 Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation

Charakterisierung: Weitere Evidenz für die hydraulische Barrierewirkung und für den diffusionsdominierten Transport ergeben sich aus Untersuchungen der Grundwässer in den Aquiferen (Kap. 4.5.5 in Nagra 2024h) und der Porenwässer in den dazwischen liegenden, gering durchlässigen Gesteinen (Aquitarde) (Kap. 4.6 in Nagra 2024h). Zwischen dem Grundwasser in den Aquiferen und dem Porenwasser in den Aquitarden (i.e. im EG) findet über lange Zeiträume ein diffusiver Austausch statt. Ist die Fliessgeschwindigkeit im Aquifer sehr gering oder nahe null, resultieren sehr flache Konzentrationsgradienten im Porenwasser der Aquitarde. Dies manifestiert sich in flachen Profilen der natürlichen Tracer im Wirtgestein und in den oberen und unteren Rahmengesteinen, welche sich durch den (oben beschriebenen) diffusionsdominierten Transport erklären lassen (Kap. 4.9 in Nagra 2024h). Konservierte alte Porenwasserkomponenten im EG (Kap. 4.6 in Nagra 2024h) und hohe Grundwasserverweilzeiten in den Aquiferen (Kap. 4.5.5 in Nagra 2024h) sind deshalb unabhängige Evidenzen für einen geringen Austausch mit aktiven, oberflächennahen Fliesssystemen und somit für die langfristig gute Einschluss- und Rückhalte-wirkung des EG.

Qualitative Merkmale und Bewertung: Die durchgeführten Untersuchungen bestätigen das hohe Alter der Porenwässer im Opalinuston in allen Standortgebieten und sind unabhängige Evidenz für das Langzeitisolationsvermögen des Wirtgesteins. In NL weist das Porenwasser des Opalinustons besonders alte Komponenten auf (Kap. 4.6 in Nagra 2024h), das Grundwasser im Malm-Aquifer ist durch besonders hohe Verweilzeiten gekennzeichnet (Kap. 4.5.5.2 in Nagra 2024h) und der Keuper-Aquifer ist teilweise hydraulisch inaktiv. Alle Beobachtungen lassen auf vergleichsweise stagnierende hydrogeologische Verhältnisse in NL schliessen (Kap. 4.5.5 in Nagra 2024h). In ZNO zeigen die Bohrungen im Nordwesten im Vergleich zu NL eine stärkere Interaktion des Malm-Aquifers mit jüngeren meteorischen Wässern. In JO deuten meteorische Signaturen auf eine stärkere Anbindung der Aquifere an oberflächennahe Fliesssysteme hin. Diese Evidenzen deuten darauf hin, dass in NL die Wechselwirkung mit rezenten, oberflächennahen Fliesssystemen am geringsten ist (Kap. 4.9 in Nagra 2024h). Damit ist die Isolation der Abfälle in NL langfristig am günstigsten.

Entsprechend wird der Indikator «Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation» für HAA und SMA im Standortgebiet NL mit *sehr günstig*, in den Standortgebieten JO und ZNO mit *günstig* bewertet. Aufgrund der Unterschiede in der hydrogeologischen Situation werden die Standortgebiete wie folgt eingestuft: NL steht auf Rang 1, ZNO auf Rang 2 und JO auf Rang 3. Dies gilt für HAA und SMA.

Fazit: NL weist die geringste Wasserzirkulation in den Aquiferen und somit eine sehr günstige hydrogeologische Situation für eine langfristige Isolation der radioaktiven Abfälle auf.

4.1.2.4 Zusammenstellung der Bewertungen

Tab. 4-2: Kennzahlen, qualitative Merkmale und Daten zu den Indikatoren für die qualitative Bewertung und das Ranking der EG HAA und SMA für das Kriterium 1.2 «Hydraulische Barrierewirkung»

Legende Bewertung gem. Nutzwertanalyse: dunkelgrün = sehr günstig, hellgrün = günstig, gelb = bedingt günstig

Legende Rangfolge: Die Zahlen entsprechen den Rängen 1 – 3.

Kennzahl		JO HAA	NL HAA	ZNO HAA	JO SMA	NL SMA	ZNO SMA	Quelle
Indikator «Darcy-Fluss im EG»								
Messwerte erwartete vertikale hydraulische Durchlässigkeit (harmonisches Mittel K_v über gesamten Schichtstapel des EG)	m/s	1.4×10^{-14}	1.0×10^{-14}	7.7×10^{-15}	1.4×10^{-14}	1.0×10^{-14}	7.7×10^{-15}	Basierend auf Kap. 5 und Enclosure 7 in Nagra (2024g)
	Bewertung							
	Rangfolge	1	1	1	1	1	1	
Indikator «Tracer-Fluss im EG»								
Messwerte effektive Diffusionskoeffizienten (harmonische Mittelung der eff. Diffusionskoeffizienten Lagerebene bis Obergrenze EG)	m ² /s	1.9×10^{-12}	4.0×10^{-12}	4.0×10^{-12}	2.1×10^{-12}	3.9×10^{-12}	4.0×10^{-12}	Basierend auf Kap. 3 und elektronischen Look-up Tabellen in Glaus et al. (2024) und Enclosure 7 in Nagra (2024g)
Messwerte effektive Diffusionskoeffizienten (harmonische Mittelung der eff. Diffusionskoeffizienten Lagerebene bis Untergrenze EG)	m ² /s	1.8×10^{-12}	3.4×10^{-12}	3.6×10^{-12}	2.0×10^{-12}	3.5×10^{-12}	3.7×10^{-12}	Basierend auf Kap. 3 und elektronischen Look-up Tabellen in Glaus et al. (2024) und Enclosure 7 in Nagra (2024g)
	Bewertung							
	Rangfolge	1	1	1	1	1	1	

Kennzahl		JO HAA	NL HAA	ZNO HAA	JO SMA	NL SMA	ZNO SMA	Quelle
Indikator «Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation»								
Evidenz für hohes Alter der Porenwässer im Opalinuston	-	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Basierend auf Kap. 4.6 in Nagra (2024h)
Zusätzliche Evidenz für hohe Verweilzeiten der Grundwässer in den Aquiferen ober- und unterhalb des EG	-	Keine	Ja, in Malm- und Keuper-Aquifer	Ja, in Keuper-Aquifer	Keine	Ja, in Malm- und Keuper-Aquifer	Ja, in Keuper-Aquifer	Basierend auf Kap. 4.5.5 in Nagra (2024h)
	Bewertung							
	Rangfolge	3	1	2	3	1	2	

4.1.3 Geochemische Bedingungen (Kriterium 1.3)

Für die Langzeitsicherheit günstig ist, wenn die geochemischen Bedingungen und die Gesteinsbeschaffenheit zu einem guten Radionuklid-Rückhaltevermögen im EG führen. Der Fokus liegt auf den geochemischen Bedingungen im Opalinuston, welcher als Wirtgestein den Hauptbeitrag zur Rückhaltewirkung der natürlichen Barriere liefert (Kap. 6.1.1 und Kap. 6.2.2 in Nagra 2024k).

Die geochemischen Bedingungen werden mit den zwei Indikatoren «Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Sorptionsvermögen» (Kap. 4.1.3.1) und «Salinität im WG» (Kap. 4.1.3.2) erfasst. Die Indikatoren und Bewertungsskalen sind im Anhang A.3 begründet. Nachfolgend werden die Charakterisierung und Bewertung pro Indikator für das Kriterium 1.3 erläutert und in Kap. 4.1.3.3 zusammengefasst.

4.1.3.1 Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Sorptionsvermögen

Charakterisierung: Der Opalinuston weist eine für die Sorption, also der Bindung der Radionuklide an das Gestein, sehr günstige mineralogische Zusammensetzung auf. Er besteht insbesondere aus feinkörnigen Tonmineralen und Quarz sowie aus Karbonaten. Die hohen Tonmineralgehalte korrelieren mit einer hohen Kationen-Austausch-Kapazität, welche ein gutes Sorptionsvermögen des Opalinustons gewährleistet (Kap. 7 in Miron et al. 2024).

Kennzahlen und Bewertung: Die Laboruntersuchungen an Kernproben aus Tiefbohrungen in allen drei Standortgebieten bestätigen einen durchgehend hohen Tonmineralgehalt im Bereich von total ca. 60 Gew.-% (ca. 40 – 70 %) für den Opalinuston. Die Zusammensetzung der Tonfraktion im Opalinuston ist in allen Standortgebieten vergleichbar: Es überwiegen die Tonminerale Illit (ca. 50 %) und Kaolinit (30 %) vor Chlorit und Smektit (je ca. 10 %). Die standortspezifischen Unterschiede in diesen Daten sind gering (Kap. 5.2 in Nagra 2024h; Kap. 4.4 und Enclosure 7 in Nagra 2024g).

Der Indikator «Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Sorptionsvermögen» wird für alle EG HAA und SMA mit *sehr günstig* bewertet, ohne Abstufung bei der Rangfolge.

Fazit: Mit dem Opalinuston als Wirtgestein weisen alle EG eine für die Sorption sehr günstige mineralogische Zusammensetzung auf.

4.1.3.2 Salinität im WG

Charakterisierung: Die mineralogische Zusammensetzung des Opalinuston puffert auch das Porenwasser und sorgt für stabile und reduzierende geochemische Bedingungen, welche die Radionuklid-Rückhaltung im EG begünstigen (Kap. 5.4 in Nagra 2024h). Die Salinität des Porenwassers wird insbesondere durch die Konzentrationen von Natrium und Chlorid definiert. Diese hängt ab von der standortspezifischen paläohydrogeologischen Entwicklung (Kap. 4.5.5 in Nagra 2024h).

Kennzahlen und Bewertung: Die in Etappe 3 gemessenen Ionenstärken im Porenwasser betragen ca. 0.16 mol/l in JO und ca. 0.32 mol/l in ZNO und NL (Appendix A und B in Mäder & Wersin 2023). Zum Vergleich: Meerwasser weist eine Ionenstärke von ca. 0.7 mol/l auf.

Die Ionenstärken im Opalinuston sind in allen Standortgebieten moderat, der Indikator «Salinität im WG» wird deshalb für alle Standortgebiete mit *günstig* bewertet. Da die Ionenstärke einen Einfluss auf die effektiven Diffusionskoeffizienten für Anionen ausübt, wird die Rangfolge der EG wie folgt eingestuft: JO steht auf Rang 1, NL und ZNO gleichwertig auf Rang 2. Dies gilt für HAA und SMA.

Fazit: Die Porenwasserchemie im Opalinuston ist in allen EG günstig hinsichtlich des Radionuklid-Rückhaltvermögens. JO weist die tiefste Ionenstärke auf.

4.1.3.3 Zusammenstellung der Bewertungen

Tab. 4-3: Kennzahlen und Daten zu den Indikatoren für die qualitative Bewertung und das Ranking der EG HAA und SMA für das Kriterium 1.3 «Geochemische Bedingungen»

Legende Bewertung gem. Nutzwertanalyse: dunkelgrün = sehr günstig, hellgrün = günstig, gelb = bedingt günstig

Legende Rangfolge: Die Zahlen entsprechen den Rängen 1 – 3.

Kennzahl		JO HAA	NL HAA	ZNO HAA	JO SMA	NL SMA	ZNO SMA	Quelle
Indikator «Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Sorptionsvermögen»								
Messwerte des Tonmineralgehalts im WG	Gew.-%	60 % (43 – 73 %)	59 % (40 – 69 %)	54 % (41 – 64 %)	60 % (43 – 73 %)	59 % (40 – 69 %)	54 % (41 – 64 %)	Kap. 4.4 und Enclosure 7 in Nagra (2024g)
	Bewertung							
	Rangfolge	1	1	1	1	1	1	
Indikator «Salinität im WG»								
Messwerte der Ionenstärke des Porenwassers im WG	mol/l	ca. 0.16	ca. 0.32	ca. 0.32	ca. 0.16	ca. 0.32	ca. 0.32	Appendix A und B in (Mäder & Wersin 2023)
	Bewertung							
	Rangfolge	1	2	2	1	2	2	

4.1.4 Freisetzungspfade (Kriterium 1.4)

Für die Langzeitsicherheit günstig sind Transportpfade, die zu einer erheblichen Verzögerung der Radionuklidfreisetzung aus dem EG führen. Je länger der Nuklidtransport im Gestein dauert, desto grösser ist der Anteil der Radionuklide, die im Gestein zerfallen und somit die Biosphäre nicht erreichen. Der Fokus liegt auf den Eigenschaften des Opalinustons, welcher als Wirtgestein den Hauptbeitrag zur Rückhaltewirkung der natürlichen Barriere liefert (Kap. 6.1.1 und Kap. 6.2.2 in Nagra 2024k).

Die Eigenschaften der Freisetzungspfade im Wirtgestein werden mit den drei Indikatoren «Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums im WG» (Kap. 4.1.4.1), «Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Selbstabdichtungsvermögen» (Kap. 4.1.4.2) «Störungstransmissivität im WG» (Kap. 4.1.4.3) erfasst. Die Indikatoren und Bewertungsskalen sind im Anhang A.4 begründet. Nachfolgend werden die Charakterisierung und Bewertung pro Indikator für das Kriterium 1.4 erläutert und in Kap. 4.1.4.4 zusammengefasst.

4.1.4.1 Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums im WG

Charakterisierung: Durch sein tonmatrixgestütztes Gefüge weist der Opalinuston eine feine Porenstruktur auf, welche das Transportverhalten von Radionukliden stark beeinflusst (Kap. 5.3.4 in Nagra 2024h). Die hydraulischen Eigenschaften von geklüftetem Opalinuston in Lagertiefe unterscheiden sich aufgrund des guten Selbstabdichtungsvermögens praktisch nicht von denjenigen der intakten Gesteinsmatrix (Kap. 5.6 in Nagra 2024h). Der Opalinuston kann deshalb als (äquivalent) poröses Medium mit äusserst geringer Wasserführung und diffusionsdominiertem Radionuklidtransport angesehen werden (Kap. 5.9 in Nagra 2024h).

Kennzahlen, qualitative Merkmale und Bewertung: Die Porengrössen liegen überwiegend im Bereich von einigen wenigen Nanometern, die Porosität beträgt ca. 10 - 13 Vol.-%, die äusseren spezifischen Oberflächen betragen ca. 20 – 40 m²/g (Kap. 5.3 in Nagra 2024h). Die effektiven Diffusionskoeffizienten für tritierte Wassermoleküle (HTO) sind in allen Standortgebieten praktisch identisch, was auf eine ähnliche Ausbildung des Porenraums im Opalinuston in den drei Standortgebieten schliessen lässt. Der für Anionen zugängliche Teil der Porosität beträgt ca. 30 – 50 % (Kap. 5.4 in Nagra 2024h). Bei den effektiven Diffusionskoeffizienten für Anionen wurden geringfügige Unterschiede zwischen den Standortgebieten beobachtet, was u. a. auf standortspezifische Unterschiede bei der vorhandenen Salinität im Opalinuston zurückzuführen ist (Kap. 5.8 in Nagra 2024h). Die sicherheitstechnischen Auswirkungen dieser standortspezifischen Unterschiede sind gering.

Dementsprechend wird der Indikator «Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums im WG» für alle EG HAA und SMA mit *sehr günstig* bewertet, ohne Abstufung bei der Rangfolge.

Fazit: Die Beschaffenheit des Porenraums / der Transportpfade im intakten Opalinuston ist in allen EG sehr günstig.

4.1.4.2 Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Selbstabdichtungsvermögen

Charakterisierung: Aufgrund seines hohen Tonmineralgehalts weist der Opalinuston eine geringe Steifigkeit und ein erhöhtes Quellpotenzial auf (Kap. 5.5 in Nagra 2024h). Diese Eigenschaften ermöglichen bei den Spannungsverhältnissen auf Lagerebene eine effiziente Selbstabdichtung von Diskontinuitäten und damit die Begrenzung ihrer hydraulischen Transmissivität (Kap. 5.7 in Nagra 2024h).

Kennzahlen und Bewertung: Die mineralogischen Zusammensetzungen der Kernproben aus den Tiefbohrungen zeigen, dass der Opalinuston und einige der Rahmengesteine in allen Standortgebieten hohe Tonmineralgehalte von >40 Gew.-% aufweisen (Kap. 4.4 und Enclosure 7 in Nagra 2024g). Testintervalle mit tonmineralreichen Gesteinen weisen durchwegs sehr geringe hydraulische Durchlässigkeiten auf ($<10^{-13}$ m/s, vgl. Fig. 4-1; und Kap. 5.6 in Nagra 2024h). Die Präsenz/Absenz von kleinskaligen Störungen im Testintervall hat keinen Einfluss auf das Ergebnis. Testintervalle mit einem Tonmineralgehalt von 20 – 40 Gew.-% weisen auch noch geringe bis sehr geringe hydraulische Durchlässigkeiten auf ($<10^{-11}$ m/s, teilweise sogar $<10^{-13}$ m/s). Erst bei Tonmineralgehalten von deutlich <20 % steigen die beobachteten hydraulischen Durchlässigkeiten stark an (Kap. 5.6 in Nagra 2024h).

Der erhöhte Tonmineralgehalt und das charakteristische, plastische Verhalten ist Evidenz für ein ausgeprägtes Selbstabdichtungsvermögen im Opalinuston und in einigen seiner tonmineralreichen Rahmengesteine. Bedingung dafür ist, dass die effektiven Normalspannungen in Lagertiefe ausreichend gross sind. Dies wird durch eine Restüberdeckung der Lagerebene von mindestens 200 m gewährleistet (Kap. 5.7 in Nagra 2024h), was in allen Standortgebieten mehr als ausreichend der Fall ist. Der Erhalt der günstigen Eigenschaften des Wirtgestein über den Betrachtungszeitraum wird in Kap. 4.2 und Kap. 4.3 diskutiert.

Aus diesen Gründen wird der Indikator «Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Selbstabdichtungsvermögen» für alle EG HAA und SMA mit *sehr günstig* bewertet, ohne Abstufung bei der Rangfolge.

Fazit: Das Selbstabdichtungsvermögen des Opalinustons ist in allen EG sehr günstig.

4.1.4.3 Störungstransmissivität im WG

Charakterisierung: In keiner der Tiefbohrungen innerhalb der Standortgebiete wurden Störungen im Opalinuston angetroffen, deren hydraulische Transmissivitäten ausserhalb der zu erwartenden Bandbreite der hydraulischen Eigenschaften für die ungestörte Gesteinsmatrix liegen (Kap. 5.6 in Nagra 2024h). Seismisch kartierten Störungen wird bei der Lagerfeldplatzierung nach Möglichkeit ausgewichen, subseismische Elemente sind in allen Standortgebieten vorhanden. Die Anzahl der in Tiefbohrungen im Opalinuston beobachteten, kleinskaligen Strukturen nimmt tendenziell von Westen (JO) nach Osten (NL, ZNO) ab (Kap. 4.3.4 in Nagra 2024h).

Kennzahlen und Bewertung: Die innerhalb der Standortgebiete beobachteten Transmissivitäten («best estimate»-Werte) der in-situ-Tests im Opalinuston mit unterschiedlichen Intervalllängen sind $\leq 10^{-11}$ m²/s, mit typischen Werten um 10^{-12} m²/s (vgl. Fig. 4-2; und Kap. 5.6 in Nagra 2024h). Unter solchen Bedingungen erfolgt der Radionuklidtransport diffusionsdominiert. Die Präsenz/Absenz von Diskontinuitäten im Testintervall hat keinen Einfluss auf das Ergebnis, was auf das ausgeprägte Selbstabdichtungsvermögen des Opalinustons zurückzuführen ist (Kap. 5.6 und 5.7 in Nagra 2024h). Die in den Tiefbohrungen beobachteten horizontalen hydraulischen Durchlässigkeiten liegen bei ca. 5×10^{-14} m/s («best estimate»-Wert), das ist im gleichen Bereich wie die in Kernproben gemessenen Matrixdurchlässigkeiten (Kap. 5.6 in Nagra 2024h).

Dementsprechend wird der Indikator «Störungstransmissivität im WG» für alle EG HAA und SMA mit *sehr günstig* bewertet, ohne Abstufung bei der Rangfolge.

Fazit: Die Transmissivitäten von seismisch nicht kartierbaren Diskontinuitäten im Opalinuston sind in allen EG sehr günstig.

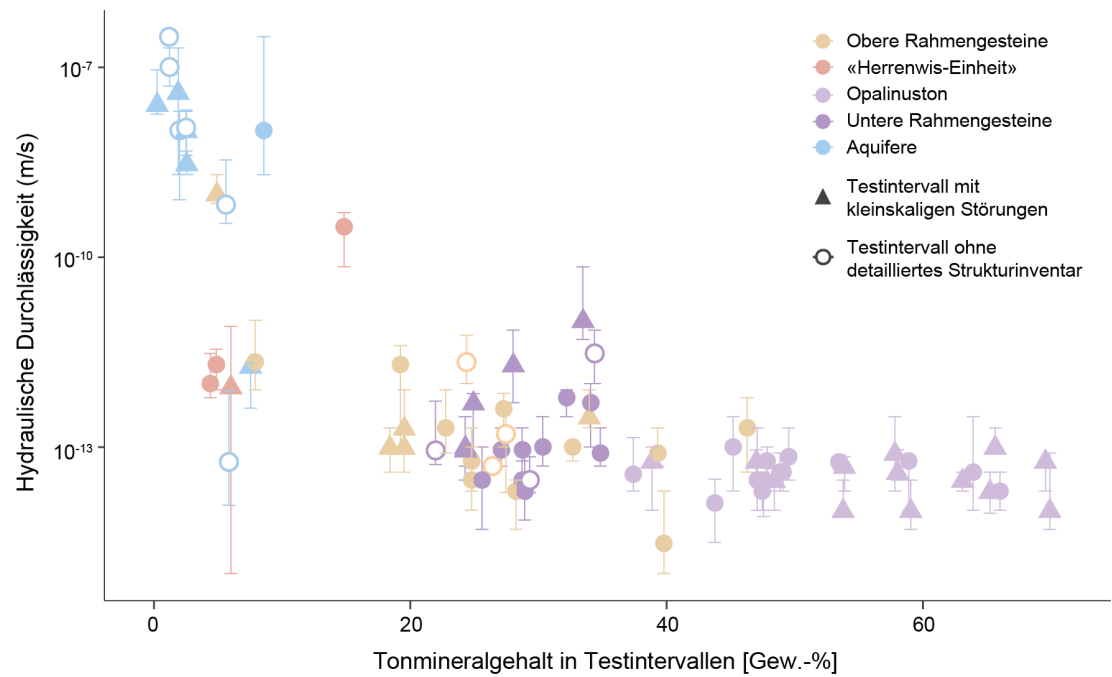


Fig. 4-1: Mittlere hydraulische Durchlässigkeit aus in-situ-Packer-Tests als Funktion des mittleren Tonmineralgehalts im EG und in den Aquifere oberhalb des EG
Basierend auf Fig. 5-42 in Nagra (2024h).

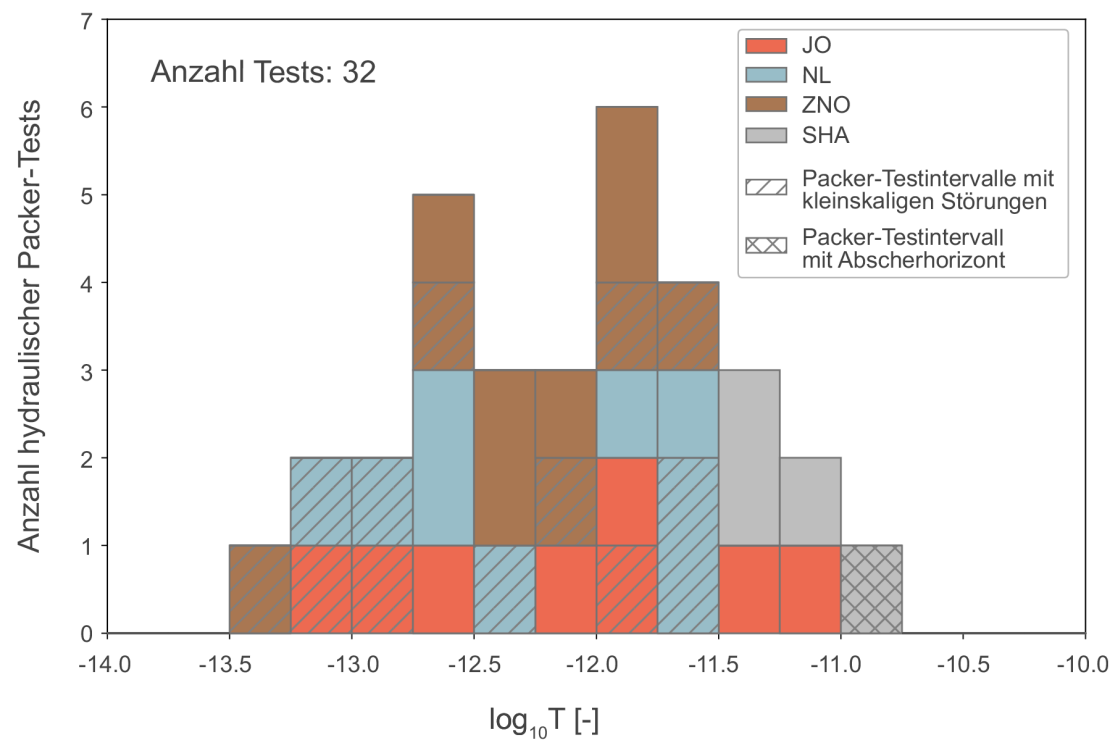


Fig. 4-2: Hydraulische Transmissivitäten aus in-situ-Packer-Tests im Opalinuston
Verteilung des Logarithmus der «Best estimate»-Werte für die hydraulische Transmissivität aus in-situ-Packer-Tests mit unterschiedlichen Intervalllängen.
Basierend auf Fig. 5-40 in Nagra (2024h).

4.1.4.4 Zusammenstellung der Bewertungen

Tab. 4-4: Kennzahlen, qualitative Merkmale und Daten zu den Indikatoren für die qualitative Bewertung und das Ranking der EG HAA und SMA für das Kriterium 1.4 «Freisetzungspfade»

Legende Bewertung gem. Nutzwertanalyse: dunkelgrün = sehr günstig, hellgrün = günstig, gelb = bedingt günstig

Legende Rangfolge: Die Zahlen entsprechen den Rängen 1 – 3.

Kennzahl		JO HAA	NL HAA	ZNO HAA	JO SMA	NL SMA	ZNO SMA	Quelle
Indikator «Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums im WG»								
Qualitative Beurteilung auf der Grundlage von Messwerten aus Kernproben im WG		Äquivalent-poröses Medium (feine Porenstruktur, keine Hinweise auf Wasserführung in Diskontinuitäten innerhalb der Gesteinsmatrix)						Kap. 5.3.4, 5.6 und 5.9 in Nagra (2024h)
	Bewertung							
	Rangfolge	1	1	1	1	1	1	
Indikator «Störungstransmissivität im WG»								
Messwerte für Transmissivität aus Packer-Tests im Opalinuston («best estimate»-Werte)	m ² /s	$T \leq 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$						Kap. 5.6 in Nagra (2024h)
	Bewertung							
	Rangfolge	1	1	1	1	1	1	
Indikator «Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Selbstabdichtungsvermögen»								
Messwerte des Tonmineralgehalts im Opalinuston	Gew.-%	60 % (43 – 73 %)	59 % (40 – 69 %)	54 % (41 – 64 %)	60 % (43 – 73 %)	59 % (40 – 69 %)	54 % (41 – 64 %)	Kap. 4.4 und Enclosure 7 in Nagra (2024g)
	Bewertung							
	Rangfolge	1	1	1	1	1	1	

4.2 Langzeitstabilität (Kriteriengruppe 2)

Mit der Kriteriengruppe 2 wird anhand von vier Kriterien bewertet, wie die Barriereigenschaften im gesamten Betrachtungszeitraum in Anbetracht der langfristig zu erwartenden Prozesse erhalten bleiben. Es sind dies die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (Kap. 4.2.1), der Einfluss von Erosion (Kap. 4.2.2), die lagerbedingten Einflüsse (Kap. 4.2.3) und Nutzungskonflikte (Kap. 4.2.4).

4.2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (Kriterium 2.1)

Günstig sind Gebiete und Gesteine, welche die erforderliche Barrierewirkung über den Betrachtungszeitraum auch in Anbetracht langfristiger geologischer Prozesse gewährleisten.

Von zentraler Bedeutung für die Langzeitstabilität sind zukünftige differenzielle Bewegungen im Gesteinsverband. Sie werden mit den Indikatoren «Seismizität» (Kap. 4.2.1.1) und «Seismisch kartierte Störungen in kompetenten Formationen» (Kap. 4.2.1.2) bewertet. Weiter wird das «Potenzial für Bildung von Wasserwegsamkeiten im EG durch Lösungsprozesse» (Kap. 4.2.1.3) bewertet.

Die Indikatoren und Bewertungsskalen sind im Anhang A.5 begründet. Nachfolgend werden die Charakterisierung und Bewertung pro Indikator für das Kriterium 2.1 erläutert und in Kap. 4.2.1.4 zusammengefasst.

4.2.1.1 Seismizität

Charakterisierung: In der Übersicht der instrumentell und historisch erfassten Seismizität in der Schweiz und Umgebung zeigen die Standortregionen eine im Vergleich zu den seismisch aktivsten Schweizer Regionen Wallis, Basel, Graubünden und Churer Rheintal geringere Seismizität (Fig. 4-3; und Kap. 6.2.3 in Nagra 2024h). Dies widerspiegelt sich auch in Karten zur zukünftig erwarteten räumlichen Verteilung von Erdbeben, die auf breit abgestützten Expertenbefragungen basieren (swissnuclear 2013-15).

Kennzahlen und Bewertung: Fig. 4-3 zeigt die modellierte Häufigkeitskarte von Erdbeben mit Magnituden ≥ 6 , wie sie aus dem Projekt PRP (swissnuclear 2013-15) unter Berücksichtigung der Angaben von vier verschiedenen Expertengruppen resultierte. Die Daten zeigen eine erhöhte Häufigkeit von Erdbeben in der Zentralschweiz und in den Alpen im Vergleich zur Nordschweiz. Die Unterschiede zwischen den Standortgebieten sind klein und abhängig von den verschiedenen Modellen und der betrachteten Herdtiefe. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass alle Standortgebiete ausserhalb der Zonen mit erhöhter Erdbebenaktivität liegen.

Der Indikator «Seismizität» wird deshalb für alle EG HAA und SMA mit *günstig* bewertet, ohne Abstufung bei der Rangfolge.

Fazit: Alle EG liegen in günstigen Situationen bezüglich Erdbebenaktivität in der Schweiz.

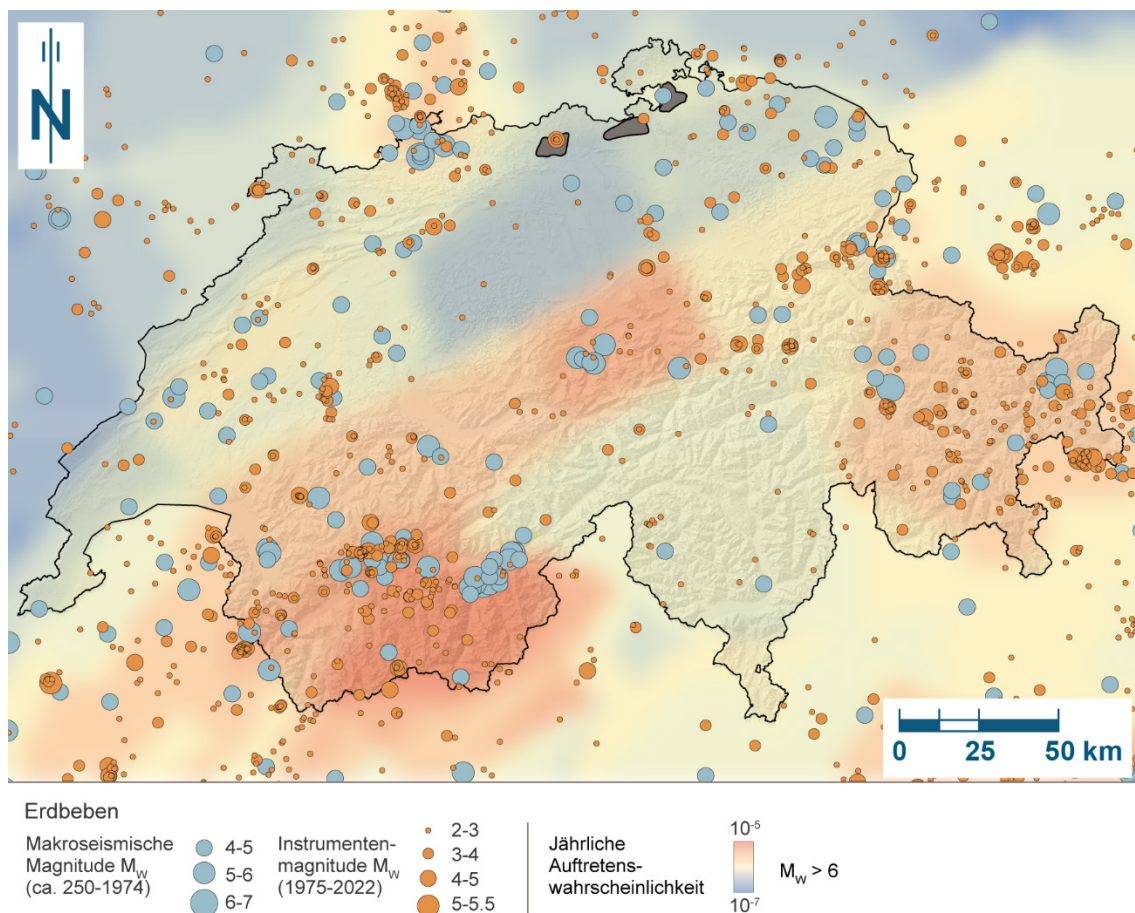


Fig. 4-3: Instrumentell und historisch erfasste Seismizität in der Schweiz und Umgebung

Auftretenswahrscheinlichkeit von Erdbeben mit Magnituden $M_w \geq 6$ in der Schweiz, basierend auf Einschätzungen von vier Expertengruppen im Rahmen des PRP-Projekts (swissnuclear 2013-15), vgl. auch Fig. 1-3 in Nagra (2024h). Die Hintergrundfarbe zeigt die jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit eines Erdbebens mit $M_w \geq 6$. Zum Vergleich sind die effektiv erfassten Erdbeben dargestellt (farbige Punkte, mehrheitlich Erdbeben mit kleiner Magnitude).

4.2.1.2 Seismisch kartierte Störungen in kompetenten Formationen

Charakterisierung: Differenzielle Bewegungen finden bevorzugt an bestehenden Störungen statt (Kap. 6.2.4 in Nagra 2024h). Regionale Störungszonen wurden in der Definition der potenziellen Lagerzonen berücksichtigt (Kap. 3.1.1 in Nagra 2024d) und seismisch kartierte Störungen an den Wirtgesteinsgrenzen wurden mit Blick auf die Flexibilität in der Anordnung der Lagerfelder bewertet (Kr 1.1, siehe Kap. 4.1.1.3). Im Hinblick auf den langfristigen Erhalt der Rückhalteigenschaften des EG werden ergänzend die seismisch kartierten Störungen in den kompetenten Formationen ober- und unterhalb des EG bewertet. Als kompetente Formationen werden Gesteine in Schichtpaketen bezeichnet, die einer Verformung weitgehend standhalten und bei hoher mechanischer Beanspruchung ein sprödes Verhalten zeigen, was zur Bildung von Störungen führt (Kap. 4.4 und 5.5.3 in Nagra 2024h). Differenzielle Bewegungen entlang solcher Störungen können sich potenziell auch in den EG fortpflanzen. Auch wenn selbst in solchen Situationen durchgängige Fließpfade mit erhöhter hydraulischer Durchlässigkeit im EG über längere Zeiträume sehr unwahrscheinlich sind (Kap. 5.5, 5.6 und 5.7 in Nagra 2024h), wird eine Situation ohne solche Störungen bevorzugt, weil sie bzgl. der Beständigkeit der Standort- und

Gesteinseigenschaften robuster ist. Es gibt Unterschiede in der strukturellen Komplexität (Kap. 4.3.3 in Nagra 2024h). Im Bereich der potenziellen Lagerzone weist NL den grössten Bereich ohne seismisch kartierte Störungen in den kompetenten Formationen auf, während in ZNO am meisten Störungen kartiert sind (Kap. 4.3.4 in 2024h und Kap. 5.3 in: (Nagra 2024a), (Nagra 2024b), (Nagra 2024c)).

Kennzahlen und Bewertung: Bei einem Abstand von 100 m beträgt der ungestörte Flächenanteil in NL 100 % (HAA) und 95 % (SMA). In JO sind solche Störungen in einem erheblichen Teil der Platzreserven kartiert; der ungestörte Flächenanteil in JO beträgt ca. 70 % (HAA) und ca. 90 % (SMA). In ZNO sind solche Störungen im überwiegenden Teil der Platzreserven kartiert; der ungestörte Flächenanteil in ZNO beträgt ca. 35 % (HAA und SMA). Unter Betrachtung eines Abstandes von 200 m zu den seismisch kartierten Störungen verkleinert sich der ungestörte Flächenanteil in JO und ZNO weiter, in NL verbleibt er immer noch bei 100 % (HAA) bzw. bei 85 % (SMA).

Weitere Betrachtungen: Sollte es zu einer zukünftigen Neubildung von Störungen im EG kommen, so dürften deren Länge und Versätze in allen Standortgebieten eher klein ausfallen (Kap. 6.2.4 in Nagra 2024h) und das Selbstabdichtungsvermögen der tonmineralreichen Gesteine in allen EG ausreichend wirksam sein (Kap. 5.7 in Nagra 2024h).

Entsprechend wird der Indikator «Seismisch kartierte Störungen in kompetenten Formationen» in JO mit *günstig* (HAA) und *sehr günstig* (SMA) bewertet, in NL mit *sehr günstig* (HAA und SMA) und in ZNO mit *bedingt günstig* (HAA und SMA). Aufgrund der angestrebten Vermeidung von Störungen, die ober- und unterhalb des EG und der Platzreserven kartiert sind, wird die Rangfolge der Standortgebiete wie folgt eingestuft: NL steht auf Rang 1, JO auf Rang 2 und ZNO auf Rang 3. Dies gilt für HAA und SMA.

Fazit: Die seismisch kartierten Störungen in den Gesteinen ober- und unterhalb des EG deuten in NL auf sehr günstige, in JO auf günstige bis sehr günstige und in ZNO auf bedingt günstige Verhältnisse hinsichtlich zukünftiger differentieller Bewegungen im EG hin.

4.2.1.3 Potenzial für Bildung von Wasserwegsamkeiten im EG durch Lösungsprozesse

Im Rahmen der qualitativen Bewertung der EG wird das Potenzial für die Bildung von Wasserwegsamkeiten durch Lösungsprozesse dem Verkarstungspotenzial gleichgesetzt.

In keiner Tiefbohrung wurden innerhalb der EG verkarstete Gesteinseinheiten beobachtet und alle EG weisen Bedingungen ohne Verkarstungspotenzial auf, was vorteilhaft für die Beständigkeit der Barrierewirkung gegenüber Lösungsprozessen ist. Dies wird nachfolgend für das Wirtgestein, für die oberen und für die unteren Rahmengesteine separat begründet.

Potenzial für Bildung von Wasserwegsamkeiten durch Lösungsprozesse im WG

Im Opalinuston sind die Gehalte an lösungsfähigen Mineralen klein und die hydraulische Durchlässigkeit ist äusserst gering; er weist deshalb kein Potenzial zur Bildung von Wasserwegsamkeiten durch Lösungsprozesse auf (Kap. 6.5.2.3 in Nagra 2024h).

Der Indikator «Potenzial für Bildung von Wasserwegsamkeiten durch Lösungsprozesse innerhalb WG» wird daher für alle EG HAA und SMA mit *sehr günstig* bewertet, ohne Abstufung bei der Rangfolge.

Potenzial für Bildung von Wasserwegsamkeiten durch Lösungsprozesse in den oberen Rahmengesteinen

In allen drei Standortgebieten sind in den oberen Rahmengesteinen im EG Gesteinseinheiten mit erhöhten Karbonatgehalten vorhanden. Diese weisen aber in der Regel geringe Mächtigkeiten (bis zu einigen Metern) und geringe hydraulische Durchlässigkeiten auf. Zudem ist die erwartete Überdeckung des EG bis am Ende des Betrachtungszeitraums genügend gross, um eine signifikante dekompressionsbedingte Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit zu verhindern. Sie weisen deshalb kein Potenzial für eine relevante Bildung von Wasserwegsamkeiten durch Lösungsprozesse auf (kein Verkarstungspotenzial) (Kap. 6.5.2 in Nagra 2024h). Eine besondere Situation liegt im Standortgebiet Nördlich Lägern mit der «Herrenwis-Einheit» vor, deren Mächtigkeit im östlichen Teil des Standortgebiets bis zu ca. 40 m beträgt (Kap. 4.5.3.7 in Nagra 2024h). Diese lokal vorkommende Gesteinseinheit ist von gering durchlässigen, tonmineralreichen, nicht verkarstungsfähigen Gesteinseinheiten umgeben. Diese isolieren hydraulisch die «Herrenwis-Einheit», was die nötige Grundwasserzirkulation zur Bildung von Wasserwegsamkeiten durch Lösungsprozesse unterbindet (Kap. 4.5.3.7 in Nagra 2024h). Auch sind die Porenwässer in den angrenzenden Einheiten heute gesättigt an Karbonatmineralien (Kap. 6.5.2.3 in Nagra 2024h). Es ist nicht zu erwarten, dass die «Herrenwis-Einheit» im Bereich der potenziellen Lagerzone im Betrachtungszeitraum von relevanten Dekompaktionseffekten betroffen ist oder gar im oder über dem Vorflutniveau liegen wird, was eine (epigene) Verkarstung ermöglichen könnte (Kap. 6.5.2.3 in Nagra 2024h). In der «Herrenwis-Einheit» im Bereich der potenziellen Lagerzone besteht damit im Betrachtungszeitraum ebenfalls kein Potenzial zur Bildung von Wasserwegsamkeiten durch Lösungsprozesse (kein Verkarstungspotenzial).

Der Indikator «Potenzial für Bildung von Wasserwegsamkeiten durch Lösungsprozesse oberhalb des WG (im EG)» wird daher für alle EG HAA und SMA mit *sehr günstig* bewertet, ohne Abstufung bei der Rangfolge.

Potenzial für Bildung von Wasserwegsamkeiten durch Lösungsprozesse in den unteren Rahmengesteinen

In den unteren Rahmengesteinen gibt es geringmächtige Einheiten mit erhöhten Karbonatgehalten. Aufgrund der gemessenen, geringen hydraulischen Durchlässigkeiten und der verbleibenden Überlagerung bis am Ende des Betrachtungszeitraums wird keine relevante Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeiten durch Lösungsprozesse erwartet (Kap. 6.5.5 in Nagra 2024h). Der Indikator «Potenzial für Bildung von Wasserwegsamkeiten durch Lösungsprozesse unterhalb des WG (im EG)» wird daher für alle EG HAA und SMA mit *sehr günstig* bewertet, ohne Abstufung bei der Rangfolge.

Weitere Betrachtungen: Unterhalb des EG kommen in allen drei Standortgebieten Gesteinseinheiten mit hohen Karbonatgehalten (insb. Keuper-Aquifer und Muschelkalk-Aquifer) oder Anhydritgehalten vor (insb. Bänkerjoch-Formation). Unterhalb der potenziellen Lagerzonen besteht in diesen Einheiten unter den erwarteten hydraulischen und hydrochemischen Bedingungen kein Potenzial zur Bildung von Wasserwegsamkeiten durch Lösungsprozesse, welche zur Entstehung von grösseren Hohlräumen mit Relevanz für die Langzeitstabilität des EG führen könnte. Dies begründet sich durch die hydrogeologische Situation (in der Bänkerjoch-Formation sind Wasserzuflüsse nur im Bereich von regionalen Störungszonen und lokalen Störungen zu erwarten; durch die Anhydrit-Gips-Umwandlung findet jedoch eine gewisse Selbstabdichtung statt) und durch die hydrochemischen Bedingungen (überwiegend gesättigte Grundwässer in Keuper- und Muschelkalk-Aquifer). Auch hier ist nicht zu erwarten, dass sich diese Bedingungen innerhalb des Betrachtungszeitraums wesentlich verändern. Selbst wenn in den Gesteinseinheiten unterhalb des EG (z. B. Keuper-Aquifer oder Muschelkalk-Aquifer) in der fernen Zukunft Lösungshohlräume entstehen sollten, so ist kaum mit einer Beeinträchtigung der Barriereigenschaften im darüberliegenden EG zu rechnen (Kap. 6.5.5 in Nagra 2024h).

4.2.2 Erosion (Kriterium 2.2)

Günstig ist eine Situation, in der die Barrierewirkung des EG nicht oder erst möglichst spät im Betrachtungszeitraum durch Erosion beeinflusst wird.

Die Auswirkungen der Erosion werden mit dem Indikator «Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte» unter Einbezug der Ungewissheiten erfasst. Der Indikator und die Bewertungsskala sind im Anhang A.6 begründet. Nachfolgend werden die Charakterisierung und Bewertung für das Kriterium 2.2 erläutert.

4.2.2.1 Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte

Charakterisierung: Die Landschaftsgeschichte der Nordschweiz während der letzten ca. zwei Millionen Jahre ist von Flusseinschneidung, Abtragung der lokalen Topographie und Gletschererosion geprägt. Die Untersuchungen erlauben die Charakterisierung und Bewertung der relevanten Prozesse und Faktoren, welche die Robustheit der Standortgebiete bezogen auf die langfristigen Auswirkungen der Erosion beeinflussen. Es sind dies die Hebung, die lokale Topographie über dem Lagerstandort, die Ausdehnung der Vergletscherungen, die Tiefe der Lagerebene sowie die Erodierbarkeit der Gesteinssäule über dem Opalinuston. Künftige glaziale und nicht-glaziale Erosionsprozesse dürften mit denen des jüngsten Zeitabschnittes der Erdgeschichte, des Quartärs, vergleichbar sein, allerdings mit geringeren Raten. Für eine ausführliche Beschreibung der Landschaftsentwicklung und Erosion siehe Kap. 2 in Nagra (2024f).

- **Hebung und Flusseinschneidung:** Die Hebung ist der wichtigste Parameter, der die Flusseinschneidung steuert. Es werden nur geringe langfristig gemittelte Hebungsraten erwartet, mit kurzzeitigen Pulsen erhöhter Hebung, z. B. als postglaziale isostatische Ausgleichsbewegung.
- **Lokale Topographie (Topographie über dem tiefsten Niveau der Hauptflüsse) über dem Lagerstandort:** Künftige Flussläufe orientieren sich in erster Linie an der lokalen Topographie. Insbesondere im Zusammenhang mit Vergletscherungen können sich auch Täler quer zu bestehenden Hügelketten bilden («Durchbruchsrinnen»). Dies ist insbesondere für Jura Ost relevant, weil dort ein beträchtlicher Teil der Gesteinsüberdeckung des Lagers über dem Niveau der Aare liegt. In Jura Ost sind alternative Entwässerungsnetze trotz der ausgeprägten Topographie zwar weniger wahrscheinlich als in den anderen Standortgebieten, der Effekt auf die Restüberdeckung über dem Lager ist dafür aber deutlich grösser und relevanter.
- **Ausdehnung der Vergletscherungen:** Die drei Standortgebiete waren in der Vergangenheit in unterschiedlichem Masse vergletschert (insb. Eismächtigkeit und Dauer der Eisbedeckung). Nur die grössten Vereisungen erreichten das Standortgebiet JO, und die Gletscher waren dort am geringmächtigsten. In der letzten Eiszeit war die Eisbedeckung in ZNO mächtiger und grossflächiger als in NL. Ein solches Muster ist auch für künftige Vergletscherungen zu erwarten.
- **Erodierbarkeit der Gesteinssäule über dem Opalinuston:** Grössere Mächtigkeiten von erosionsresistenteren Gesteinen (insb. Malmkalke, Hauptrogenstein und «Herrenwis-Einheit») über dem Lager erhöhen die Robustheit eines Standorts gegenüber Erosion, v.a. in Bezug auf künftigen tiefgründigen Gletscherschurf. Schwerer zu erodierende Gesteinsschichten befinden sich auch in grösseren Tiefen von NL und ZNO, weshalb künftiger Gletscherschurf in diesen Gesteinen vermutlich weniger tief ausfallen wird als in heute beobachteten, leichter zu erodierenden Sedimentgesteinen.
- **Tiefe des Lagers:** Eine grössere Lagertiefe erhöht die Robustheit eines Standorts gegenüber künftiger Erosion (Flusseinschneidung, Abtragung der lokalen Topographie und glaziale Tiefenerosion).

Kennzahlen und Bewertung: Die systematische Beurteilung der Auswirkungen der zukünftigen Erosion auf die Restüberdeckung mithilfe hybrid-probabilistischer Modellrechnungen (Kap. 3 in Nagra 2024f) erlaubt folgende Schlussfolgerungen.

Für die HAA-Lager sind die berechneten Restüberdeckungen der Lagerebenen nach 1 Mio. Jahren in Fig. 4-4 für ausgewählte Punkte und unter Annahme verschiedener Entwässerungsszenarien dargestellt. Unter Annahme der langfristig erwarteten Prozesse im heutigen Entwässerungsszenario beträgt die Bandbreite der berechneten Restüberdeckung der Lagerebene nach 1 Mio. Jahren (P5-Werte) rund 140 – 285 m (JO), 395 – 575 m (NL) und 370 – 610 m (ZNO) (Kap. 4 in Nagra 2024f). Die Verhältnisse zum langfristigen Erhalt der als sicher für das Selbstabdichtungsvermögen des Opalinustons eingestuften Restüberdeckung von 200 m sind also in NL und ZNO überall vorhanden. JO weist diesbezüglich lokale Einschränkungen auf.

Der Indikator «Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte» wird im Kriterium 2.2 für die langfristig erwarteten Prozesse im heutigen Entwässerungsszenario für das HAA-Lager in NL und ZNO entsprechend mit *sehr günstig* bewertet. JO wird wohlwollend mit *günstig* bewertet. Diese Bewertung gilt für den grössten Teil der Platzreserven (d. h. überall dort, wo die Restüberdeckung der Lagerebene zwischen 200 – 250 m liegt), sie fällt also zugunsten von JO aus. Die Bandbreiten der berechneten Restüberdeckungen in NL und ZNO werden als gleichwertig betrachtet und die Rangfolge der EG wie folgt eingestuft: NL und ZNO stehen auf Rang 1, JO auf Rang 3.

In Kriterium 3.3 werden mit demselben Indikator pessimistische Entwässerungsszenarien bewertet. Für JO werden dazu alternative Entwässerungsszenarien betrachtet, die sich an der lokalen Topographie orientieren und Durchbruchsrinnen zulassen, während für NL und ZNO ein hypothetischer Flussverlauf direkt über der Lagerebene angenommen wird. In diesen ergänzenden Modellrechnungen sind die standortspezifischen Unterschiede bei der Restüberdeckung der Lagerebene nach 1 Mio. Jahren akzentuierter. Die Bandbreite der berechneten Restüberdeckung des Lagerfelds nach 1 Mio. Jahren (P5-Werte) beträgt rund 125 – 275 m (JO), 340 – 435 m (NL) und 220 – 365 m (ZNO) (Kap. 4 in Nagra 2024f).

Die Bewertung ist auch in Kriterium 3.3 *sehr günstig* für das HAA-Lager in NL und ZNO, resp. *günstig* für JO, da die Restüberdeckung der Lagerebenen in JO auch in dieser Situation im überwiegenden Teil der Platzreserven zwischen 200 – 250 m liegt. Auch diese Bewertung fällt zugunsten von JO aus. Die Bandbreiten der berechneten Restüberdeckungen unterscheiden sich jedoch stärker, weshalb die Rangfolge der EG wie folgt eingestuft wird: NL steht auf Rang 1, ZNO auf Rang 2, JO auf Rang 3.

Aufgrund des kürzeren Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren für das SMA-Lager sind die Auswirkungen der Erosion auf die Restüberdeckung der Lagerebene in allen Standortgebieten und für alle Entwässerungsszenarien klein (Kap. 4 in Nagra 2024f). Damit bleibt die Barrierewirkung bis zum Ende des Betrachtungszeitraums vollständig erhalten. Entsprechend wird der Indikator «Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte» für alle Standortgebiete mit *sehr günstig* bewertet (für Kriterium 2.2 und 3.3) und die Standortgebiete für SMA werden als gleichrangig eingestuft.

Fazit zum Indikator in Kriterium 2.2: Alle Standortgebiete bieten langfristig Schutz vor Erosion. Die erwarteten Verhältnisse sind günstig für das HAA-Lagerprojekt in JO sowie sehr günstig für die HAA-Lagerprojekte in NL und ZNO sowie für die SMA-Lagerprojekte in allen Standortgebieten.

Fazit zum Indikator in Kriterium 3.3: Die Restüberdeckung ist auch unter Berücksichtigung alternativer oder hypothetischer Entwässerungsszenarien in NL und ZNO sehr günstig und in JO günstig. In NL sind die Sicherheitsmargen am grössten.

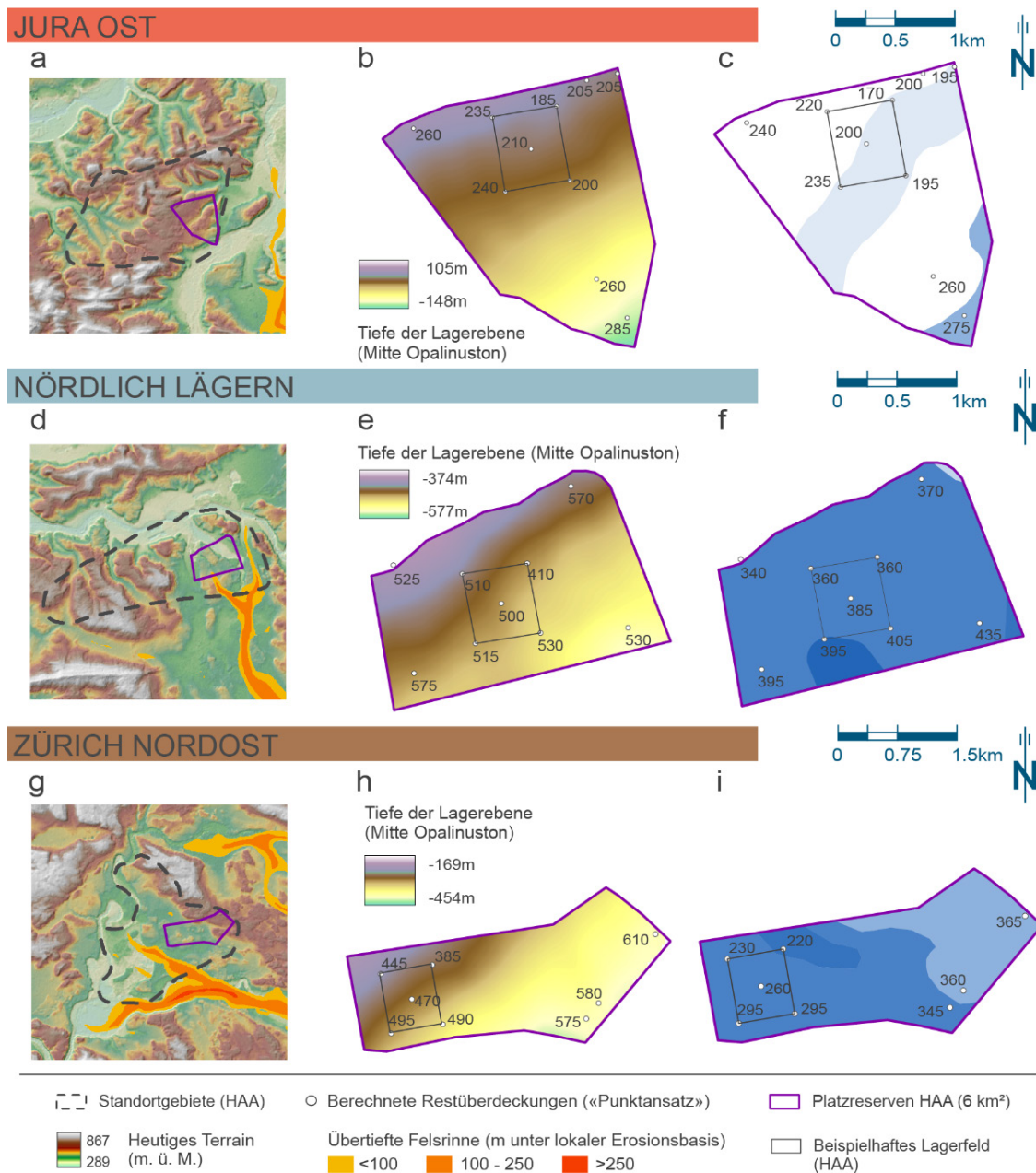


Fig. 4-4: Karten mit berechneten Restüberdeckungen nach 1 Mio. Jahren für verschiedene Erosionsszenarien in den Standortgebieten JO, NL und ZNO

Figur basierend auf Fig. 4-3 in Nagra (2024f). Figuren links: Karten mit heutigem Terrain, übertieften Felsrinnen und Platzreserven für HAA; Figuren Mitte und rechts: berechnete Restüberdeckungen der Lagerebene für ausgewählte Punkte innerhalb der Platzreserven HAA für das erwartete Entwässerungsszenario (Kr 2.2, Mitte) und für alternative und hypothetische Entwässerungsszenarien (Kr 3.3, rechts). Die aufgeführten Werte entsprechen den P5-Werten der Restüberdeckung (in m) für die ausgewählten Punkte innerhalb der Platzreserven HAA («Punktansatz» gemäss Kap. 4.1.3 in Nagra 2024f).

Betrachtungen mit dem «Flächenansatz» gemäss Kap. 4.1.1 und 4.1.2 in Nagra (2024f) ergeben innerhalb der Lagerfelder zudem folgende P5-Werte für die Restüberdeckung: 140 m (JO), 395 m (NL), 370 m (ZNO) für Kr 2.2; 125 m (JO), 350 m (NL), 220 m (ZNO) für Kr 3.3.

4.2.2.2 Zusammenstellung der Bewertungen

Tab. 4-6: Kennzahlen und Daten zu den Indikatoren für die qualitative Bewertung und das Ranking der EG HAA und SMA für die Kriterien 2.2 «Erosion» und 3.3 «Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen»

Die Tabelle zeigt die Bandbreite der berechneten Restüberdeckungen für das erwartete Entwässerungsszenario (Auswertung mittels Punkt- und Flächenansatz); diese dienen als Grundlage für die Bewertung in Kriterium 2.2. Ebenfalls aufgeführt sind die Daten für alternative und hypothetische (worst case) Entwässerungsszenarien; diese dienen als Grundlage für die Bewertung in Kriterium 3.3. Alle Werte sind auf 5 m gerundet.

Legende Bewertung gem. Nutzwertanalyse: dunkelgrün = sehr günstig, hellgrün = günstig, gelb = bedingt günstig

Legende Rangfolge: Die Zahlen entsprechen den Rängen 1 – 3.

Kennzahl		JO HAA	NL HAA	ZNO HAA	JO SMA	NL SMA	ZNO SMA	Quelle
Indikator «Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte»								
Bandbreite der berechneten P5-Werte für das Lagerfeld sowie für ausgewählte Punkte innerhalb des Bereichs des EG und der Platzreserven: - für erwartetes Entwässerungssznario (2.2)	m (Werte gerundet)	140 – 285	395 – 575	370 – 610	Aufgrund des kürzeren Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren für das SMA-Lager sind die Auswirkungen der Erosion auf die Restüberdeckung der Lagerebene klein.			Kap. 4.1 in Nagra (2024f)
	Bewertung							
	Rangfolge	3	1	1	1	1	1	
Bandbreite der berechneten P5-Werte für das Lagerfeld sowie für ausgewählte Punkte innerhalb des Bereichs des EG und der Platzreserven: - für alternative / hypothetische Entwässerungs szenarien (3.3)	m (Werte gerundet)	125 – 275	340 – 435	220 – 365	Aufgrund des kürzeren Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren für das SMA-Lager sind die Auswirkungen der Erosion auf die Restüberdeckung der Lagerebene klein.			Kap. 4.1 in Nagra (2024f)
	Bewertung und Rangfolge	Siehe Kriterium 3.3						

4.2.3 Lagerbedingte Einflüsse (Kriterium 2.3)

Die technischen Barrieren können so konzipiert werden, dass sie mit der natürlichen Barriere sowie untereinander kompatibel und auf die jeweiligen Abfallsorten optimiert sind. Günstig ist eine Situation, in der die Langzeitstabilität des Barrierensystems gegenüber langfristigen, lagerbedingten Prozessen und Wechselwirkungen bestmöglich gewährleistet ist.

Der Fokus liegt auf den Verhältnissen im Wirtgestein, da die lagerbedingten Einflüsse auf das Nahfeld (stollennahes Gestein) begrenzt sind. Lagerbedingte Einflüsse im EG werden mit den Indikatoren «Länge des Freisetzungspfads im intakten WG (Kap. 4.2.3.1)», «Thermisch bedingte Porenwasser-Überdrücke im WG» (Kap. 4.2.3.2) und «Gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG» (Kap. 4.2.3.3) erfasst. Die Indikatoren und Bewertungsskalen sind im Anhängen A.7 begründet. Nachfolgend werden die Charakterisierung und Bewertung pro Indikator für das Kriterium 2.3 erläutert und in Kap. 4.2.3.4 zusammengefasst.

4.2.3.1 Länge des Freisetzungspfads im intakten WG

Charakterisierung: Beim Bau und Betrieb der Untertagebauten kommt es zur Bildung einer Auflockerungszone im angrenzenden Gestein. Deren Ausdehnung und Eigenschaften sind insbesondere abhängig von der Geometrie der Lagerkammern sowie von den Gebirgsspannungen auf Lagerebene, von den felsmechanischen Eigenschaften des Gesteins und dem Selbstabdichtungsvermögen. Aufgrund des grösseren Durchmessers ist die Ausdehnung der Auflockerungszone im Umfeld der SMA-Lagerkavernen grösser als bei den HAA-Lagerstollen (Kap. 5.1.1 in Nagra 2024i). Bei gleicher Lagerauslegung verbleiben für alle Lagerprojekte auch nach Abzug der Auflockerungszone bezüglich Radionuklid-Rückhaltung günstige Mächtigkeiten an intaktem Wirtgestein.

Kennzahlen und Bewertung: Diese Schlussfolgerung stützt sich auf Analysen des felsmechanischen Systemverhaltens beim Bau der Lagerkammern und auf felsmechanische Experimente (Kap. 5.1.1 in Nagra 2024i). Die berechnete Ausdehnung der Auflockerungszone unter Berücksichtigung der erwarteten Parameterwerte beträgt für HAA-Lagerstollen ca. 0.7 m (JO), ca. 0.9 m (NL) und ca. 0.8 m (ZNO) und für SMA-Lagerkavernen ca. 2.3 m (JO), ca. 2.7 m (NL) und ca. 2.5 m (ZNO) (Kap. 5.1.1 in Nagra 2024i). Für die Beurteilung der Ausdehnung der Auflockerungszone wird die *normierte* Länge des Radionuklid-Transportpfads im intakten Wirtgestein verwendet (95-Perzentilwert der Kennzahl RPL, «reduced path length in the intact host rock», vgl. Anhang A.7.1). Die Kennzahl $RPL_{95\%}$ ist für alle EG und beide Lagertypen <0.7 (Kap. 5.1.1 in Nagra 2024i). Gegenüber den erforderlichen Mindest-Transportpfadlängen verbleiben bei den vorhandenen Mächtigkeiten an Opalinuston von mindestens 100 m somit in allen EG grosse Sicherheitsmargen. Der grössere Wert beim SMA-Lager in ZNO ist auf die Lagererschliessung zurückzuführen. Die Erschliessung der SMA-Lagerkavernen erfolgt in gleicher Tiefe wie die HAA-Lagerstollen. Dadurch ist die Lagerebene nicht optimal im Opalinuston eingebettet (vgl. Kap. 3.2 in Nagra 2024d). Aufgrund der horizontalen Ausrichtung der SMA-Lagerkavernen ist die Länge des Radionuklid-Transportpfads für SMA in ZNO daher kürzer. Dieser Umstand wird bei der Rangfolge bei SMA aber nicht berücksichtigt.

Weitere Betrachtungen: Weiter wird die Auflockerungszone im Zuge der Aufsättigung nach der Verfüllung und Versiegelung der Lagerkammern durch das Selbstabdichtungsvermögen des Opalinustons weitgehend abgedichtet. Deswegen hat die Auflockerungszone längerfristig nur einen geringen Einfluss auf die Barrierewirkung des Wirtgesteins (Kap. 6, 7 und 8 in Nagra 2024j).

Entsprechend wird der Indikator «Länge des Freisetzungspfads im intakten Wirtgestein» für alle EG HAA und SMA mit *sehr günstig* bewertet, ohne Abstufung bei der Rangfolge.

Fazit: Für alle Lagerprojekte verbleiben nach Abzug der Auflockerungszone (EDZ) sehr günstige Transportfadlängen im intakten Wirtgestein.

4.2.3.2 Thermisch bedingte Porenwasser-Überdrücke im WG

Charakterisierung: Die Wärmeproduktion infolge radioaktiven Zerfalls führt anfänglich zu Temperaturerhöhungen insbesondere in den HAA-Lagerstollen und im angrenzenden Gestein und damit auch zu erhöhten Porenwasserdrücken. Die Auswirkungen von thermisch bedingten Porenwasser-Überdrücken im Wirtgestein sind insbesondere abhängig vom Abfallinventar, von den Eigenschaften des Wirtgesteins sowie von der in-situ-Temperatur und den Gebirgsspannungen in Lagertiefe (Kap. 5.1.2 in Nagra 2024i). Es zeigt sich, dass die Lager in allen Standortgebieten so ausgelegt werden können, dass die mechanische Integrität des EG gegenüber thermisch bedingten Porenwasserüberdrücken erhalten bleibt. Als wichtigste Einflussgrösse gilt hier die thermische Einlagerungsdichte, welche mit der Lagerauslegung gesteuert werden kann. Dabei gilt, dass bei gleicher Lagerauslegung die Sicherheitsmargen mit der Tiefe der Lagerebene zunehmen.

Kennzahlen und Bewertung: Diese Schlussfolgerung stützt sich auf Analysen des thermischen Systemverhaltens (Kap. 5.1.2 in Nagra 2024i). Für die Beurteilung erhöhter Porenwasserdrücke im HAA-Lager werden die erwarteten Wärmeproduktionsraten betrachtet. Die berechneten thermischen Porenwasserüberdrücke im Umfeld der HAA-Lagerstollen bleiben für alle Lager im Referenzfall unterhalb des Schwellenwerts, bei dem es zu thermisch bedingten Spannungsrissen im Wirtgestein kommen kann: die Kennzahl FPI beträgt ca. 0.73 (JO), ca. 0.39 (NL) und ca. 0.36 (ZNO) (Kap. 5.1.2 in Nagra 2024i).

Der Indikator «Thermisch bedingte Porenwasser-Überdrücke im WG» wird im Kriterium 2.3 für die erwarteten Verhältnisse für das HAA-Lager in JO mit *günstig*, für NL und ZNO mit *sehr günstig* bewertet und die Rangfolge der EG wird wie folgt eingestuft: Aufgrund der geringen Unterschiede bei der Kennzahl FPI werden NL und ZNO gleichwertig auf Rang 1 eingestuft, JO hingegen auf Rang 3.

Die Prognostizierbarkeit dieser Aussage wird anhand probabilistischer Analysen geprüft und in Kriterium 3.3 mittels desselben Indikators bewertet (Kap. 5.1.2 in Nagra 2024i). In NL und ZNO bleiben die berechneten thermischen Porenwasserüberdrücke im Umfeld der HAA-Lagerstollen auch unter Berücksichtigung der Ungewissheiten hinsichtlich der thermo-hydraulischen Gebirgseigenschaften klar unterhalb des Schwellenwerts, bei dem es zu thermisch bedingten Spannungsrissen im Wirtgestein kommen könnte (FPI ca. 0.45 für NL und ca. 0.40 für ZNO). In JO zeigen sich jedoch die Limiten der aktuellen Lagerauslegung in den vorherrschenden geologischen Verhältnissen, die berechneten thermischen Porenwasserüberdrücke kommen über dem Schwellenwert zu liegen (FPI > 1.2 für JO).

Die Bewertung *sehr günstig* für das HAA-Lager in NL und ZNO kann mittels ungünstiger thermo-hydraulischer Parameterwerte im Kriterium 3.3 bestätigt werden. Die Bewertung von JO akzentuiert sich jedoch auf *bedingt günstig*. Die Rangfolge der EG ist gleich wie im Kriterium 2.3.

Im SMA-Lager sind die Wärmeproduktionsraten erheblich geringer als im HAA-Lager. Deshalb treten im SMA-Lager nur geringfügig erhöhte Temperaturen auf und thermisch bedingte Spannungsrisse im Umfeld der SMA-Lagerkavernen können ausgeschlossen werden. Entsprechend wird der Indikator «Thermisch bedingte Porenwasser-Überdrücke im WG» für das SMA-Lager in allen Standortgebieten mit *sehr günstig* bewertet (für Kriterium 2.2 und 3.3), ohne Abstufung bei der Rangfolge.

Weitere Betrachtungen: Weiter werden allfällige thermische Spannungsrisse nach dem Abklingen der Temperaturen (einige Hundert bis ca. Tausend Jahre nach Lagerverschluss) durch das Selbstabdichtungsvermögen des Opalinustons weitgehend abgedichtet, sodass die Barrierewirkung langfristig erhalten bleibt (Kap. 6, 7 und 8 in Nagra 2024j).

Fazit zum Indikator in Kriterium 2.3: Die Sicherheitsmargen gegenüber erwarteten temperaturbedingten Überdrücken sind bei gleicher Lagerauslegung für die EG HAA in NL und ZNO sehr günstig, in JO günstig und für alle EG SMA sehr günstig.

Fazit zum Indikator in Kriterium 3.3: Die Sicherheitsmargen gegenüber temperaturbedingten Überdrücken unter pessimistischen Annahmen sind bei gleicher Lagerauslegung für die EG HAA in NL und ZNO sehr günstig, in JO bedingt günstig und für alle EG SMA sehr günstig.

4.2.3.3 Gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG

Charakterisierung: Im HAA- und SMA-Lager sind die Gasbildungsrate infolge der anaeroben Korrosion von Metallen über einen längeren Zeitraum erhöht und führen ggf. zu gasbedingten Überdrücken in den Lagerkammern und im Wirtgestein. Die Auswirkungen erhöhter Gasdrücke sind insbesondere abhängig vom Abfallinventar, von den Eigenschaften des Wirtgesteins sowie vom hydrostatischen Porenwasserdruck und von den Gebirgsspannungen in Lagertiefe (Kap. 5.1.3 in Nagra 2024i). Es zeigt sich, dass die Lager in allen Standortgebieten so ausgelegt werden können, dass die mechanische Integrität des EG gegenüber gasbedingter Porenwasserüberdrücke erhalten bleibt. Wichtige Einflussgrößen sind die Gasbildungsrate, das Gastransport- und Gasspeichervermögen der technischen und natürlichen Barrieren sowie die Möglichkeiten für bauliche Massnahmen zur Speicherung und Verteilung der im Lager produzierten Gase entlang der Lagerfeldzugänge und Zugangsbauwerke. Dabei gilt, dass bei gleicher Lagerauslegung die Sicherheitsmargen mit der Tiefe der Lagerebene zunehmen.

Kennzahlen und Bewertung: Diese Schlussfolgerung stützt sich auf Analysen des Systemverhaltens unter dem Einfluss einer andauernden Gasbildung und auf Felslaborexperimente (Kap. 5.1.3 in Nagra 2024i). Für die Beurteilung erhöhter Porenwasserdrücke im HAA-Lager werden die erwarteten Gasbildungsrate betrachtet. Die berechneten gasbedingten Porenwasserüberdrücke im Umfeld der HAA-Lagerstollen bleiben für alle Lager im Referenzfall unterhalb des Schwellenwerts, bei dem es zu gasbedingten Spannungsrisen im Wirtgestein kommen kann: die Kennzahl FPI beträgt ca. 0.77 (JO), ca. 0.36 (NL) und ca. 0.33 (ZNO) (Kap. 5.1.3 in Nagra 2024i).

Der Indikator «Gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG» wird im Kriterium 2.3 für die erwarteten Verhältnisse für das HAA-Lager in JO mit *günstig*, für NL und ZNO mit *sehr günstig* bewertet und die Rangfolge der EG wird wie folgt eingestuft: Aufgrund der geringen Unterschiede bei der Kennzahl FPI werden NL und ZNO gleichwertig auf Rang 1 eingestuft, JO hingegen auf Rang 3.

Die Prognostizierbarkeit dieser Aussage wird anhand probabilistischer Analysen geprüft und in Kriterium 3.3 mittels desselben Indikators bewertet (Kap. 5.1.3 in Nagra 2024i). In NL und ZNO bleiben die berechneten gasbedingten Porenwasserüberdrücke im Umfeld der HAA-Lagerstollen auch unter Berücksichtigung der Ungewissheiten hinsichtlich der Gebirgseigenschaften klar unterhalb des Schwellenwerts, bei dem es zu gasbedingten Spannungsrisen im Wirtgestein kommen könnte (FPI beträgt ca. 0.40 für NL und ca. 0.35 für ZNO). In JO zeigen sich jedoch die Limiten der aktuellen Lagerauslegung in den vorherrschenden geologischen Verhältnissen, die berechneten gasbedingten Porenwasserüberdrücke kommen über dem Schwellenwert zu liegen (FPI > 1.2 für JO).

Die Bewertung *sehr günstig* für das HAA-Lager in NL und ZNO kann mittels ungünstiger felsmechanischer Parameterwerte im Kriterium 3.3 bestätigt werden. Die Bewertung von JO akzentuiert sich jedoch auf *bedingt günstig*. Die Rangfolge der EG ist gleich wie im Kriterium 2.3.

Für ein SMA-Lager ergibt sich ein analoges Bild. Für die erwarteten Verhältnisse wird ein FPI knapp <0.7 (JO) und deutlich <0.7 (NL/ZNO) berechnet, alle EG SMA im Kriterium 2.3 mit *sehr günstig* bewertet und die Rangfolge wie folgt eingestuft: NL und ZNO stehen gleichwertig auf Rang 1, JO auf Rang 3. Unter ungünstigen Bedingungen akzentuiert sich jedoch der Unterschied zwischen NL (FPI deutlich <0.7) und den beiden anderen Standortgebieten. In JO kommen die berechneten gasbedingten Porenwasserüberdrücke über dem Schwellenwert zu liegen (FPI > 1.2), in ZNO im Bereich des Schwellenwertes (FPI ~ 1).

Entsprechend wird im Kriterium 3.3 der Indikator «Gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG» für SMA in NL mit *sehr günstig* bewertet, in ZNO (knapp, aber zu dessen Gunsten) mit *günstig* und in JO mit *bedingt günstig* und die Rangfolge der EG wird wie folgt eingestuft: NL steht auf Rang 1, ZNO auf Rang 2 und JO auf Rang 3.

Weitere Betrachtungen: Es ist zu erwarten, dass allfällig gebildete Gaspfade nach dem Abklingen der Gasüberdrücke durch das Selbstabdichtungsvermögen des Opalinustons weitgehend abgedichtet werden, sodass die Barrierewirkung langfristig erhalten bleibt (Kap. 6, 7 und 8 in Nagra 2024j).

Fazit zum Indikator in Kriterium 2.3: Die Sicherheitsmargen gegenüber erwarteten gasbedingten Überdrücken sind bei gleicher Lagerauslegung für die EG HAA in NL und ZNO sehr günstig, in JO günstig und für alle EG SMA sehr günstig.

Fazit zum Indikator in Kriterium 3.3: Die Sicherheitsmargen gegenüber gasbedingten Überdrücken unter pessimistischen Annahmen sind bei gleicher Lagerauslegung in NL sehr günstig, in ZNO günstig (SMA) oder sehr günstig (HAA) und in JO bedingt günstig.

4.2.3.4 Zusammenstellung der Bewertungen

Tab. 4-7: Kennzahlen und Daten zu den Indikatoren für die qualitative Bewertung und das Ranking der EG HAA und SMA für die Kriterien 2.3 «Lagerbedingte Einflüsse» und 3.3 «Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen»

Die Tabelle zeigt die Ergebnisse für erwartete Parameterwerte; diese dienen als Grundlage für die Bewertung in Kriterium 2.3. Ebenfalls aufgeführt sind die Daten für pessimistische Parameterwerte; diese dienen als Grundlage für die Bewertung in Kriterium 3.3.

Legende Bewertung gem. Nutzwertanalyse: dunkelgrün = sehr günstig, hellgrün = günstig, gelb = bedingt günstig

Legende Rangfolge: Die Zahlen entsprechen den Rängen 1 – 3.

Kennzahl		JO HAA	NL HAA	ZNO HAA	JO SMA	NL SMA	ZNO SMA	Quelle
Indikator «Länge des Freisetzungspfads im intakten Wirtgestein»								
RPL _{95%} (normierte Länge des RN- Transportpfads im intakten Wirtgestein)	-	0.60	0.65	0.65	0.45	0.45	0.60	Kap. 5.1.1 in Nagra (2024i)
	Bewertung							
	Rangfolge	1	1	1	1	1	1	
Indikator «Thermisch bedingte Porenwasser-Überdrücke im WG»								
FPI (Failure potential for intact host rock) für erwartete Parameterwerte	-	0.73	0.39	0.36	-	-	-	Kap. 5.1.2 in Nagra (2024i)
	Bewertung							
	Rangfolge	3	1	1	1	1	1	
FPI _{95%} (Failure potential for intact host rock) für pessimistische Parameterwerte	-	>1.2	0.45	0.40	-	-	-	Kap. 5.1.2 in Nagra (2024i)
	Bewertung und Rangfolge	Siehe Kriterium 3.3						
Indikator «Gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG»								
FPI (Failure potential for intact host rock) für erwartete Parameterwerte	-	0.77	0.36	0.33	0.66	0.33	0.48	Kap. 5.1.3 in Nagra (2024i)
	Bewertung							
	Rangfolge	3	1	1	3	1	1	
FPI _{95%} (Failure potential for intact host rock) für pessimistische Parameterwerte	-	>1.2	0.40	0.35	>1.2	0.40	~1	Kap. 5.1.3 in Nagra (2024i)
	Bewertung und Rangfolge	Siehe Kriterium 3.3						

4.2.4 Nutzungskonflikte (Kriterium 2.4)

Günstig ist, wenn aus heutiger Sicht keine natürlichen Ressourcen, deren Nutzung die Barrierewirkung des EG signifikant beeinträchtigen würde, in einem für die Schweiz besonderen Masse innerhalb der potenziellen Lagerzone vorkommen.

Nutzungskonflikte werden mit den Indikatoren «Rohstoffvorkommen innerhalb/oberhalb/unterhalb des WG» (Kap. 4.2.4.1), «Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds» (Kap. 4.2.4.2) und «Mineral- und Thermalwassernutzungen» (Kap. 4.2.4.3) erfasst. Die Indikatoren und Bewertungsskalen sind im Anhang A.8 begründet. Nachfolgend werden die Charakterisierung und Bewertung pro Indikator für das Kriterium 2.4 erläutert und in Kap. 4.2.4.4 zusammengefasst.

4.2.4.1 Rohstoffvorkommen

Die Einschätzung der Rohstoffvorkommen innerhalb der potenziellen Lagerzonen entspricht auch nach Abschluss der erdwissenschaftlichen Untersuchungen in Etappe 3 im Wesentlichen derjenigen aus Etappe 2 (Nagra 2014a). Nachfolgend werden die Vorkommen innerhalb, oberhalb und unterhalb des WG anhand ihrer heutigen wirtschaftlichen Nutzungswürdigkeit und im Vergleich zu gesamtschweizerischen Vorkommen eingeschätzt und bewertet.

Rohstoffvorkommen innerhalb des WG

Charakterisierung: Der Opalinuston wird als Ziegelei-Rohstoff in verschiedenen Tongruben abgebaut. Diese Nutzung dürfte auch in Zukunft auf die Erdoberfläche beschränkt bleiben (Kap. 3.3.1 in Nagra 2014b), sodass im tiefen Untergrund aus heutiger Sicht kein wirtschaftlich nutzbare Potenzial innerhalb des WG besteht.

Bewertung: Der Indikator «Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins» wird daher in allen Standortgebieten und für beide Lagertypen mit *sehr günstig* bewertet, ohne Abstufung bei der Rangfolge.

Fazit: Die Situationen hinsichtlich Rohstoffvorkommen im Wirtgestein sind sehr günstig. Für Opalinuston im tiefen Untergrund besteht in der Schweiz aus heutiger Sicht kein Nutzungspotenzial.

Rohstoffvorkommen oberhalb des WG

Charakterisierung: Das Rohstoffpotenzial oberhalb des Wirtgesteins wird bestimmt durch die mögliche Nutzung von Steinen und Erden und kann grundsätzlich Steinbrüche und Materialgewinnung für die Zement- bzw. Ziegelei-Industrie sowie für Natursteine bzw. Hartschotter umfassen (Kap. 2.3 in Nagra 2014a). Im Grossraum der Standortgebiete liegt der Schwerpunkt einer möglichen Nutzung auf dem Abbau von Kalk und Mergel (insb. aus der Wildegg-Formation) für die Zementindustrie. Oberhalb der potenziellen Lagerzonen in NL und ZNO sind die entsprechenden Schichten nicht in oberflächennaher Lage vorhanden und eignen sich deshalb nicht für einen wirtschaftlichen Abbau. In JO liegt die Wildegg-Formation oberhalb der potenziellen Lagerzonen in geeigneter oberflächennaher Lage und Mächtigkeit vor für eine wirtschaftliche Nutzung aus heutiger Sicht (vgl. Steinbruch Gabenchopf in Villigen AG und Abbauvorhaben Homberg in Bözberg AG, welches 2014 aufgegeben wurde). Das Rohstoffvorkommen weist aber kein für die Schweiz besonderes Mass auf, es gibt ausserhalb des Standortgebiets zahlreiche andere nutzungswürdige Vorkommen in ähnlicher oberflächennaher Lage und Mächtigkeit.

Bewertung: Der Indikator «Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins» wird daher in JO für beide Lagertypen mit *günstig* und in NL/ZNO mit *sehr günstig* bewertet. Entsprechend wird die Rangfolge der Standortgebiete wie folgt eingestuft: NL und ZNO sind gleichwertig und stehen auf Rang 1, JO auf Rang 3.

Fazit: Die Situationen hinsichtlich Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgestein sind sehr günstig, respektive günstig in JO. Dort besteht ein aus heutiger Sicht mögliches Nutzungspotenzial für die Zementindustrie, allerdings in keinem für die Schweiz besonderen Masse.

Rohstoffvorkommen unterhalb des WG

Charakterisierung: Die Beurteilung der Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins wird durch das Nutzungspotenzial von Kohlenwasserstoff- und Salzvorkommen bestimmt (Kap. 2 in 2014a). Kohlevorkommen sowie vereinzelte Erzvorkommen (Eisenooolithe, Bohnerz) sind aus heutiger Sicht in der Schweiz nicht wirtschaftlich nutzungswürdig.

- **Kohlenwasserstoff-Ressourcen:** In der Nordschweiz bestehen fossile Lagerstätten im Permokarbondrog mit teilweiser Überlappung von mehreren Ressourcentypen (Kap. 2.1 in Nagra 2014a). Im Gegensatz zu den potenziellen Lagerzonen in JO und NL ist in ZNO kein solches Potenzial bekannt, da dort kein Permokarbondrog auftritt. Es existiert keine aktive Förderung von Kohlenwasserstoffen in der Schweiz. Aus heutiger Sicht sind allfällige Kohlenwasserstoff-Ressourcen in allen potenziellen Lagerzonen nicht wirtschaftlich nutzungswürdig.
- **Salzvorkommen:** Salzvorkommen bestehen in allen Standortgebieten. Die Salzschieben liegen in den potenziellen Lagerzonen jedoch meist in grosser Tiefenlage (>400 m unter Terrain (Kap. 2.2 in Nagra 2014a)) und weisen eine geringe Mächtigkeit auf (Kap. 2.2 in Nagra 2014a; und Fig. 4-2 in 2024h), sodass sie aus heutiger Sicht nicht wirtschaftlich nutzungswürdig sind.

Bewertung: Der Indikator «Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins» wird für alle potenziellen Lagerzonen als *sehr günstig* beurteilt. Da in ZNO keine Kohlenwasserstoff-Ressourcen bekannt sind, steht ZNO auf Rang 1; JO und NL stehen gleichwertig auf Rang 2.

Fazit: Die Situationen hinsichtlich Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins sind *sehr günstig*. Für allfällige Kohlenwasserstoff-Ressourcen in JO und NL besteht aus heutiger Sicht kein Nutzungspotenzial, in ZNO sind keine solchen Vorkommen bekannt.

4.2.4.2 Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen

Charakterisierung: Die Beurteilung der Geothermie und weiterer energiebezogener Nutzungen wird bestimmt durch das Nutzungspotenzial von geothermischen Ressourcen und für die Speicherung von CO₂ und Erdgas im tiefen Untergrund. Die Annahmen aus Etappe 2 zu den entsprechenden Ressourcen (Kap. 4 und 5 in Nagra 2014a) konnten, soweit sie in der Etappe 3 untersucht wurden, bestätigt werden.

- **Geothermie:** Ein geothermisches Nutzungspotenzial besteht aus heutiger Sicht generell im Untergrund und so auch in allen potenziellen Lagerzonen. Es ist abhängig von der Nutzungsart (hydrothermale und petrothermale Geothermie), von den geologischen Zielstrukturen und Zieltiefe sowie der verwendeten Technologie (Art der Stimulation) ab (Kap. 4 in Nagra 2014a). Geothermische Ressourcen liegen jedoch in keiner potenziellen Lagerzone in einem für die Schweiz besonderen Masse vor.

Es liegen in den Standortgebieten zurzeit keine direkten Nutzungskonflikte zwischen bestehenden oder aktuell geplanten geothermischen Anlagen und einem Tiefenlager vor. Den als mögliche Zielgebiete tiefer hydrothormaler Anlagen geltenden Randstörungen und dem Randbereich des Nordschweizer Permokarbondrogs wurde bei der Abgrenzung der potenziellen Lagerzonen ausgewichen (Kap. 3.1 in Nagra 2024d).

- **Erdgasspeicherung im tiefen Untergrund:** Für Speichervorhaben kommen Porenspeicher, wie erschöpfte Erdöl-/Erdgaslagerstätten oder sedimentäre Aquifere, und Salzkavernenspeicher in Frage. Oberflächennahe Felskavernen-, Röhren- oder LNG-Speicher beeinträchtigen die Barrierewirkung nicht und stellen somit keinen Nutzungskonflikt mit der geologischen Tiefenlagerung dar (Kap. 5.1 in Nagra 2014a). Aufgrund der bisherigen Speicherforschungsarbeiten konnten im weiteren Umfeld der Standortgebiete keine geeigneten Formationen für die Grossspeicherung von Erdgas lokalisiert werden.
- **CO₂-Speicherung im tiefen Untergrund:** Das grösste Potenzial für die CO₂-Speicherung in der Schweiz haben tiefgelegene Aquifere mit quasi-stagnierenden salinen Grundwässern, welche von sehr gering durchlässigen Formationen überlagert sind (Kap. 5.2 in Nagra 2014a). Dieses Potenzial ist in allen potenziellen Lagerzonen vergleichbar. Das Bundesamt für Landestopografie (swisstopo) plant derzeit einen wissenschaftlichen Pilotversuch zur CO₂-Einspeisung in der Tiefbohrung Trüllikon-1-1. Eine wirtschaftliche Nutzung ist bis heute weder ausreichend erforscht noch nachgewiesen.

Bewertung: Der Indikator «Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen» wird in allen Standortgebieten insgesamt mit *günstig* bewertet, ohne Abstufung bei der Rangfolge.

Fazit: Die Situationen hinsichtlich geothermischer Nutzung und weiterer energiebezogener Nutzungen sind in allen Standortgebieten günstig. Nutzungspotenziale in den potenziellen Lagerzonen weisen kein für die Schweiz besonderes Mass auf.

4.2.4.3 Mineral- und Thermalwassernutzungen

Charakterisierung: Die wichtigsten bestehenden Mineralquellen und Thermen im Grossraum der Standortgebiete wurden bereits in Kap. 3.2 in Nagra (2014a) identifiziert. Eine wirtschaftliche Erschliessung von Mineral- und Thermalwasser mittels Tiefbohrungen ist aus heutiger Sicht für Vorkommen in beschränkter Tiefenlage in allen potenziellen Lagerzonen denkbar (analog wie bei Mineralquellen Eglisau). Mineral- und Thermalwasser kommt jedoch in keiner potenziellen Lagerzone in einem für die Schweiz besonderen Masse vor. Zudem existieren in keinem Standortgebiet bedeutsame Mineral- und Thermalwassernutzungen. Es sind auch keine relevanten hydraulischen Verbindungen zu Quellen im weiteren Umfeld der Standortgebiete oder Beeinträchtigungen von überregional bedeutenden Wasservorkommen vorhanden.

Bewertung: Der Indikator «Mineral- und Thermalwassernutzungen» wird in allen Standortgebieten insgesamt mit *günstig* bewertet, ohne Abstufung bei der Rangfolge.

Fazit: Alle potenziellen Lagerzonen liegen in günstigen Situationen hinsichtlich Mineral- oder Thermalwassernutzungen.

4.2.4.4 Zusammenstellung der Bewertungen

Tab. 4-8: Qualitative Merkmale und Daten zu den Indikatoren für die qualitative Bewertung und das Ranking der EG HAA und SMA für das Kriterium 2.4 «Nutzungskonflikte»

Legende Bewertung gem. Nutzwertanalyse: dunkelgrün = sehr günstig, hellgrün = günstig, gelb = bedingt günstig

Legende Rangfolge: Die Zahlen entsprechen den Rängen 1 – 3.

Qualitatives Merkmal		JO HAA	NL HAA	ZNO HAA	JO SMA	NL SMA	ZNO SMA	Quelle
Indikator «Rohstoffvorkommen oberhalb des WG»								
Rohstoff- vorkommen oberhalb WG in potenzieller Lagerzone	Vorhan- den?	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Kap. 2 in Nagra (2014a)
	Heute nutzungs- würdig?	Ja	-	-	Ja	-	-	
	In einem für die CH besonderen Masse?	Nein	-	-	Nein	-	-	
	Bewertung							
	Rangfolge	3	1	1	3	1	1	
Indikator «Rohstoffvorkommen innerhalb des WG»								
Rohstoff- vorkommen innerhalb WG in potenzieller Lagerzone	Vorhan- den?	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Kap. 3.3.1 in Nagra (2014b)
	Bewertung							
	Rangfolge	1	1	1	1	1	1	
Indikator «Rohstoffvorkommen unterhalb des WG»								
Rohstoff- vorkommen unterhalb WG in potenzieller Lagerzone	Vorhan- den?	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Kap. 2 in Nagra (2014a) und Fig. 4- 2 in Nagra (2024h)
	Nutzungs- würdig?	Nein	Nein	-	Nein	Nein	-	
	Bewertung							
	Rangfolge	2	2	1	2	2	1	

Qualitatives Merkmal		JO HAA	NL HAA	ZNO HAA	JO SMA	NL SMA	ZNO SMA	Quelle
Indikator «Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds»								
Ressourcen für Geothermie, CO ₂ - und Erdgas-speicherung in potenzieller Lagerzone	Vorhanden?	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Kap. 4 und 5 in Nagra (2014a)
	Heute nutzungs-würdig?	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	
	In einem für die CH besonderen Masse?	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	
	Bewertung							
	Rangfolge	1	1	1	1	1	1	
Indikator «Mineral- und Thermalwassernutzungen»								
Ressourcen für Mineral- und Thermalwas-sernutzungen in potenzieller Lagerzone	Vorhanden?	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Kap. 3 in Nagra (2014a)
	Heute nutzungs-würdig?	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	
	In einem für die CH besonderen Masse?	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	
	Bewertung							
	Rangfolge	1	1	1	1	1	1	

4.3 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (Kriteriengruppe 3)

Mit der Kriteriengruppe 3 werden die Auswirkungen der verbleibenden, mit erdwissenschaftlichen Untersuchungen zum jetzigen Projektstand nicht weiter reduzierbaren Ungewissheiten auf die Barrierewirkung bewertet. Es sind dies die Charakterisierbarkeit der Gesteine (Kap. 4.3.1), die Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (Kap. 4.3.2) und die Prognostizierbarkeit von Langzeitveränderungen (Kap. 4.3.3).

4.3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine (Kriterium 3.1)

Aus Sicht der Langzeitsicherheit ist es vorteilhaft, wenn die sicherheitstechnischen Eigenschaften des EG eine möglichst geringe Variabilität aufweisen und ohne übermässig destruktive Untersuchungen ermittelt werden können.

Dies ist in allen drei Standortgebieten der Fall. In allen EG konnten die für die Rückhaltewirkung relevanten Eigenschaften erhoben werden. Die Auswirkungen der verbleibenden, mit erdwissenschaftlichen Untersuchungen nicht weiter reduzierbaren Ungewissheiten bzgl. der transportrelevanten Gesteinseigenschaften im EG werden mit den zwei Indikatoren «Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften im Opalinuston» (Kap. 4.3.1.1) und «Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften in den Rahmengesteinen» (Kap. 4.3.1.2) erfasst. Die Indikatoren und Bewertungsskalen sind im Anhang A.9 begründet. Nachfolgend werden die Charakterisierung und Bewertung pro Indikator für das Kriterium 3.1 erläutert und in Kap. 4.3.1.3 zusammengefasst.

4.3.1.1 Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften im Opalinuston

Charakterisierung: Der Opalinuston weist aufgrund seiner Entstehungsgeschichte in allen Standortgebieten einen ähnlichen Aufbau und ähnliche geologische Eigenschaften auf. Er wurde sehr gleichförmig und in kurzer Zeit abgelagert, weshalb die räumliche Korrelierbarkeit ausgezeichnet ist (Kap. 4.2.6 und 5.2.3 in Nagra 2024h). Der Opalinuston zeichnet sich in allen Standortgebieten durch seine hervorragenden Barriereigenschaften aus. Er weist einen hohen Tonmineralgehalt (Kap. 5.2 in Nagra 2024h) und eine äusserst geringe hydraulische Durchlässigkeit auf (Kap. 5.6 in Nagra 2024h), weshalb der Radionuklidtransport diffusionsdominiert erfolgt (Kap. 5.9 in Nagra 2024h). Die verbleibenden Ungewissheiten bzgl. Mineralogie und Porenwasserchemie sind gering (Kap. 5.2 und 5.4 in Nagra 2024h). Die Bandbreiten der gemessenen hydraulischen Durchlässigkeiten (Kap. 5.6 in Nagra 2024h) und effektiven Diffusionskoeffizienten (Kap. 5.8 in Nagra 2024h) sind vergleichsweise gering und gut bekannt. Der Einfluss der Variabilität der Transporteigenschaften des Opalinustons auf die Barrierewirkung der EG ist für alle Standortgebiete vernachlässigbar.

Kennzahlen und Bewertung: Diese Schlussfolgerung stützt sich auf probabilistische Modellrechnungen zum Stofftransport für einen konservativen Tracer (Kap. 5.2.1 in Nagra 2024i). Die Ergebnisse dieser Modellrechnungen zeigen, dass die Variabilität der Transporteigenschaften des Opalinustons praktisch keinen Einfluss auf die Tracer-Freisetzung aus dem EG HAA hat (Kennzahl $\text{NTF}_{95\%} < 0.001$). Die NTF-Werte für die EG SMA fallen deutlich kleiner aus als für die EG HAA, weshalb hier auf eine detaillierte Analyse verzichtet wird.

Entsprechend wird der Indikator «Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften im Opalinuston» für alle EG HAA und SMA mit *sehr günstig* bewertet, ohne Abstufung bei der Rangfolge.

Fazit: Die Barrierewirkung des EG ist auch unter Berücksichtigung der räumlichen Variabilität der Transporteigenschaften des Opalinustons in allen Standortgebieten sehr günstig.

4.3.1.2 Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften in den Rahmengesteinen

Charakterisierung: Die lithostratigraphischen Sequenzen insbesondere oberhalb des Opalinustons sind in den drei Standortgebieten unterschiedlich. Gemeinsam ist ihnen, dass tonmineralreiche Abfolgen dominieren, welche teilweise sandig-kalkigere Intervalle enthalten. Auch die Karbonatplattform «Herrenwis-Einheit» in Nördlich Lägern ist in tonmineralreiche Einheiten eingebettet (Kap. 4.2.7 in Nagra 2024h). Die geologische Formation direkt unterhalb des Opalinustons besteht in allen Standortgebieten aus tonmineralreichen, gut korrelierbaren marinen Sedimenten (Kap. 4.2.5 und 5.2.3 in Nagra 2024h). Die transportrelevanten Eigenschaften der Rahmengesteine können auf der Grundlage der beobachteten Tonmineralgehalte gut eingegrenzt werden. Insgesamt weisen die Rahmengesteine geringe bis sehr geringe hydraulische Durchlässigkeiten auf (Kap. 4.5.3 in Nagra 2024h), und auch die effektiven Diffusionskoeffizienten sind gut bekannt (Kap. 5.8 in Nagra 2024h). Die Barrierewirkung lässt sich für alle EG auch unter Berücksichtigung der variablen Eigenschaften der Rahmengesteine zuverlässig nachweisen.

Kennzahlen und Bewertung: Diese Schlussfolgerung stützt sich auf probabilistische Modellrechnungen zum Stofftransport für einen konservativen Tracer (Kap. 5.2.1 in Nagra 2024i). Die Ergebnisse dieser Modellrechnungen zeigen, dass sich die verbleibenden Ungewissheiten bzgl. der Transporteigenschaften in den Rahmengesteinen vergleichbar gering auf die Barrierewirkung aller EG HAA auswirken ($\text{NTF}_{95\%} < 0.001$). Die NTF-Werte für die EG SMA fallen deutlich kleiner aus als für die EG HAA, weshalb hier auf eine detaillierte Analyse verzichtet wird.

Entsprechend wird der Indikator «Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften in den Rahmengesteinen» für alle EG HAA und SMA mit *sehr günstig* bewertet, ohne Abstufung bei der Rangfolge.

Fazit: Die Barrierewirkung des EG wird durch die Rahmengesteine auch unter Berücksichtigung ihrer variablen Eigenschaften in allen Standortgebieten verstärkt.

4.3.1.3 Zusammenstellung der Bewertungen

Tab. 4-9: Kennzahlen und Daten zu den Indikatoren für die qualitative Bewertung und das Ranking der EG HAA und SMA für das Kriterium 3.1 «Charakterisierbarkeit der Gesteine»

Legende Bewertung gem. Nutzwertanalyse: dunkelgrün = sehr günstig, hellgrün = günstig, gelb = bedingt günstig

Legende Rangfolge: Die Zahlen entsprechen den Rängen 1 – 3.

Kennzahl		JO HAA	NL HAA	ZNO HAA	JO SMA	NL SMA	ZNO SMA	Quelle
Indikator «Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften im Opalinuston»								
Stofffracht- austrag aus dem EG (Kennzahl NTF _{95%})	-	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	Kap. 5.2.1 in Nagra (2024i)
	Bewertung							
	Rangfolge	1	1	1	1	1	1	
Indikator «Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften in den Rahmengesteinen»								
Stofffracht- austrag aus dem EG (Kennzahl NTF _{95%})	-	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	Kap. 5.2.1 in Nagra (2024i)
	Bewertung							
	Rangfolge	1	1	1	1	1	1	

4.3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (Kriterium 3.2)

Günstig sind einfache und von der Oberfläche aus gut explorierbare räumliche geologische Verhältnisse.

Dies ist in allen drei Standortgebieten der Fall. Die für den Vergleich notwendigen erdwissenschaftlichen Untersuchungen in Etappe 3 konnten in allen angestrebten Gebieten durchgeführt werden und die Daten weisen generell eine hohe Qualität auf. Es wurde ein vertiefter und vergleichbarer Kenntnisstand in allen Standortgebieten erreicht und die verbleibenden Ungewissheiten konnten gegenüber Etappe 2 stark reduziert werden (Kap. 7.1 in Nagra 2024h).

In allen potenziellen Lagerzonen konnte die geologisch-tektonische Komplexität gut charakterisiert und die räumlichen geologischen Verhältnisse zum Zweck des sicherheitstechnischen Vergleichs zuverlässig erfasst werden (Anhang A.10): Die verbleibenden Ungewissheiten zur Tiefenlage und Mächtigkeit der Gesteinsschichten im EG (Kap. 5.1 in Nagra 2024e) haben keinen signifikanten Einfluss auf die in der qualitativen Bewertung gezogenen Fazits. Auch die in der

qualitativen Bewertung gezogenen Fazits zu tektonischen Elementen sind robust gegenüber verbleibenden Ungewissheiten bei deren Kartierung (Kap. 5.3 in (Nagra 2024a), (Nagra 2024b), (Nagra 2024c)).

Mittels Indikator erfasst werden die Auswirkungen von konzeptuellen Ungewissheiten zur räumlichen Konstanz der lithologischen Beschaffenheit der Aquifere (Kap. 4.5.3 in Nagra 2024h) auf die EG-Abgrenzung. Der Indikator «Auswirkungen der Ungewissheiten zu den EG-begrenzenden Aquiferen» wird nachfolgend erläutert. Der Indikator und die Bewertungsskala sind im Anhang A.10 begründet.

4.3.2.1 Auswirkungen der Ungewissheiten zu den EG-begrenzenden Aquiferen

Charakterisierung: Die regionalen Aquifere im Malm resp. Hauptrogenstein und Muschelkalk sind in allen potenziellen Lagerzonen eindeutig charakterisiert (Kap. 4.5.3 in Nagra 2024h). Die Barrierewirksamkeit der dazwischenliegenden Schichten wurde geprüft und in Kr 3.1 verglichen (vgl. Kap. 4.3.1).

Ungewissheiten mit Relevanz für die Abgrenzung des EG verbleiben bezüglich der räumlichen Konstanz der lithologischen Beschaffenheit des in der Klettgau-Formation auftretenden Keuper-Aquifers. Der Keuper-Aquifer begrenzt den EG in allen 3 Standortgebieten im Liegenden. Der Aufbau des in der Klettgau-Formation auftretenden Keuper-Aquifers ist komplex und variiert zwischen den Standortgebieten (Kap. 4.5.3.10 in Nagra 2024h). In ZNO und JO ergeben sich aus allen Tiefbohrungen Hinweise auf Fliesspfade in der Klettgau-Formation. In NL dagegen nicht, dort treten solche vereinzelt im Zusammenhang mit lokalen sandigen Ablagerungen auf. Wo in NL keine sandigen Rinnenablagerungen vorhanden sind, fällt die Mächtigkeit des EG deshalb noch deutlich grösser aus, nämlich rund 400 m bis zum Muschelkalk-Aquifer (Kap. 3.3 und Enclosure 3-9b und 3-10 in Nagra 2024g und Kap. 4.9 in Nagra 2024h). In dieser Situation fällt auch der Transportpfad für Radionuklide zur unteren Begrenzung des EG erheblich länger aus. Modellrechnungen zur Tracer-Freisetzung zeigen, dass die Rückhaltewirkung dadurch erheblich verstärkt wird (Kap. 5.2.2 in Nagra 2024i). Diese konzeptuelle Ungewissheit ist vor allem für das HAA-Lager in NL relevant; für das SMA-Lager in NL wird sie aufgrund der weniger strengen Anforderungen an den EG als nicht relevant betrachtet.

Kennzahlen und Bewertung: In NL beträgt die gemittelte Mächtigkeit des nach unten erweiterten EG in den Platzreserven für HAA rund 400 m. Durch zusätzliche untere Rahmengesteine mit einer (zusätzlichen) Mächtigkeit von rund 80 m wird die Rückhaltewirkung im Falle des HAA-Lagers verstärkt (vgl. Ergebnisse von Modellrechnungen zur Tracer-Freisetzung für HAA in (Kap. 5.2.2 in Nagra 2024i)). In JO und ZNO gibt es keine vergleichbaren konzeptuellen Ungewissheiten bzgl. der unteren Begrenzung der EG; in beiden Standortgebieten ist der begrenzende Aquifer der Keuper-Aquifer (Kap. 4.9 in Nagra 2024h). Die gemittelten Mächtigkeiten betragen deshalb in JO und ZNO unverändert rund 225 m und 280 m (vgl. Kr 1.1).

Entsprechend wird der Indikator «Auswirkungen der Ungewissheiten zu den EG-begrenzenden Aquiferen» für alle EG HAA mit *sehr günstig* bewertet (wie in Kr 1.1). Die Rangfolge der EG HAA fällt im Vergleich zu Kr 1.1 noch akzentuierter aus: NL steht noch klarer auf Rang 1, ZNO und JO auf Rang 2. Aufgrund der weniger strengen Anforderungen für SMA wird dieser Indikator in Kr 3.2 als *sehr günstig* und mit gleichem Rang bewertet.

Fazit: Die sehr günstige Barrierewirkung ist in allen drei Standortgebieten auch unter Berücksichtigung der Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse gegeben. In NL besteht die Chance auf zusätzliche barrierewirksame untere Rahmengesteine.

4.3.2.2 Zusammenstellung der Bewertungen

Tab. 4-10: Kennzahlen und Daten zu den Indikatoren für die qualitative Bewertung und das Ranking der EG HAA für das Kriterium 3.2 «Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse»

Legende Bewertung gem. Nutzwertanalyse: dunkelgrün = sehr günstig, hellgrün = günstig, gelb = bedingt günstig

Legende Rangfolge: Die Zahlen entsprechen den Rängen 1 – 3.

Kennzahl		JO HAA	NL HAA	ZNO HAA	JO SMA	NL SMA	ZNO SMA	Quelle
Indikator «Auswirkungen der Ungewissheiten zu den EG-begrenzenden Aquiferen»								
Mächtigkeit EG mit potenziell zusätzlichen uRG	m (Werte gerundet)	- (225, wie bei Kr 1.1)	400	- (280, wie bei Kr 1.1)	Anforderungen für SMA weniger streng (Bewertung von HAA übernommen, alle Standortgebiete SMA als gleichrangig eingestuft)			Basierend auf Kap. 3.3 und Enclosure 3-9a bis 3-9c und 3-10 in Nagra (2024g)
	Bewertung							
	Rangfolge	2	1	2	1	1	1	

4.3.3 Prognostizierbarkeit von Langzeitveränderungen (Kriterium 3.3)

Günstig ist, wenn die sicherheitsrelevanten Eigenschaften und die Geometrie des EG über die erforderlichen Zeiträume genügend zuverlässig prognostizierbar sind.

Dies ist für alle Standortgebiete der Fall. Wirt- und Rahmengesteine bieten in allen EG ein stabiles und vorhersehbares Umfeld für die Aufnahme des Tiefenlagers (Kap. 6.6.1 in Nagra 2024h): Der Einfluss vieler Entwicklungen auf die Barrierewirkung bleibt über den Betrachtungszeitraum auch unter Berücksichtigung der Prognostizierbarkeit klein (vgl. Anhang A.11; und Kap. 6.6.1 in Nagra 2024h).

Standortspezifisch überprüft werden im Kriterium 3.3 die Auswirkungen der verbleibenden, mit erdwissenschaftlichen Untersuchungen nicht weiter reduzierbaren Ungewissheiten zu geologischen Langzeitenwicklungen resp. Gesteinseigenschaften auf die, in den Kriterien 2.2 resp. 2.3 formulierten Bewertungen zu Erosion und Lagerbedingter Einflüsse.

Die Indikatoren und Bewertungsskalen sind im Anhang A.11 begründet. Die Charakterisierung und Bewertung der Bewertungsobjekte sind im Kontext der Kriterien 2.2 und 2.3 festgehalten (vgl. nachfolgende Verweise zum Kap. 4.2). Nachfolgend werden die dort ausgearbeiteten Fazits, Bewertungen und Rangfolgen zum Kriterium 3.3. zusammengefasst.

Fazit zum Indikator «Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte» für das Kriterium 3.3 (siehe Kap. 4.2.2.1): Die Restüberdeckung nach 1 Mio. Jahren für HAA ist auch unter Berücksichtigung alternativer oder hypothetischer Entwässerungsszenarien in NL und ZNO *sehr günstig* und in JO *günstig*. In NL sind die Sicherheitsmargen für HAA am grössten. Aufgrund des kürzeren Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren sind die Auswirkungen der Erosion für alle EG SMA gering (*sehr günstig*).

Fazit zum Indikator «Thermisch bedingte Porenwasser-Überdrücke im WG» für das Kriterium 3.3 (siehe Kap. 4.2.3.2): Die Sicherheitsmargen gegenüber temperaturbedingten Überdrücken unter pessimistischen Annahmen zu Gesteinseigenschaften sind bei gleicher Lagerauslegung für die EG HAA in NL und ZNO *sehr günstig*, in JO *bedingt günstig* und für alle EG SMA *sehr günstig*.

Fazit zum Indikator «Gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG» für das Kriterium 3.3 (siehe Kap. 4.2.3.3). Die Sicherheitsmargen gegenüber gasbedingten Überdrücken unter pessimistischen Annahmen zu Gesteinseigenschaften sind bei gleicher Lagerauslegung in NL *sehr günstig*, in ZNO *günstig* (SMA) oder *sehr günstig* (HAA) und in JO *bedingt günstig*.

Tab. 4-11: Kennzahlen und Daten zu den Indikatoren für die qualitative Bewertung und das Ranking der EG HAA und SMA für das Kriterium 3.3 «Prognostizierbarkeit von Langzeitveränderungen»

Legende Bewertung gem. Nutzwertanalyse: dunkelgrün = sehr günstig, hellgrün = günstig, gelb = bedingt günstig

Legende Rangfolge: Die Zahlen entsprechen den Rängen 1 – 3.

Kennzahlen		JO HAA	NL HAA	ZNO HAA	JO SMA	NL SMA	ZNO SMA	Quelle
Indikator «Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte»								
Bandbreite der berechneten P5-Werte für das Lagerfeld sowie für ausgewählte Punkte innerhalb des Bereichs des EG und der Platzreserven für alternative/hypothetische Entwässerungsszenarien	m (Werte gerundet)	125 – 275	340 – 435	220 – 365	Aufgrund des kürzeren Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren für das SMA-Lager sind die Auswirkungen der Erosion auf die Restüberdeckung der Lagerebene klein.			Kap. 4.1 in Nagra (2024f)
	Bewertung							
	Rangfolge	3	1	2	1	1	1	
Indikator «Thermisch bedingte Porenwasser-Überdrücke im WG»								
FPI _{95%} (Failure potential for intact host rock)	-	>1.2	0.45	0.40	-	-	-	Kap. 5.1.2 in Nagra (2024i)
	Bewertung							
	Rangfolge	3	1	1	1	1	1	
Indikator «Gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG»								
FPI _{95%} (Failure potential for intact host rock)	-	>1.2	0.40	0.35	>1.2	0.40	~1	Kap. 5.1.3 in Nagra (2024i)
	Bewertung							
	Rangfolge	3	1	1	3	1	2	

4.4 Bautechnische Eignung (Kriteriengruppe 4)

Die integrale Bewertung der bautechnischen Eignung basiert auf ingenieurgeologischen Baugrundbeurteilungen des bautechnischen Dossiers und wird für beide Kriterien 4.1 und 4.2 mit dem Indikator «Nachweis der bautechnischen Machbarkeit der Lagerprojekte» erfasst. Der Indikator und die Bewertungsskala sind im Anhang A.12 begründet. Nachfolgend werden die Charakterisierung und Bewertung erläutert und in Kap. 4.4.2 zusammengefasst.

4.4.1 Nachweis der bautechnischen Machbarkeit der Lagerprojekte

Charakterisierung: Die Beurteilungen zeigen, dass die wichtigsten Gefährdungsbilder für alle Standortgebiete vergleichbar sind. Die Standorte unterscheiden sich aus bautechnischer Sicht im Wesentlichen durch die Tiefenlage und die Erschliessung der Lagerebene. Im Bautechnischen Dossier wurde beispielhaft dargelegt, wie die Lagerprojekte entsprechend den Anforderungen realisiert und dass die Restrisiken mit geeigneten Massnahmen auf ein akzeptiertes Mass reduziert werden können (Kap. 5.3 in Band 9 in Nagra 2023). Die aktuell in Betracht gezogenen bautechnischen Massnahmen sind im Untertagebau bekannt und erprobt. In allen drei Standortgebieten liegen somit bautechnisch beherrschbare Verhältnisse vor (Kap. 6 in Band 9 in Nagra 2023).

Lagerprojekte und wichtige Aspekte der Baugrundbeurteilung

Zugangsbauwerke zur Lagerebene (Kr 4.2): Die Zugangsbauwerke der beispielhaften Lagerprojekte sind in der Regel Schächte (Kap. 6 und 8 in Band 6 in Nagra 2023). Als Ausnahme gilt JO, wo neben einem Lüftungsschacht noch ein (Betriebs)-Zugangstunnel betrachtet wird. Dieser wird grösstenteils im Opalinuston erstellt (Kap. 6.2 und 8.1 in Band 6 in Nagra 2023). Die Schächte durchörtern in allen Standortgebieten verkarstungsfähige Gesteinseinheiten. Die in Etappe 3 durchgeführten erdwissenschaftlichen Untersuchungen haben jedoch keine Hinweise auf wasserführende Karsthohlräume ergeben. Im Standortgebiet JO wurden in den vom Schacht durchörterten Gesteinseinheiten keine Hinweise auf eine Verkarstung des Gebirges beobachtet (Kap. 7 in Band 2 in Nagra 2023). Bei den in den Standortgebieten NL und ZNO beobachteten, mit hydraulisch dichten Sedimenten verfüllten Karsthohlräumen handelt es sich ausschliesslich um Phänomene einer Paläo-Verkarstung (Kap. 7 in Band 3 und 4 in Nagra 2023). Das Auftreten von wasserführenden Karsthohlräumen wird in diesen Standortgebieten deshalb nicht erwartet, kann aber nicht vollständig ausgeschlossen werden (Kap. 3.3.2 in Band 6 in Nagra 2023). Es bestehen bewährte Möglichkeiten zur Hohlräumdetektion. Ausserdem stehen bautechnische Möglichkeiten zur Beherrschung allfälliger Karstwasserzutritte während der Bau- und der Betriebsphase zur Verfügung (Kap. 6 in Nagra 2022). Aufgrund der unterschiedlichen geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse in den das Wirtgestein überlagernden Gesteinseinheiten werden für NL/ZNO resp. JO unterschiedliche Sicherungsmittel und Bauhilfsmassnahmen für den Schachtbau in Betracht gezogen. Damit lassen sich in allen Standortgebieten sichere Zugänge erstellen (Kap. 6 in Nagra 2022).

Bauwerke auf Lagerebene (Kr 4.1): Sämtliche Bauwerke auf Lagerebene liegen vollumfänglich in geringdurchlässigem Opalinuston. Je nach Standort variieren die Tiefenlagen der Lagerfelder zwischen rund 400 – 900 m unter Terrain. In grossen Tiefenlagen (höhere Spannungen) nehmen sowohl die Festigkeit als auch die Steifigkeit grundsätzlich zu (Kap. 5.5 in Nagra 2024h). Umgekehrt können höhere Spannungen auch zu grösseren Gebirgsschädigungen und Konvergenzen im Tunnelhohlraum führen (Kap. 3.3.2 in Band 6 in Nagra 2023). Entsprechend können diese Effekte in den Standortgebieten aufgrund unterschiedlicher Überlagerung (mit entsprechenden Spannungen) zu unterschiedlichem Gebirgsverhalten führen. Aufgrund der im Vergleich zum Überlagerungsdruck geringen Festigkeit ist im Opalinuston in allen Standort-

gebieten mit druckhaftem Gebirge¹ zu rechnen. Die geplanten Vortriebsmethoden für die Bauwerke auf Lagerebene sind an allen Standorten gleich. Aufgrund der unterschiedlichen Tiefenlagen ergeben sich je nach Standort unterschiedliche Schalenstärken der Verkleidung bei sonst gleichen Normalprofilen (Kap. 5.3.1 in Band 6 in Nagra 2023). Die Bedeutung der Tiefenlage für die Ausprägung der Auflockerungszone wird im Kriterium 2.3 beurteilt (vgl. Kap. 4.2.3).

An allen Standorten kann ein geologisches Tiefenlager mit bekannten und im Untertagebau erprobten Massnahmen auf die *erwarteten Baugrundverhältnisse* ausgelegt werden. Die Dokumentation der beispielhaften Lagerprojekte liefert den Nachweis dazu (Band 6 in Nagra 2023).

Bautechnische Risikoanalyse

Auch die bautechnischen Risiken, die sich durch (von den Erwartungen) *abweichende Gebirgsverhältnisse* ergeben, können in allen Standortgebieten mit bekannten und im Untertagebau erprobten Massnahmen auf ein akzeptiertes Mass reduziert werden (Kap. 6 in Band 9 in Nagra 2023).

Die Verteilung der initialen Risikowerte für das HAA-Einzellager ist für die Standorte NL und ZNO identisch und weicht nur geringfügig von der Verteilung für den Standort JO ab (Kap. 5.2.1 in Band 9 in Nagra 2023). Dieser Unterschied ist u. a. auf eine erhöhte Eintretenswahrscheinlichkeit der Gefährdungen «Verklemmen des Schildes» und «unzulässige Verformungen und Versagen des Ausbaus» (in beiden Fällen wegen druckhaftem Gebirge) bei NL und ZNO zurückzuführen. Diese sind durch die grössere Tiefenlage der Lagerebene an diesen Standorten begründet. In allen Standorten lassen sich jedoch geeignete Massnahmen zur Abminderung der Risiken umsetzen (Kap. 5.3 in Band 9 in Nagra 2023), sodass die resultierende Verteilung der Restrisiken für das HAA-Einzellager für alle Standorte identisch ist. Die Restrisikowerte für ein HAA-Einzellager befinden sich an allen Standorten im akzeptierten Bereich (Kap. 5.2.1 in Band 9 in Nagra 2023).

Eine analoge Bewertung erfolgt für die SMA-Einzellager an den Standorten JO und ZNO sowie für das Kombilager am Standort NL. Auch für SMA ist die resultierende Verteilung der Restrisiken für alle Standorte identisch. Die Restrisikowerte für SMA-Einzellager in JO und ZNO sowie für das Kombilager in NL befinden sich im akzeptierten Bereich (Kap. 5.2.2 in Band 9 in Nagra 2023).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich die initialen Risikowerte zwar zwischen den Standorten unterscheiden, die Restrisikowerte jedoch lagertyp- und standortübergreifend nach der Massnahmenplanung vollständig im akzeptierten Bereich liegen. Dies gilt sowohl für das Kriterium 4.1 als auch für das Kriterium 4.2. Die vorgesehenen Massnahmen zur Reduktion der Risiken auf akzeptierte Werte sind im Untertagebau bekannt und erprobt (Kap. 6 in Band 9 in Nagra 2023).

Fazit: Der Nachweis der bautechnischen Machbarkeit für HAA und SMA gilt deshalb aus Sicht der Nagra an allen Standorten sowohl für die erwarteten als auch für abweichende Verhältnisse als erbracht und robust (Tab. 4-12). Die bautechnische Eignung wird deshalb für alle Standortgebiete und Lagertypen in beiden Kriterien 4.1 und 4.2 mit *günstig* bewertet, und alle EG aufgrund der identischen Restrisikoprofile gleichwertig auf Rang 1 eingestuft. Unterschiede in der Ausprägung der Massnahmen werden nicht bewertet (keine Bewertung von Kosten).

¹ Druckhafte Gebirge haben die Tendenz, Hohlräume durch Konvergenz zu schliessen.

4.4.2 Zusammenstellung der Bewertungen

Tab. 4-12: Kennzahlen, qualitative Merkmale und Daten zu den Indikatoren für die qualitative Bewertung und das Ranking der EG HAA und SMA für die Kriterien 4.1 «Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen» und 4.2 «Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung»

Legende Bewertung gem. Nutzwertanalyse: dunkelgrün = sehr günstig, hellgrün = günstig, gelb = bedingt günstig

Legende Rangfolge: Die Zahlen entsprechen den Rängen 1 – 3.

Kennzahl		JO HAA	NL HAA	ZNO HAA	JO SMA	NL SMA	ZNO SMA	Quelle
Kriterium 4.1: Indikator «Nachweis der bautechnischen Machbarkeit der Lagerprojekte»								
Nachweis der bautechnischen Machbarkeit durch bautechnische Risikoanalyse	-	Nachweis der bautechnischen Machbarkeit für erwartete und für abweichende Verhältnisse an allen Standorten erbracht und robust						Kap. 5 und 6 in Band 9 in Nagra (2023)
	Bewertung							
	Rangfolge	1	1	1	1	1	1	
Kriterium 4.2: Indikator «Nachweis der bautechnischen Machbarkeit der Lagerprojekte»								
Nachweis der bautechnischen Machbarkeit durch bautechnische Risikoanalyse	-	Nachweis der bautechnischen Machbarkeit für erwartete und für abweichende Verhältnisse an allen Standorten erbracht und robust						Kap. 5 und 6 in Band 9 in Nagra (2023)
	Bewertung							
	Rangfolge	1	1	1	1	1	1	

5 Aggregation der Bewertungen und Synthese der Ergebnisse

Dieses Kapitel enthält eine Diskussion und Synthese der Ergebnisse der qualitativen Bewertung der Standortgebiete je für HAA und SMA. Dies umfasst eine tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse und eine Diskussion der aggregierten Ergebnisse für die verwendeten Bewertungsmethoden. Ein Kurzbeschrieb dieser Bewertungsmethoden ist im Anhang C zu finden. Wichtige Grundlagen sind die Bewertungsobjekte je für das HAA- und SMA-Lager (Nagra 2024d) sowie die Charakterisierung und Bewertung der EG in den geologischen Standortgebieten JO, NL und ZNO (Kap. 4).

5.1 Zusammenstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der qualitativen Bewertung der EG in den Standortgebieten für HAA und SMA aus Kap. 4 sind in Tab. 5-1 zusammengestellt (Nutzwertanalyse und Ranking-Methode).

In der Nutzwertanalyse werden sämtliche Indikatoren anhand der Bewertungsskalen aus Anhang A bewertet. Bei der Ranking-Methode werden nur diejenigen Indikatoren rangiert, bei denen sich klare Unterschiede in den zugrundeliegenden, geologischen Daten der EG HAA und SMA zeigen; bei den anderen Indikatoren werden die Standortgebiete als jeweils gleichrangig betrachtet.

Die detaillierte Diskussion der Ergebnisse für die verwendeten Bewertungsmethoden ist Gegenstand von Kap 5.2 bis 5.4. Die Hauptide Ergebnisse werden in Kap. 5.5 zusammenfassend diskutiert.

Tab. 5-1: Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse der Nutzwertanalyse und der Ranking-Methode

Farbcode für die Nutzwertanalyse (Spalten 1 – 6): dunkelgrün – *sehr günstig*, hellgrün – *günstig*, gelb – *bedingt günstig*. Die Zahlen 1 – 3 bezeichnen die Ränge der Standortgebiete pro Lagertyp auf den Stufen der Kriterien und Indikatoren.

Bewertung & Rangfolge						Kriterium / Indikator
HAA			SMA			
JO	NL	ZNO	JO	NL	ZNO	
2	1	3	2	1	3	1.1 Räumliche Ausdehnung
1	1	1	1	1	1	Platzangebot untertag
3	1	2	3	1	2	Mächtigkeit EG
1	1	3	1	1	3	Seismisch kartierte Störungen an Wirtgesteinsgrenzen
3	1	2	3	1	2	1.2 Hydraulische Barrierewirkung
1	1	1	1	1	1	Darcy-Fluss im EG
1	1	1	1	1	1	Tracer-Fluss im EG
3	1	2	3	1	2	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation
1	2	2	1	2	2	1.3 Geochemische Bedingungen
1	1	1	1	1	1	Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Sorptionsvermögen
1	2	2	1	2	2	Salinität im WG
1	1	1	1	1	1	1.4 Freisetzungspfade
1	1	1	1	1	1	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums im WG
1	1	1	1	1	1	Störungstransmissivität im WG
1	1	1	1	1	1	Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Selbstabdichtungsvermögen
2	1	3	2	1	3	2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften
1	1	1	1	1	1	Seismizität
2	1	3	2	1	3	Seismisch kartierte Störungen in kompetenten Formationen
1	1	1	1	1	1	Potenzial für Bildung von Wasserwegsamkeiten durch Lösungsprozesse - oberhalb WG (im EG)
1	1	1	1	1	1	im WG
1	1	1	1	1	1	unterhalb WG (im EG)
3	1	1	1	1	1	2.2 Erosion
3	1	1	1	1	1	Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte
3	1	1	3	1	1	2.3 Lagerbedingte Einflüsse
1	1	1	1	1	1	Länge des Freisetzungspfads im intakten WG
3	1	1	1	1	1	Thermisch bedingte Porenwasser-Überdrücke im WG
3	1	1	3	1	1	Gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG
3	2	1	3	2	1	2.4 Nutzungskonflikte
3	1	1	3	1	1	Rohstoffpotenzial oberhalb WG
1	1	1	1	1	1	Rohstoffpotenzial innerhalb WG
2	2	1	2	2	1	Rohstoffpotenzial unterhalb WG
1	1	1	1	1	1	Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds
1	1	1	1	1	1	Mineral- und Thermalwassernutzungen
1	1	1	1	1	1	3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine
1	1	1	1	1	1	Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften im Opalinuston
1	1	1	1	1	1	Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften in den Rahmengesteinen
2	1	2	1	1	1	3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse
2	1	2	1	1	1	Auswirkungen der Ungewissheiten zu den EG-begrenzenden Aquiferen
3	1	2	3	1	2	3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen
3	1	2	1	1	1	Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte
3	1	1	1	1	1	Thermisch bedingte Porenwasser-Überdrücke im WG
3	1	1	3	1	2	Gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG
1	1	1	1	1	1	4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen
1	1	1	1	1	1	Nachweis der bautechnischen Machbarkeit der Lagerprojekte
1	1	1	1	1	1	4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung
1	1	1	1	1	1	Nachweis der bautechnischen Machbarkeit der Lagerprojekte
26	15	21	23	15	20	Aggregierte Bewertung und Rangpunkte (Summe über Kriterien)
54	35	42	45	35	41	Aggregierte Bewertung und Rangpunkte (Summe über Indikatoren)

5.2 Aggregation der Ergebnisse der Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse liefert in Etappe 3 einen Beitrag zum Nachweis der sicherheitstechnischen Eignung der Standortgebiete je für HAA und SMA anhand der 13 SGT-Kriterien. Damit werden auch die Ergebnisse der Nutzwertanalyse aus Etappe 2 bestätigt.

Die Aggregation der Ergebnisse der Nutzwertanalyse erfolgt auf zwei Arten: Einerseits von der Stufe der Indikatoren auf die Stufe der Kriterien und von dort auf die Stufe Gesamtbewertung, und andererseits von der Stufe der Indikatoren direkt auf die Stufe der Gesamtbewertung (vgl. unterste zwei Zeilen in Tab. 5-1). Diese Aggregationsschritte erfolgen jeweils durch gleichgewichtete arithmetische Mittelung der betreffenden Nutzwerte (Klassenmittelwerte).

Die Ergebnisse der Nutzwertanalyse der EG für das HAA- und SMA-Lager aus Tab. 5-1 sind in Fig. 5-1 auf der Stufe der Kriterien aggregiert dargestellt. Die wichtigsten Ergebnisse sind:

- Bei den folgenden Kriterien ergeben sich keine standortspezifischen Unterschiede in der aggregierten Bewertung: Kriterien 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 3.1, 3.2, 4.1 und 4.2 (HAA und SMA) sowie zusätzlich bei den Kriterien 2.2 und 2.3 (nur SMA).
- Bei allen anderen Kriterien zeigen sich standortspezifische Unterschiede in der aggregierten Bewertung, welche auf die folgenden Indikatoren zurückzuführen sind (vgl. Tab. 5-1):
 - Kriterium 2.1: Indikator «Seismisch kartierte Störungen in kompetenten Formationen» (bei HAA und SMA)
 - Kriterium 2.2: Indikator «Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte» (nur bei HAA)
 - Kriterium 2.3: Indikatoren «Thermisch bedingte Porenwasser-Überdrücke im WG» und «Gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG» (nur bei HAA)
 - Kriterium 2.4: Indikator «Rohstoffpotenzial oberhalb des Wirtgesteins» (bei HAA und SMA)
 - Kriterium 3.3: Indikator «Thermisch bedingte Porenwasser-Überdrücke im WG» (nur bei HAA); Indikator «Gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG» (bei HAA und SMA)
- Auf Stufe Indikator weist HAA NL ausschliesslich *sehr günstige* und *günstige* Bewertungen auf, während HAA ZNO bei einem Indikator und HAA JO bei 2 Indikatoren eine *bedingt günstige* Bewertung verzeichnen.
- Auf Stufe Kriterium weisen HAA NL und HAA ZNO ausschliesslich *sehr günstige* und *günstige* Bewertungen auf, während HAA JO beim Kriterium 3.3 eine *bedingt günstige* Bewertung verzeichnet.
- Beim SMA-Lager sind die Ergebnisse ausgeglichener als beim HAA-Lager: Auf Stufe Indikator ergeben sich nur bei SMA-JO und SMA-ZNO je eine *bedingt günstige* Bewertung, während auf Stufe Kriterium ausschliesslich *sehr günstige* und *günstige* Bewertungen vorliegen.
- Die über alle SGT-Kriterien bzw. über alle Indikatoren aggregierten Nutzwerte (Gesamtbewertung, unterste zwei Zeilen in Tab. 5-1) sind wenig diskriminierend: Alle Bewertungen für NL und ZNO fallen *sehr günstig* aus; die günstigen Bewertungen für HAA-JO und SMA-JO fallen nur ganz knapp nicht in den *sehr günstigen* Bereich.

Fazit: Die Ergebnisse der Nutzwertanalyse sind wenig standortdiskriminierend. Alle Standortgebiete sind für beide Lagertypen gut geeignet; NL und ZNO weisen gegenüber JO sowohl bei HAA als auch bei SMA insgesamt leichte Vorteile auf.

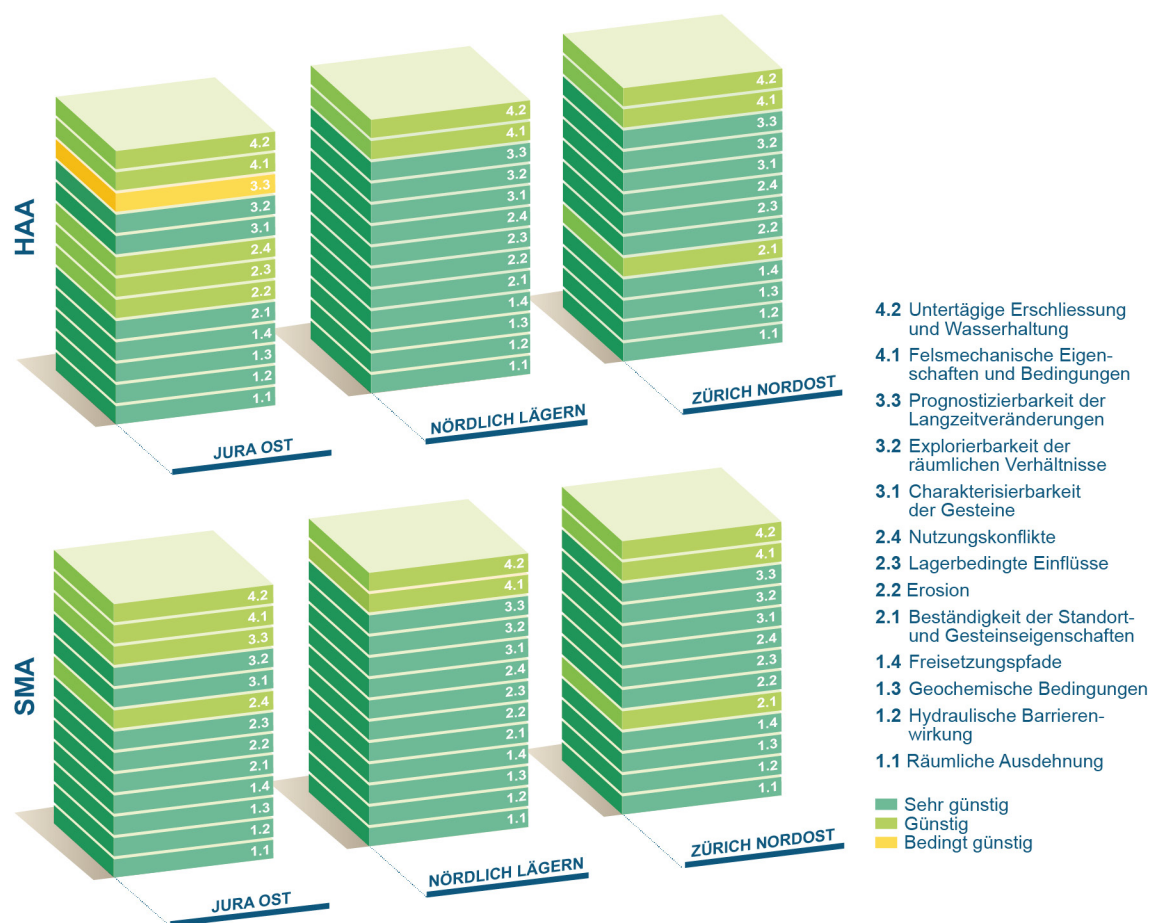


Fig. 5-1: Zusammenfassung der Ergebnisse der Nutzwertanalyse für das HAA- und SMA-Lager in den Standortgebieten JO, NL und ZNO

Aggregierte Auswertung auf Stufe der 13 SGT-Kriterien (d. h. über alle Indikatoren aggregiert, welche den betreffenden Kriterien zugeordnet sind).

5.3 Aggregation der Ergebnisse der Ranking-Methode

Die «Ranking-Methode» dient dem Ziel, eindeutige Vorteile durch systematische Erstellung einer Rangfolge der drei Standortgebiete zu identifizieren (Positivwahl je für HAA und SMA).

Wie bei der Nutzwertanalyse erfolgt die Aggregation der Ergebnisse auf zwei Arten: Einerseits von der Stufe der Indikatoren auf die Stufe der Kriterien und von dort auf die Stufe Gesamtbewertung, und andererseits von der Stufe der Indikatoren direkt auf die Stufe der Gesamtbewertung (vgl. unterste zwei Zeilen in Tab. 5-1). Diese Aggregationsschritte erfolgen jeweils durch Summation der betreffenden Rangpunkte.

Die Ergebnisse der Ranking-Methode für das HAA- und SMA-Lager aus Tab. 5-1 sind in Fig. 5-2 auf der Stufe der 13 SGT-Kriterien aggregiert dargestellt. Die wichtigsten Ergebnisse sind:

- Bei den folgenden Kriterien ergibt sich wegen zu geringer Unterschiede in den standort-spezifischen Daten keine Rangfolge der Standortgebiete: Kriterien 1.4, 3.1, 4.1 und 4.2 (HAA und SMA) sowie zusätzlich bei den Kriterien 2.2 und 3.2 (nur SMA). Bei allen anderen Kriterien ergibt sich eine eindeutige Rangfolge.
- HAA NL erzielt bei 31 Indikatoren Rang 1 und bei 2 Indikatoren Rang 2; daraus ergeben sich bei 11 Kriterien Rang 1 und bei 2 Kriterien Rang 2.
- HAA JO erzielt bei 21 Indikatoren Rang 1, bei 3 Indikatoren Rang 2 und bei 9 Indikatoren Rang 3; daraus ergeben sich bei 5 Kriterien Rang 1, bei 3 Kriterien Rang 2 und bei 5 Kriterien Rang 3.
- HAA ZNO erzielt bei 26 Indikatoren Rang 1, bei 5 Indikatoren Rang 2 und bei 2 Indikatoren Rang 3; daraus ergeben sich bei 7 Kriterien Rang 1, bei 4 Kriterien Rang 2 und bei 2 Kriterien Rang 3.
- Entsprechend klar fallen die über alle Kriterien bzw. über alle Indikatoren summierten Rangpunkte aus (Gesamtbewertung, unterste zwei Zeilen in Tab. 5-1): 15 bzw. 35 Rangpunkte für HAA NL, 26 bzw. 54 Rangpunkte für HAA JO und 21 bzw. 42 Rangpunkte für HAA ZNO.
- Beim SMA-Lager sind die Ergebnisse ähnlich klar wie beim HAA-Lager: SMA NL erzielt sowohl auf Stufe Indikator als auch auf Stufe Kriterium am meisten erste Ränge, während SMA JO und SMA ZNO mehr zweite und dritte Ränge aufweisen.

Fazit: Die Ergebnisse der Ranking-Methode lassen eine klare Rangfolge erkennen. NL liegt in 11 der 13 Kriterien mit der grössten Sicherheitsmarge auf dem ersten Rang. Dabei weist NL in 5 Kriterien für HAA bzw. 4 für SMA klare Vorteile gegenüber beiden anderen Standortgebieten auf. Sowohl bei HAA als auch bei SMA liegt das Standortgebiet NL also klar auf dem ersten Rang.

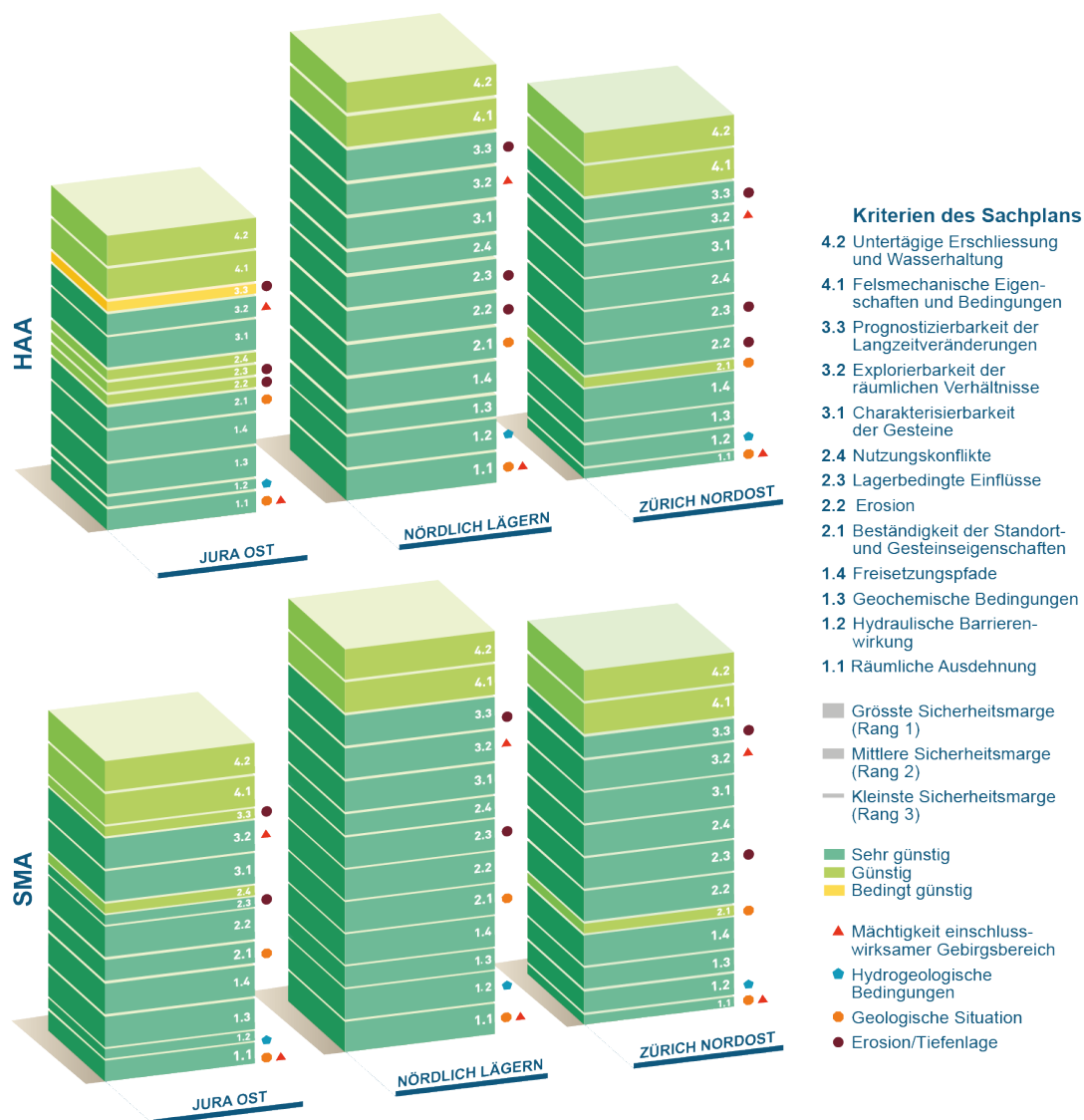


Fig. 5-2: Zusammenfassung der Ergebnisse der «Ranking-Methode» für das HAA- und SMA-Lager in den Standortgebieten JO, NL und ZNO

Aggregierte Auswertung auf Stufe der 13 SGT-Kriterien (d. h. über alle Indikatoren aggregiert, welche den betreffenden Kriterien zugeordnet sind). 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.

5.4 Aggregation der Ergebnisse der Outranking-Methode

Die als Ergänzung zur «Ranking-Methode» verwendete «Outranking-Methode» dient ebenfalls dem Ziel, eindeutige Vorteile durch einen systematischen, paarweisen Vergleich der Standortgebiete zu identifizieren (Positivwahl je für HAA und SMA). Im Unterschied zur «Ranking-Methode» lässt sie keine volle Kompensation zu, d. h., eine schlechte Bewertung bezüglich eines Indikators kann nicht vollständig durch eine gute Bewertung bezüglich eines anderen Indikators kompensiert werden (Geldermann & Schöbel 2011).

Wie bei der Nutzwertanalyse und der «Ranking-Methode» erfolgt die Aggregation der Ergebnisse der Outranking-Methode auf zwei Arten: Einerseits von der Stufe der Indikatoren auf die Stufe der 13 SGT-Kriterien und von dort auf die Stufe Gesamtbewertung, und andererseits von der Stufe der Indikatoren direkt auf die Stufe der Gesamtbewertung. Diese Aggregationsschritte erfolgen jeweils durch Summation der betreffenden Präferenzwerte.

Die Ergebnisse der Outranking-Methode für das HAA- und SMA-Lager sind in Fig. 5-3 zusammengefasst. Die wichtigsten Ergebnisse sind:

- Analog wie bei der «Ranking-Methode» wurde bei den folgenden Kriterien wegen zu geringer Unterschiede in den standortspezifischen Daten keine Outranking-Bewertung der Standortgebiete durchgeführt: Kriterien 1.4, 3.1, 4.1 und 4.2 (HAA und SMA) sowie zusätzlich bei den Kriterien 2.2 und 3.2 (nur SMA). Bei allen anderen Kriterien wurde eine Outranking-Bewertung der Standortgebiete vorgenommen.
- HAA NL zeichnet sich sowohl bzgl. der grössten Anzahl an festgestellten Stärken (= grösster Stärke-Präferenzfluss) als auch bzgl. der geringsten Anzahl Schwächen (= grösster negativer Schwäche-Präferenzfluss) als bestes Standortgebiet aus. Der berechnete Netto-Präferenzfluss beträgt rund 34 % (einstufige Aggregation), d. h., die Stärken überwiegen klar.
- HAA ZNO schneidet klar schlechter ab als HAA NL, und zwar sowohl bzgl. der festgestellten Anzahl an Stärken als auch bzgl. der Anzahl der Schwächen. Der berechnete Netto-Präferenzfluss beträgt rund 10 % (einstufige Aggregation), d. h., Stärken und Schwächen halten sich in etwa die Waage.
- HAA JO schneidet klar schlechter ab als HAA NL und HAA-ZNO, und zwar sowohl bzgl. der geringsten Anzahl an festgestellten Stärken als auch bzgl. der grössten Anzahl an Schwächen. Der berechnete Netto-Präferenzfluss beträgt rund -43 % (einstufige Aggregation), d. h., die Schwächen überwiegen klar.
- Bei SMA sind die Ergebnisse für die einstufige Aggregation ähnlich klar wie bei HAA: SMA NL schneidet klar am besten ab (Netto-Präferenzfluss rund 29 %), vor SMA ZNO (-5 %) und vor SMA JO (-24 %).
- Die Ergebnisse für die zweistufige Aggregation der Präferenzwerte fallen jeweils ähnlich aus wie für die einstufige Aggregation.

Fazit: Die Ergebnisse der Outranking-Methode lassen eine klare Rangfolge erkennen; sowohl bei HAA als auch bei SMA liegt das Standortgebiet NL klar auf dem ersten Rang.

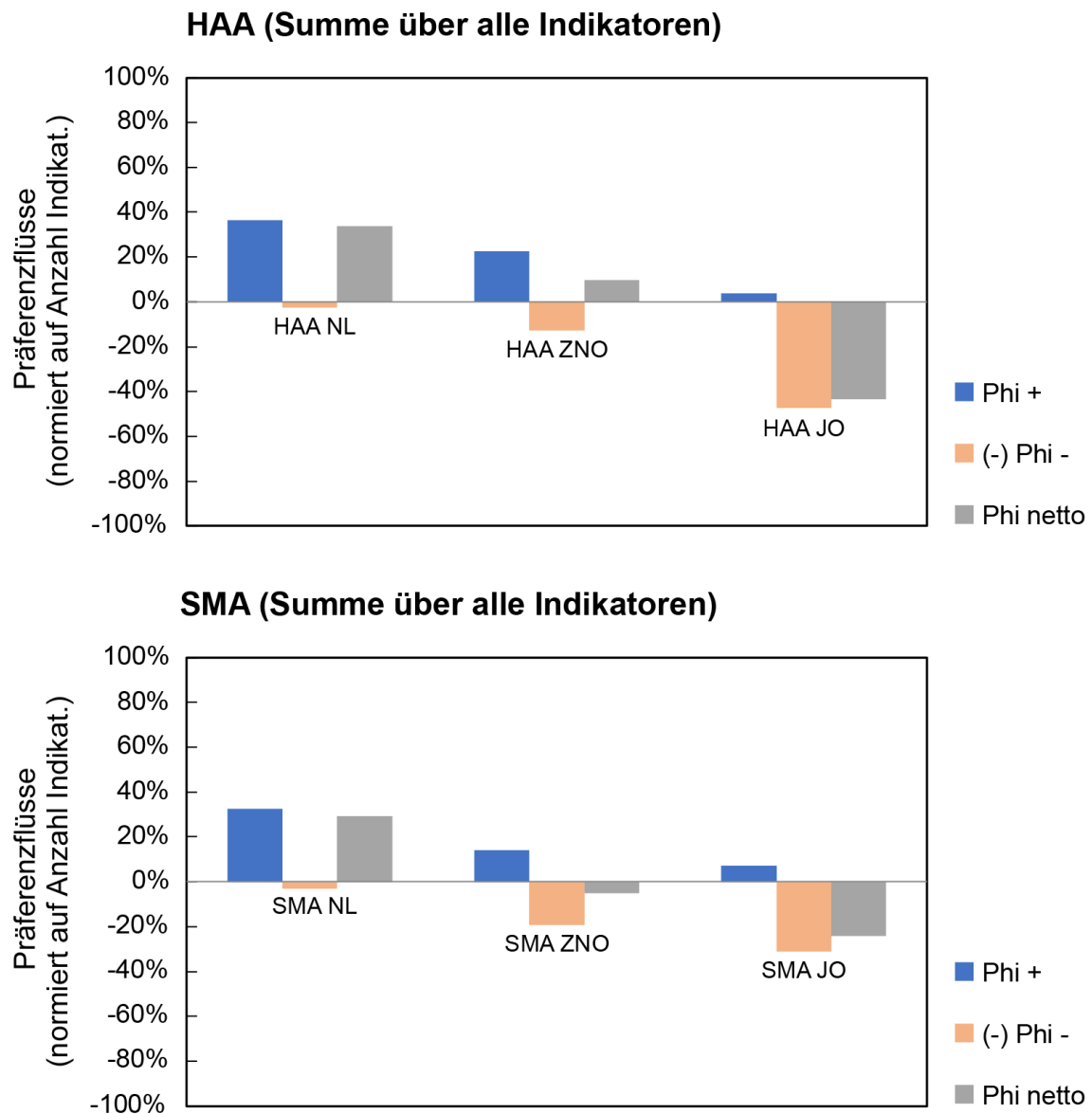


Fig. 5-3: Zusammenfassung der Ergebnisse der «Outranking-Methode» für das HAA- und SMA-Lager in den Standortgebieten JO, NL und ZNO

In der Figur sind die berechneten Stärke-Präferenzflüsse (Φ^+ = Mass für die Stärken eines Standortgebiets), Schwäche-Präferenzflüsse (Φ^- = Mass für die Schwächen eines Standortgebiets; als negative Werte aufgeführt) sowie die Netto-Präferenzflüsse ($\Phi_{\text{netto}} = \Phi^+ \text{ abzgl. } \Phi^-$), jeweils summiert über alle Indikatoren, dargestellt.

5.5 Synthese der Ergebnisse

Die Nutzwertanalyse zeigt, dass alle Standortgebiete für das HAA- und SMA-Lager sicherheitstechnisch geeignet sind. Bei der Beurteilung der sicherheitsrelevanten Aspekte haben sich Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Standortgebieten herauskristallisiert:

- Alle Standortgebiete verfügen über sehr günstige räumliche Verhältnisse, wobei in ZNO an den Wirtgesteinsgrenzen in der potenziellen Lagerzone am meisten Störungen seismisch kartiert sind. Am mächtigsten ist der EG in NL (Kriterium 1.1).
- Alle EG weisen eine sehr günstige hydraulische Barrierewirkung auf. NL weist zudem eine sehr günstige hydrogeologische Situation für eine langfristige Isolation der radioaktiven Abfälle auf (Kriterium 1.2).
- In allen EG sind die geochemischen Bedingungen im Opalinuston günstig bis sehr günstig hinsichtlich des Radionuklid-Rückhaltevermögens (Kriterium 1.3).
- Der Opalinuston beeinflusst das Transportverhalten der Radionuklide in allen EG in sehr günstiger Weise (Kriterium 1.4).
- Alle Standortgebiete weisen tektonisch langfristig stabile Lagerzonen auf. Die Situation hinsichtlich seismisch kartierter Störungen in den Gesteinen ober- und unterhalb der EG ist in NL sehr günstig, in ZNO bedingt günstig (Kriterium 2.1).
- Alle Standortgebiete bieten langfristig Schutz vor Erosion. Die erwarteten Verhältnisse sind günstig für das HAA-Lagerprojekt in JO sowie sehr günstig für die HAA-Lagerprojekte in NL und ZNO sowie für SMA-Lagerprojekte in allen Standortgebieten (Kriterium 2.2).
- In allen Standortgebieten herrschen günstige bis sehr günstige Verhältnisse zur Beherrschung der lagerbedingten Einflüsse. Die Sicherheitsmargen gegenüber erwarteten gasbedingten Überdrücken sind bei gleicher Lagerauslegung in JO am kleinsten (Kriterium 2.3).
- In allen Standortgebieten herrschen hinsichtlich Nutzungskonflikte mit einem gTL günstige bis sehr günstige Verhältnisse, da in den potenziellen Lagerzonen aus heutiger Sicht keine wirtschaftlich nutzungswürdigen Ressourcen in besonderem Masse vorkommen (Kriterium 2.4).
- Die sehr günstige Barrierewirkung ist in allen Standortgebieten auch unter Berücksichtigung der Charakterisierbarkeit der Transporteigenschaften im EG gegeben (Kriterium 3.1).
- Die sehr günstige Barrierewirkung ist in allen drei Standortgebieten auch unter Berücksichtigung der Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse gegeben. In NL besteht die Chance auf zusätzliche barrierewirksame untere Rahmengesteine (Kriterium 3.2).
- Die Barrierewirkung ist in NL und ZNO auch unter Berücksichtigung der Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen günstig bis sehr günstig, wobei in NL die Sicherheitsmargen am grössten sind. In JO sind die Verhältnisse teilweise bedingt günstig (Kriterium 3.3).
- In allen drei Standortgebieten liegen bautechnisch beherrschbare Verhältnisse vor. Die vorgesehenen bautechnischen Massnahmen sind im Untertagebau bekannt und erprobt (Kriterien 4.1 und 4.2).

Zusammenfassend lassen sich folgende vier Eigenschaften hervorheben, welche die Vorteile von NL begründen. Sie sind ausschlaggebend für die Standortwahl für HAA und SMA.

Die Mächtigkeit des EG ist in NL am grössten

Alle Standortgebiete verfügen über *sehr günstige* räumliche Verhältnisse mit mächtigen einschlusswirksamen Gesteinspaketen, in NL ist die vertikale Ausdehnung des EG mit über 300 m aber am mächtigsten (Kr 1.1). Dies ist sowohl für das HAA- wie 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. Wo in NL keine sandigen Rinnenablagerungen vorhanden sind, fällt die Mächtigkeit des EG noch deutlich grösser aus, nämlich rund 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 dadurch erheblich verstärkt. Dies ist insbesondere für das HAA-Lager in NL relevant (Kr 3.2).

Die hydrogeologischen Bedingungen des EG sind in NL am günstigsten

Alle EG weisen eine sehr günstige hydraulische Barrierewirkung auf, durch die grösste Distanz von der Lagerebene zum nächstliegenden Aquifer oberhalb des Opalinustons sind die hydrogeologischen Bedingungen in NL aber am günstigsten. Zusätzlich ist auch die regionale hydrogeologische Situation *sehr günstig* für die langfristige Isolation der Abfälle (Kr 1.2). 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 stagnierende hydrogeologische Verhältnisse schliessen lässt. Auch die im Keuper-Aquifer in NL beobachteten Grundwasser-Verweilzeiten sind gross, falls bzw. wo Grundwasser überhaupt vorkommt.

Die geologische Situation im EG ist in NL am einfachsten

Alle EG sind langfristig geologisch stabil, 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) wie auch hinsichtlich der langfristigen Beständigkeit der Gesteinseigenschaften im EG (Kr 2.1).

Der Schutz vor Erosion ist in NL am besten

Alle EG bieten langfristig Schutz vor Erosion (Kr 2.2) und geologische Verhältnisse, in denen die Langzeitstabilität des Barrierensystems gegenüber langfristigen, lagerbedingten Prozessen und Wechselwirkungen gewährleistet werden kann (Kr 2.3). 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).

Die in Etappe 3 verwendeten Bewertungsmethoden (Nutzwertanalyse, Ranking- und Outranking-Methode) führen zu eindeutigen Schlussfolgerungen:

- Die aggregierten Bewertungen der Nutzwerte zeigen für alle Standortgebiete insgesamt (d. h. über alle Indikatoren und Kriterien gemittelt) eine günstige bis sehr günstige Gesamtbewertung. Dies bedeutet, dass alle Standortgebiete sicherheitstechnisch geeignet sind. Die Nutzwerte differenzieren nur wenig zwischen den drei Standortgebieten für HAA und SMA; insgesamt weisen NL und ZNO gegenüber JO leichte Vorteile auf.
- Die Ergebnisse der Ranking-Methode und der Outranking-Methode zeigen deutlichere Unterschiede zwischen den drei Standortgebieten:
 - NL ist sowohl für das HAA-Lager als auch für das SMA-Lager der beste Standort. Er schneidet bzgl. Qualität, Langzeitstabilität und Flexibilität im Vergleich mit ZNO und JO klar am besten ab.
 - Auf eine Verteilung der weiteren Podestplätze wird verzichtet, d. h., ein zweiter und dritter Platz wird nicht explizit ausgewiesen. Insgesamt kann festgehalten werden, dass:
 - JO bzgl. der Prognostizierbarkeit von Langzeitveränderungen gewichtige Nachteile hat (Erosion, lagerbedingte Einflüsse)
 - ZNO bzgl. der Anzahl und Verteilung kartierter Störungen einen gewichtigen Nachteil hat, was sich unvorteilhaft auf die Flexibilität bei der Platzierung der Lagerfelder auswirkt

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.
- de Waele, J. & Gutiérrez, F. (2022): Karst hydrogeology, geomorphology and caves. Wiley Blackwell, Hoboken, NJ.
- ENSI (2010): Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag geologischer Standortgebiete. Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1. ENSI 33/070. ENSI, Brugg.
- 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.
- Filipponi, M., Bauer, S., Höfer-Öllinger, C.G. & Jörin, U. (2022): Karstnomenklatur für Ingenieurgeologen und Bauingenieure. Buchschmiede, Wien.
- Geldermann, J. & Schöbel, A. (2011): On the similarities of some multi-criteria decision analysis methods. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 18/43924, 219-230.
- Glaus, M.A., Kulik, D.A., Miron, G.D., Van Loon, L.R., Wüst, R., Becker, J. & Li, X. (2024): Diffusion Databases for Opalinus Clay, Confining Geological Units and Bentonite: Methods, Concepts and Upscaling of Data. Nagra Technical Report NTB 23-08.
- Mäder, U. & Wersin, P. (2023): Reference porewaters for SGT Stage 3 of the Opalinus Clay for the siting regions Jura Ost (JO), Nördlich Lägern (NL) and Zürich Nordost (ZNO). Nagra Arbeitsbericht NAB 22-47.
- Miron, G.D., Marques Fernandes, M., Kulik, D.A., Marinich, O., Baeyens, B., Wüst, R., Becker, J. & Li, X. (2024): Sorption Databases for Opalinus Clay, Confining Geological Units and Bentonite: Methods, Concepts and Upscaling of Data. Nagra Technical Report NTB 23-06.
- Nagra (2008): Vorschlag geologischer Standortgebiete für ein SMA- und ein HAA-Lager: Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie (Bericht zur Sicherheit und Machbarkeit). Nagra Technischer Bericht NTB 08-05.
- Nagra (2014a): 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 (2014b): 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 (2022): Beherrschung möglicher karstbedingter Wasserzutritte während des Baus und Betriebs eines geologischen Tiefenlagers. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-41.
- Nagra (2023): Bautechnisches Dossier. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 1-9.

Nagra (2024a): 3D Seismic Interpretation of Stratigraphic Horizons and Structures in Time Domain Jura Ost. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-17.

Nagra (2024b): 3D Seismic Interpretation of Stratigraphic Horizons and Structures in Time Domain Nördlich Lägern. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-18.

Nagra (2024c): 3D Seismic Interpretation of Stratigraphic Horizons and Structures in Time Domain Zürich Nordost. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-19.

Nagra (2024d): Definition der Bewertungsobjekte für den sicherheitstechnischen Vergleich der Standorte in Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-01 Rev. 1.

Nagra (2024e): Depth Conversion of the 3D Seismic Interpretation for the Area of Interest in the Jura Ost, Nördlich Lägern and Zürich Nordost Siting Regions. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-49.

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

Nagra (2024g): Geological Properties of the Jura Ost, Nördlich Lägern and Zürich Nordost Siting Regions for Safety Assessment. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-10 Rev. 1.

Nagra (2024h): Geosynthesis of Northern Switzerland. Nagra Technical Report NTB 24-17.

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

Nagra (2024j): Phenomenological Description of the Evolution of a Geological Repository for Radioactive Waste in Opalinus Clay. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-20 Rev. 1.

Nagra (2024k): Radiological Consequence Analysis for a Deep Geological Repository in Northern Switzerland. Nagra Technical Report NTB 24-18.

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

swissnuclear (2013-15): PEGASOS Refinement Project : Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Swiss Nuclear Power Plant Sites. swissnuclear, Olten.

Anhang A Begründung der in Etappe 3 verwendeten Indikatoren und Bewertungsskalen

Diese Anlage dokumentiert die Überprüfung der Indikatoren sowie die Definition der Beurteilungsmethodik und Bewertungsskala pro Indikator gemäss Kap. 3.2.2. Dies umfasst eine Rekapitulation der SGT-Vorgaben für die Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit, einschliesslich der zu beurteilenden Aspekte SGT gemäss Anhang I in (BFE 2008). Es wird pro Kriterium aufgezeigt, wie die Aspekte im Kontext der Etappe 3 beurteilt und durch welche Indikatoren sie erfasst werden (siehe auch Anhang B für Unterschiede zur Etappe 2 und Anhang D für eine Übersicht über die Berücksichtigung der zu beurteilenden Aspekte). Für jeden dieser Indikatoren wird die Relevanz für die Langzeitsicherheit diskutiert, die Beurteilungsmethodik definiert und die Bewertungsskala begründet.

Die so erarbeiteten Bewertungsskalen für die qualitative Bewertung in SGT-Etappe 3 sind in Tab. A-13 zusammengestellt.

A.1 Räumliche Ausdehnung (Kriterium 1.1)

Die SGT-Vorgaben für das Kriterium «Räumliche Ausdehnung» sind in Fig. A-1 wiedergegeben. Die zu beurteilenden Aspekte werden folgendermassen adressiert:

- Die Tiefenlage und die regionalen geologisch-tektonischen Verhältnisse, insbesondere die regionalen tektonischen Elemente, wurden bei der Definition der Bewertungsobjekte berücksichtigt (Kap. 3.1 in Nagra 2024d). Entsprechend werden für die Beurteilung des räumlichen Eignungspotenzials die Aspekte **laterale Ausdehnung** und **Mächtigkeit des EG** mittels der Indikatoren «Mächtigkeit EG» (Kap. A.1.2) und «Platzangebot untertag» (Kap. A.1.1) bewertet.
- Die **Flexibilität** bei der Anordnung der untertägigen Lagerteile in Abhängigkeit des Platzbedarfs (Kap. 3.1 in Nagra 2024d) wird mit dem Indikator «Seismisch kartierte Störungen an Wirtgesteinsgrenzen» (Kap. A.1.3) bewertet. Störungen in den kompetenten Formationen ober- und unterhalb des EG werden bei der Bewertung des Kriteriums 2.1 hinsichtlich Neotektonik (allfällige Reaktivierung) betrachtet.

Kap. A.1.4 enthält eine Zusammenfassung der für das Kriterium 1.1 «Räumliche Ausdehnung» in SGT-Etappe 3 beurteilten Aspekte und der dafür verwendeten Indikatoren.

Kriterium	1.1 Räumliche Ausdehnung
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt wird das räumliche Eignungspotential (Mächtigkeit, laterale Ausdehnung, Verbreitung) und die Tiefenlage des Wirtgesteinskörpers bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches unter Berücksichtigung der regionalen geologisch-tektonischen Verhältnisse (z. B. regionale Störungszonen, glazial übertiefte Talrinnen, Fremdgesteineinschlüsse). In die Beurteilung einzubeziehen sind auch der erforderliche Platzbedarf des Tiefenlagers (inkl. Reserve), das Platzangebot sowie die Flexibilität bei der Anordnung der untertägigen Lagerkavernen und -stollen.
<i>Relevanz für die Sicherheit</i>	Günstig sind Verhältnisse, bei welchen das Wirtgestein bzw. der einschlusswirksame Gebirgsbereich derart beschaffen und ausgedehnt ist, dass die Radionuklide grösstenteils im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich zurückgehalten werden.

Fig. A-1: Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 1.1 «Räumliche Ausdehnung»

A.1.1 Platzangebot untertag

Begründung des Indikators (Relevanz für Langzeitsicherheit)

Das Platzangebot untertag bestimmt mit weiteren Faktoren (z. B. Platzbedarf, Mächtigkeit EG etc.) die Möglichkeiten zur Anordnung der Lagerfelder, unter Berücksichtigung der minimal erforderlichen Länge der Freisetzungspfade für Radionuklide innerhalb des EG. Das Platzangebot untertag ist deshalb von grosser Relevanz für die Flexibilität bei der Lagerfeldplatzierung, für Platzreserven oder ggf. für die Lageroptimierung.

Definition der Beurteilungsmethodik

Für die Beurteilung des Platzangebots untertag wird die laterale Ausdehnung des EG und der Platzreserven, wie sie zum Zweck des Standortvergleichs in Etappe 3 definiert wurden, in Bezug zum Platzbedarf gemäss aktueller Auslegung gesetzt (siehe Kap 3.4 für beide Grundlagen). Als Kennzahl wird die laterale Ausdehnung der EG und der Platzreserven (Fläche in km²) verwendet.

Definition Bewertungsskalen

Die Bewertungsstufe *sehr günstig* wird für HAA und SMA erreicht, falls das Platzangebot den angestrebten Richtwert für die laterale Ausdehnung des EG und der Platzreserven von ca. 6 km² für das HAA-Lager resp. ca. 3.6 km² für das SMA-Lager erreicht. Als *günstig* wird ein Platzangebot zwischen 3 – 6 km² für HAA und 1.8 – 3.6 km² für SMA eingestuft. Dies entspricht dem 1.5 bis 3-fachen des Platzbedarfs gemäss beispielhafter Lagerauslegung des RBG und bietet ausreichend Platzreserven für die Platzierung der Lagerfelder sowie für eine spätere Optimierung.

Die Bewertungsstufen *bedingt günstig* und *ungünstig* werden für die Beurteilung der drei Standortgebiete in Etappe 3 nicht benötigt.

A.1.2 Mächtigkeit EG

Begründung des Indikators (Relevanz für Langzeitsicherheit)

Die Mächtigkeit des EG bestimmt die vertikale Länge der Freisetzungspfade für Radionuklide. Zusammen mit den Rückhalte- und Transporteigenschaften der technischen und geologischen Barrieren hat die Länge der Freisetzungspfade einen massgeblichen Einfluss auf die Radionuklid-Freisetzungsraten aus dem EG.

Definition der Beurteilungsmethodik

Objekt der Beurteilung ist der ganze Schichtstapel des EG. Verglichen werden die EG-Mächtigkeiten aus dem geologischen 3D-Modell, welches auf der Interpretation der 3D-Seismik und Kalibration an den Tiefbohrungen basiert. Als Kennzahl wird die über die laterale Ausdehnung des EG und der Platzreserven gemittelte vertikale Mächtigkeit des EG (in m) betrachtet.

Definition Bewertungsskala

Mächtigkeiten von 100 – 150 m werden als *günstig* bewertet. Die Anforderungen an die Länge der vertikalen Transportpfade im intakten Gestein sind durch den Opalinuston sowohl für HAA als auch für SMA in allen Standortgebieten mehr als erfüllt, d. h., das Schutzkriterium von 0.1 mSv/a wird deutlich unterschritten (Kap. 4.1 in Nagra 2024i). Die Bewertungsstufe *sehr günstig* wird dann vergeben, wenn die Mächtigkeit des EG 150 m übersteigt.

Die Bewertungsskala ist für HAA und SMA identisch. Sie entspricht derjenigen aus SGT-Etape 1, wurde aber gegenüber derjenigen aus Etappe 2 geringfügig angepasst. In Etappe 2 wurde eine Situation als *sehr günstig* eingestuft, wenn die Mächtigkeit des Opalinustons mehr als 100 m betrug, kombiniert mit einer Mächtigkeit der oberen Rahmengesteine von mehr als 50 m und der unteren Rahmengesteine von mehr als 25 m (Fussnote 73 in Kap. 3.3 in Nagra 2014b). Damit wurde der Erhaltung des Transportpfadlänge nach oben im Hinblick auf die langfristigen Auswirkungen der Erosion (Abnahme der Restüberdeckung) eine hohe Bedeutung eingeräumt. Dieser Effekt wird in Etappe 3 in Kr 2.2 betrachtet.

Die Bewertungsstufen *bedingt günstig* und *ungünstig* werden für die Beurteilung der drei Standortgebiete in Etappe 3 nicht benötigt.

A.1.3 Seismisch kartierte Störungen an Wirtgesteinsgrenzen

Begründung des Indikators (Relevanz für Langzeitsicherheit)

Zur Gewährleistung der bestmöglichen Barrierewirkung des Opalinustons werden für die Anordnung der Lagerfelder innerhalb der potenziellen Lagerzonen Bereiche ohne seismisch kartierte Störungen an der Ober- und Untergrenze des Wirtgesteins (Wirtgesteinsgrenzen) bevorzugt. Der Indikator «Seismisch kartierte Störungen an Wirtgesteinsgrenzen» dient somit der Bewertung der Flexibilität bei der Anordnung der Lagerfelder.

Definition der Beurteilungsmethodik

Die seismisch kartierten Störungen an den Wirtgesteinsgrenzen im Bereich des EG und der Platzreserven werden mittels eines Boxcounting (Kästchenzählung) quantitativ erfasst. Dazu wird die Fläche des EG und der Platzreserven gerastert (Boxgrösse 100 m × 100 m). Boxen, welche solche Störungen enthalten, werden identifiziert, deren Flächen aufsummiert und durch die Gesamtfläche des EG und der Platzreserven geteilt. Dabei wird ein Abstand sowohl von 100 m als auch von 200 m zu den nächsten seismisch kartierten Störungen berücksichtigt. Transportmodellierungen bestätigen, dass bei entsprechenden lateralen Transportpfadlängen im Opalinuston die Radionuklidfreisetzung vernachlässigbar ist (Kap. 4.2 in Nagra 2024i). Der daraus berechnete, ungestörte Flächenanteil (in % der Gesamtfläche des EG und der Platzreserven) dient als Kennzahl F für die qualitative Beurteilung der Flexibilität bei der Anordnung der Lagerfelder.

Definition Bewertungsskalen

Die Bewertungsstufe *sehr günstig* wird dann erreicht, wenn $75 \% < F \leq 100 \%$. Damit weist der überwiegende Teil (mindestens 75 % der Fläche) des EG keine seismisch kartierten Störungen an den Wirtgesteinsgrenzen auf. Für die nächst tiefere Bewertungsstufe beträgt der tektonisch ungestörte Flächenanteil des EG $50 \% < F \leq 75 \%$ (mehrheitlich ungestört = *günstig*).

Die Bewertungsskala ist für HAA und SMA identisch. Die Bewertungsstufen *bedingt günstig* und *ungünstig* werden für die Beurteilung der drei Standortgebiete in Kr 1.1 nicht benötigt.

A.1.4 Zusammenfassung

Tab. A-1 enthält eine Zusammenfassung der für das Kriterium 1.1 «Räumliche Ausdehnung» im Kontext der Etappe 3 beurteilten Aspekte und der dafür verwendeten Indikatoren, Kennzahlen sowie Bewertungsskalen.

Tab. A-1: Zu beurteilende Aspekte und verwendete Indikatoren mit ihren Bewertungsskalen für das SGT-Kriterium 1.1 «Räumliche Ausdehnung»

Kriterien / zu beurteilende Aspekte	Indikatoren	Kennzahl	Bewertungsskala HAA	Bewertungsskala SMA
1.1 Räumliche Ausdehnung				
Laterale Ausdehnung EG	Platzangebot untertag	Fläche des EG und der Platzreserven (in km ²)	<i>sehr günstig</i> : >6 km ² <i>günstig</i> : 3 – 6 km ² <i>bedingt günstig / ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	<i>sehr günstig</i> : >3.6 km ² <i>günstig</i> : 1.8 – 3.6 km ² <i>bedingt günstig / ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet
Vertikale Ausdehnung EG	Mächtigkeit EG	Mächtigkeit EG über den Bereich des EG und der Platzreserven gemittelt (in m)	<i>sehr günstig</i> : >150 m <i>günstig</i> : 100 – 150 m <i>bedingt günstig / ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	
Flexibilität bei Anordnung Lagerfelder	Seismisch kartierte Störungen an Wirtgesteinsgrenzen	Ungestörter Flächenanteil der Wirtgesteinsgrenzen im Bereich des EG und der Platzreserven (in %)	<i>sehr günstig</i> : 75 – 100 % <i>günstig</i> : 50 – 75 % <i>bedingt günstig / ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	

A.2 Hydraulische Barrierewirkung (Kriterium 1.2)

Die SGT-Vorgaben für das Kriterium «Hydraulische Barrierewirkung» sind in Fig. A-2 wiedergegeben. Die zu beurteilenden Aspekte werden folgendermassen adressiert:

- Die Beurteilung der **hydraulischen Barrierewirkung** des EG wird unter anderem durch die hydraulische Durchlässigkeit und den hydraulischen Gradienten beeinflusst; diese Aspekte werden mit dem Indikator «Darcy-Fluss im EG» erfasst (Kap. A.2.1).
- Für die Beurteilung der Wirkung des EG als **Transportbarriere für Radionuklide** sind zudem auch die vorherrschenden Transportprozesse (Diffusion, Advektion) und die Transporteigenschaften (insb. Sorptionseigenschaften, Diffusionskoeffizienten, Porenzugänglichkeit etc.) relevant. Ein diffusionsdominierter Stofftransport hat einen massgeblichen Einfluss auf den Radionuklidtransport im EG. Der Stoffaustrag aus dem EG wird mit dem Indikator «Tracer-Fluss im EG» (Kap. A.2.2) abgeschätzt.
- Die **regionale hydrogeologische Situation** wird anhand von indirekten Aspekten beurteilt, u. a. die generelle hydrochemische Gliederung, der Grundwasserstockwerkbau, Isotopensignaturen und Verweilzeiten von Grundwässern. Diese Aspekte werden mit dem Indikator «Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation» (Kap. A.2.3) erfasst.

Kap. A.2.4 enthält eine Zusammenfassung der für das Kriterium 1.2 «Hydraulische Barrierewirkung» im Kontext der Etappe 3 beurteilten Aspekte und der dafür verwendeten Indikatoren.

Kriterium	1.2 Hydraulische Barrierenwirkung
Zu beurteilende Aspekte	Beurteilt werden die Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches hinsichtlich der Wasserführung und des Stofftransportes sowie die regionale hydrogeologische Situation. Zur Sicherstellung der langfristigen Isolation und des Einschlusses der radioaktiven Abfälle werden Gesteine mit geringer Grundwasserbewegung gesucht. Diese hängt von den Eigenschaften des Gesteins, u. a. der hydraulischen Durchlässigkeit unter Berücksichtigung des hydraulischen Gradienten ab, und gibt Hinweis auf die vorherrschenden Transportprozesse (Advektion, Diffusion) und die Wirkung als hydraulische Barriere. In die Beurteilung der hydrogeologischen Verhältnisse werden ferner auch indirekte Indikatoren einbezogen wie z. B. die generelle hydrochemische Gliederung und Abgrenzung der verschiedenen Grundwasserstockwerke, erwartete Isotopensignaturen und Verweilzeiten der Tiefenwässer.
Relevanz für die Sicherheit	Eine geringe hydraulische Durchlässigkeit führt zu einer geringen Wasserführung. Eine solche ist zunächst für das Verhalten und den Schutz der technischen Barrieren im Tiefenlager günstig. In einer späteren Phase stellt sie auch sicher, dass der Radionuklidtransport im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich nur sehr langsam erfolgen kann (Barrierenwirkung).

Fig. A-2: Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 1.2 «Hydraulische Barrierewirkung»

A.2.1 Darcy-Fluss im EG

Begründung des Indikators (Relevanz für Langzeitsicherheit)

Der Radionuklidtransport aus dem geologischen Tiefenlager ist unter anderem von der hydraulischen Durchlässigkeit und dem hydraulischen Gradienten abhängig, welche das Fliessverhalten bestimmen. Dieses hat einen massgeblichen Einfluss auf die zeitliche Entwicklung der technischen Barrieren und auf die Barrierewirkung der technischen und natürlichen Barrieren.

Definition der Beurteilungsmethodik

Objekt der Beurteilung beim Indikator «Darcy-Fluss im EG» ist der EG. Der Darcy-Fluss beschreibt die in einer Zeiteinheit durch einen bestimmten Transportquerschnitt fliessende Wassermenge (spezifischer Wasserfluss). Die Beurteilung des Indikators «Darcy-Fluss im EG» erfolgt auf der Grundlage von Messwerten für die hydraulische Durchlässigkeit senkrecht zur Schichtung innerhalb des EG (in-situ-Packer-Tests in Tiefbohrungen und Labortests an Kernproben) sowie auf abgeschätzten Werten für den hydraulischen Gradienten senkrecht zur Schichtung (abgeleitet insb. aus in-situ-Packer-Tests in Tiefbohrungen und hydraulischen Langzeit-Überwachungssystemen in Tiefbohrungen (Kap. 5 und Enclosure 7 in Nagra 2024g)). Als Kennzahl für die qualitative Bewertung des Indikators wird das harmonische Mittel des vertikalen Darcy-Flusses, v_D , über den gesamten Schichtstapel des EG verwendet (in Analogie zu einem «resistor network» mit seriell geschalteten Widerständen). Den Berechnungen wird der abgeschätzte Maximalwert für den hydraulischen Gradienten von ca. 0.5 – 1 m/m je nach Standortgebiet zugrunde gelegt (Kap. 5 und Enclosure 7 in Nagra 2024g).

Definition Bewertungsskala

Die Bewertungsstufe *sehr günstig* wird dann erreicht, wenn der Darcy-Fluss $v_D \leq 10^{-12}$ m/s. Dies entspricht beispielsweise einer hydraulischen Durchlässigkeit von 10^{-12} m/s und einem hydraulischen Gradienten von 1 m/m. In diesem Durchlässigkeitsbereich erfolgt der Radionuklidtransport diffusionsdominiert und die berechneten Dosen liegen um mehrere Grössenordnungen unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/a (Kap. A.5.2 in Nagra 2008).

Für $v_D \leq 10^{-11}$ m/s ergibt sich die Wertung *günstig*. Auch für diesen Darcy-Fluss liegen die maximalen Dosen immer noch deutlich unterhalb des Schutzkriteriums (Kap. A.5.2 in Nagra 2008).

Die Bewertungsskala ist für HAA und SMA identisch. Sie ist im Wesentlichen vergleichbar mit derjenigen aus SGT-Etappe 2 (dort anhand der vertikalen hydraulischen Durchlässigkeit formuliert). Die Bewertungsstufen *bedingt günstig* und *ungünstig* werden für die Beurteilung der drei Standortgebiete in Etappe 3 nicht benötigt.

A.2.2 Tracer-Fluss im EG

Begründung des Indikators (Relevanz für Langzeitsicherheit)

Der Indikator «Tracer-Fluss im EG» dient der Abschätzung des Stoffaustrags aus dem geologischen Tiefenlager und damit der qualitativen Beurteilung der EG als Transportbarriere für Radionuklide. Aufgrund der äusserst geringen Darcy-Flüsse erfolgt der Stofftransport im EG diffusionsdominiert (vgl. Kap. A.2.1), was sich günstig auf die Barrierewirkung der technischen und natürlichen Barrieren auswirkt.

Definition der Beurteilungsmethodik

Objekt der Beurteilung beim Indikator «Tracer-Fluss im EG» ist der EG. Die Beurteilung des Indikators erfolgt auf der Grundlage von Messwerten von effektiven Diffusionskoeffizienten senkrecht zur Schichtung innerhalb des EG (Diffusionsexperimente an Kernproben, siehe Kap. 3 und elektronische Look-up Tabellen in Glaus et al. 2024). Als Kennzahl für die qualitative Bewertung des Indikators wird das harmonische Mittel der vertikalen, effektiven Diffusionskoeffizienten, D_v , über den Schichtstapel von der Lagerebene bis zur Obergrenze des EG bzw. von der Lagerebene bis zur Untergrenze des EG verwendet (in Analogie zu einem «resistor network» mit seriell geschalteten Widerständen). Die Kennzahl wird für zwei dosisrelevante Tracer ermittelt (d. h. für das dosisdominierende Radionuklid ^{129}I im HAA-Lager und für ^{14}C im SMA-Lager).

Definition Bewertungsskala

Die Bewertungsskala basiert auf der Kennzahl D_e (harmonisches Mittel der effektiven Diffusionskoeffizienten). Die Bewertungsstufe *sehr günstig* wird dann erreicht, wenn $D_e \leq 10^{-11}$ m²/s. Dosisberechnungen für HAA für das Referenz-Szenarium zeigen, dass dosisrelevante Radionuklide mit effektiven Dosiskoeffizienten in diesem Bereich (insb. das dosisdominierende Radionuklid ^{129}I) eine maximale Dosis aufweisen, welche das Schutzkriterium von 0.1 mSv/a um mehrere Grössenordnungen unterschreiten (Kap. 6.1 in Nagra 2024k). Für $D_e \leq 10^{-10}$ m²/s ergibt sich die Wertung *günstig*.

Die Bewertungsskala ist für HAA und SMA identisch. Die Bewertungsstufen *bedingt günstig* und *ungünstig* werden für die Beurteilung der drei Standortgebiete in Etappe 3 nicht benötigt.

A.2.3 Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation

Begründung des Indikators (Relevanz für Langzeitsicherheit)

Die hydraulische Barrierewirkung kann neben den Daten aus den in-situ-Hydrotests auch basierend auf den Untersuchungen von Grund- und Porenwässern beurteilt werden. Diese «unabhängigen Evidenzen der Langzeitisolation» tragen zur ergänzenden Beurteilung der regionalen hydrogeologischen Situation bei.

Definition der Beurteilungsmethodik

Für die Beurteilung der hydrogeologischen Situation werden einerseits die Porenwässer im EG betrachtet, und andererseits die Grundwässer in den Aquiferen ober- und unterhalb des EG. Damit werden alle Aspekte berücksichtigt, welche die Porenwasserchemie im EG und deren Ankopplung an die Grundwässer bestimmen.

Die Beurteilung des Indikators «unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation» erfolgt auf der Grundlage von Isotopensignaturen wässriger Lösungen (Porenwasser, freies Wasser) aus den Tiefbohrungen. Diese geben Einblicke in die hydrogeologische Situation in den Standortgebieten, insbesondere in die hydrogeochemische Einteilung und in den Grundwasserstockwerkbau, sowie zu den Verweilzeiten gelöster Stoffe in den Aquiferen, welche das Alter der untersuchten Grund- und Porenwässer abschätzen lassen (Kap. 4.5.5 und 4.6 in Nagra 2024h).

Evidenzen für Herkunft und Mengenanteil von Porenwasserkomponenten sind beispielsweise die Isotopensignaturen des Porenwassers ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) (Kap. 4.6 in Nagra 2024h). Für hohe Grundwasserverweilzeiten können unterschiedliche Evidenzen verwendet werden (Kap. 4.5.5 in Nagra 2024h): Zum Beispiel die Zusammensetzung der marinen oder Süßwasser-Komponenten im Grundwasser oder die Konzentrationen des in der Atmosphäre sehr gering gebildeten und sehr langlebigen Radionuklids Krypton (^{81}Kr mit einer Halbwertszeit von 229'000 a)².

Definition Bewertungsskala

Als *günstig* wird eine Situation eingestuft, bei der belastbare Daten vorliegen, die auf ein hohes Alter der Porenwässer im Opalinuston hinweisen. Dies gilt als unabhängige Evidenz für die sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit (diffusionsdominiertes Transportregime) bzw. die gute hydraulische Barrierewirkung des Opalinustons und seiner Rahmengesteine (Kap. 4.6 in Nagra 2024h).

Wenn zusätzlich belastbare Daten vorhanden sind, die einen hohen Anteil an altem Grundwasser (bzw. die Abwesenheit jüngerer Grundwasserkomponenten) auch in den nächsten Aquiferen ober- und unterhalb des EG belegen, so wird dies als *sehr günstig* eingestuft. Dies weist zusätzlich auf geringe Austauschraten von Wasserinhaltsstoffen zwischen dem Grundwasserleiter und oberflächennahen Grundwässern oder Oberflächengewässern hin und gilt als zusätzliche Evidenz für stagnierende Verhältnisse bzw. sehr langsamen Transport auch in den an den EG angrenzenden Aquiferen (Kap. 4.5.5 in Nagra 2024h).

Die Bewertungsskala ist für HAA und SMA identisch. Die Bewertungsstufen *bedingt günstig* und *ungünstig* werden für die Beurteilung der drei Standortgebiete in Etappe 3 nicht benötigt.

² Resp. hohe ^{81}Kr Modellverweilzeiten

A.2.4 Zusammenfassung

Tab. A-2 enthält eine Zusammenfassung der für das Kriterium 1.2 «Hydraulische Barrierewirkung» im Kontext der Etappe 3 beurteilten Aspekte und der dafür verwendeten Indikatoren, Kennzahlen oder qualitativen Merkmalen sowie Bewertungsskalen.

Tab. A-2: Zu beurteilende Aspekte und verwendete Indikatoren mit ihren Bewertungsskalen für das SGT-Kriterium 1.2 «Hydraulische Barrierewirkung»

Kriterien / zu beurteilende Aspekte	Indikatoren	Kennzahl	Bewertungsskala HAA	Bewertungsskala SMA
1.2 Hydraulische Barrierewirkung				
Hydraulische Barrierenfunktion	Darcy-Fluss im EG	Messwerte der erwarteten vertikalen hydraulischen Durchlässigkeit (harmonisches Mittel K_v über gesamten Schichtstapel des EG; hydr. Gradient i_v zwischen Aquiferen aufgespannt); Darcy-Fluss $v_D = K_v i_v$	<i>sehr günstig</i> : $v_D \leq 10^{-12}$ m/s (diffusionsdominierter Radionuklid-Transport) <i>günstig</i> : $v_D \leq 10^{-11}$ m/s <i>bedingt günstig / ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	
Transportbarrierenfunktion	Tracer-Fluss im EG	Messwerte der effektiven Diffusionskoeffizienten (harmonisches Mittel D_e über Schichtstapel von der Lagerebene bis Obergrenze EG bzw. bis Untergrenze EG)	<i>sehr günstig</i> : $D_e \leq 10^{-11}$ m ² /s (diffusionsdominierter Radionuklid-Transport) <i>günstig</i> : $D_e \leq 10^{-10}$ m ² /s <i>bedingt günstig / ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	
Regionale hydrogeologische Situation	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation	Evidenz für hohes Alter der Porenwässer im Opalinuston und für hohe Verweilzeiten der Grundwässer in den Aquiferen ober- und unterhalb des EG	<i>sehr günstig</i> : Zusätzlich zum hohen Alter der Porenwässer im Opalinuston belegen Evidenzen einen hohen Anteil an altem Grundwasser (bzw. die Abwesenheit jüngerer Grundwasserkomponenten) auch in den nächsten Aquiferen ober- und unterhalb des EG <i>günstig</i> : Evidenzen belegen das hohe Alter der Porenwässer im Opalinuston <i>bedingt günstig / ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	

A.3 Geochemische Bedingungen (Kriterium 1.3)

Die SGT-Vorgaben für das Kriterium «Geochemische Bedingungen» sind in Fig. A-3 wiedergegeben. Die zu beurteilenden Aspekte werden folgendermassen adressiert:

- Für die Beurteilung der geochemischen Bedingungen im EG hinsichtlich Rückhaltung und Verzögerung des Radionuklidtransportes spielt die **Mineralogie** im WG eine relevante Rolle, da sie einen massgeblichen Einfluss auf das Sorptionsvermögen und daher auf die Radionuklidrückhaltung hat. Im Besonderen ist der Tonmineralgehalt im Opalinuston der ausschlaggebende Faktor für die Sorption (Miron et al. 2024); dies wird mit dem Indikator «Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Sorptionsvermögen» erfasst (Kap. A.3.1). Darüber hinaus spielt der Tonmineralgehalt eine Schlüsselrolle beim Selbstabdichtungsvermögen des EG (vgl. Kriterium 1.4), bei der Begrenzung der Grundwasserbewegungen im WG/EG (Kriterium 1.2) und bei der Begrenzung der Auswirkungen langfristiger geologischer und lagerbedingter Einflüsse (Kriterien 2.1, 2.3 und 3.3), die gemäss jeweiliger Methodik beurteilt werden.
- Andererseits spielt auch die Porenwasserchemie für den Radionuklidtransport eine Rolle. Im Opalinuston beeinflusst die Ionenstärke (**Salinität**) das langfristige Verhalten der technischen Barrieren sowie das Sorptions- und Diffusionsverhalten der Radionuklide im WG; diese Aspekte werden mit dem Indikator «Salinität im WG» erfasst (Kap. A.3.2).

Kap. A.3.3 enthält eine Zusammenfassung der für das Kriterium 1.3 «Geochemische Bedingungen» im Kontext der Etappe 3 beurteilten Aspekte und der dafür verwendeten Indikatoren.

Kriterium	1.3 Geochemische Bedingungen
Zu beurteilende Aspekte	Beurteilt werden die geochemischen Verhältnisse im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (u. a. Mineralogie, Chemismus des Wassers, pH-Wert, Redox-Bedingungen, Salinität, Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen, mikrobielle Prozesse) bezüglich Rückhaltung und Verzögerung der Radionuklide (begrenzte Löslichkeit, Sorptionsvermögen) und Langzeitverhalten der technischen Barrieren.
Relevanz für die Sicherheit	Günstig ist, wenn die geochemischen Bedingungen und die Gesteinsbeschaffenheit zu einem guten Radionuklid-Rückhaltevermögen im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich führen. Günstig sind auch geochemische Bedingungen, welche die Radionuklid-Rückhaltung in den technischen Barrieren begünstigen und zur langfristigen Beständigkeit der Eigenschaften der technischen Barrieren im Tiefenlager beitragen.

Fig. A-3: Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 1.3 «Geochemische Bedingungen»

A.3.1 Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Sorptionsvermögen

Begründung des Indikators (Relevanz für Langzeitsicherheit)

Da Tonminerale im Gegensatz zu den meisten anderen Gesteinsmineralien hohe spezifische und chemisch reaktive Oberflächen aufweisen, sind sie bedeutende Sorbenten für Radionuklide. Der Tonmineralgehalt und dessen Zusammensetzung im WG beeinflussen daher in erheblichem Masse die Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption und tragen so zur vorteilhaften Barrierewirkung bei.

Definition der Beurteilungsmethodik

Objekt der Beurteilung beim Indikator «Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Sorptionsvermögen» ist das Wirtgestein. Dieses liefert den Hauptbeitrag zur Rückhaltewirkung der natürlichen Barriere.

Die Beurteilung erfolgt auf der Grundlage von Messwerten der mineralogischen Zusammensetzung des Wirtgesteins (kombinierte Messungen aus Labortests an Kernproben und in-situ-Tests in Tiefbohrungen). Als Kennzahl für die qualitative Bewertung des Indikators wird der Tonmineralgehalt (Kombination aller Tonmineral-Spezies) verwendet. Diese Tonminerale (Illit, Kaolinit, Chlorit, Smektit) weisen alle eine hohe Kationenaustauschkapazität und hohe spezifische Oberflächen auf (Kap. 5.2 und 5.3 in Nagra 2024h), was ein hohes Sorptionsvermögen gewährleistet.

Definition Bewertungsskala

Ein Tonmineralgehalt von über 40 Gew.-% im WG wird hinsichtlich des damit verbundenen Sorptionsvermögens mit *sehr günstig* bewertet, ein Tonmineralgehalt von weniger als 40 Gew.-% mit *günstig*.

Die Bewertungsskala ist für HAA und SMA identisch. Die noch in Etappe 2 verwendete untere Grenze bei 4 Gew.-% für die Stufe *günstig* ist in Etappe 3 nicht mehr erforderlich, da nur noch der Opalinuston als Wirtgestein betrachtet wird. Die Bewertungsstufen *bedingt günstig* und *ungünstig* werden für die Beurteilung der drei Standortgebiete in Etappe 3 nicht benötigt.

A.3.2 Salinität im WG

Begründung des Indikators (Relevanz für Langzeitsicherheit)

Die Salinität im Opalinuston beeinflusst einerseits die Transporteigenschaften der Radionuklide (Sorptionskonstanten, Diffusionskoeffizienten) in den technischen und geologischen Barrieren. Andererseits wirkt sich die Salinität auch auf die Dauerhaftigkeit und somit das Langzeitverhalten der verschiedenen Nahfeldkomponenten (Abfallmatrix, Endlagerbehälter, Bentonit-Verfüllung, Bentonit/Sand-Gemische) aus.

Definition der Beurteilungsmethodik

Objekt der Beurteilung beim Indikator «Salinität im WG» ist das Wirtgestein. Dieses liefert den Hauptbeitrag zur Rückhaltewirkung der natürlichen Barriere.

Die Beurteilung erfolgt auf der Grundlage von Messwerten aus Porenwasseruntersuchungen. Wie in Etappe 2 wird als Kennzahl für die qualitative Bewertung des Indikators die Ionenstärke verwendet.

Definition Bewertungsskala

Analog zu Etappe 2 wird eine Ionenstärke von <0.01 mol/l als *sehr günstig* bewertet, $0.01 - 0.7$ mol/l als *günstig*.

Die Bewertungsskala ist für HAA und SMA identisch. Die noch in Etappe 1 und 2 verwendete untere Grenze bei 0.005 mol/l für die Stufe *sehr günstig*, welche durch die Mobilisierung von Kolloiden im Bentonit-Porenwasser begründet wurde, ist in Etappe 3 nicht mehr erforderlich, weil Kolloide im Opalinuston immobil sind (Kap. 3.3.1 in Nagra 2014b). Bei sehr hohen Ionenstärken von >0.7 mol/l (entspricht ungefähr der Ionenstärke von Meerwasser) könnte die Quellfähigkeit von Bentonit reduziert werden. Die Bewertungsstufen *bedingt günstig* und *ungünstig* werden für die Beurteilung der drei Standortgebiete in Etappe 3 nicht mehr benötigt.

A.3.3 Zusammenfassung

Tab. A-3 enthält eine Zusammenfassung der für das Kriterium 1.3 «Geochemische Bedingungen» im Kontext der Etappe 3 beurteilten Aspekte und der dafür verwendeten Indikatoren und Bewertungsskalen.

Tab. A-3: Zu beurteilende Aspekte und verwendete Indikatoren mit ihren Bewertungsskalen für das SGT-Kriterium 1.3 «Geochemische Bedingungen»

Kriterien / zu beurteilende Aspekte	Indikatoren	Kennzahl	Bewertungsskala HAA	Bewertungsskala SMA
1.3 Geochemische Bedingungen				
Mineralogie im EG	Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Sorptionsvermögen	Messwerte des Tonmineralgehalts im WG	<i>sehr günstig:</i> >40 Gew.-% <i>günstig:</i> <40 Gew.-% <i>bedingt günstig / ungünstig:</i> in E3 nicht verwendet	
Porenwasserchemie im EG	Salinität im WG	Messwerte der Ionenstärke des Porenwassers im WG	<i>sehr günstig:</i> <0.01 mol/l <i>günstig:</i> 0.01 – 0.7 mol/l <i>bedingt günstig / ungünstig:</i> in E3 nicht verwendet	

A.4 Freisetzungspfade (Kriterium 1.4)

Die SGT-Vorgaben für das Kriterium «Freisetzungspfade» sind in Fig. A-4 wiedergegeben. Die zu beurteilenden Aspekte werden folgendermassen adressiert:

Der Fokus liegt auf dem Opalinuston, welcher als Wirtgestein den Hauptbeitrag zur Isolation der Abfälle und zur Rückhaltewirkung von Radionukliden der natürlichen Barriere liefert.

- Für die Beurteilung der Freisetzungspfade im EG spielt die **Art der Transportpfade** und die **Ausbildung des Porenraums** im intakten Opalinuston eine relevante Rolle. Diese Aspekte werden durch den Indikator «Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums im WG» qualitativ charakterisiert (Kap. A.4.1).
- Der hohe Tonmineralgehalt und die spezifische Zusammensetzung der Tonminerale des Opalinustons stellt sicher, dass vorhandene oder zukünftig gebildete Trennflächen abgedichtet werden. Dies erfolgt u. a. durch die Quellung der Tonminerale. Das **Selbstabdichtungsvermögen** des Opalinustons unter den heute vorherrschenden effektiven Normalspannungen in den EG wird anhand des Indikators «Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Selbstabdichtungsvermögen» erfasst (Kap. A.4.2).
- Die **Verteilung der Transportpfade** und die **Transmissivität** von potentiellen Störungen im WG beeinflusst die Wasserführung und damit den Radionuklidtransport im EG. Diese Aspekte werden durch den Indikator «Störungstransmissivität im WG» erfasst (Kap. A.4.3).

Kap. A.4.4 enthält eine Zusammenfassung der für das Kriterium 1.4 «Freisetzungspfade» im Kontext der Etappe 3 beurteilten Aspekte und der dafür verwendeten Indikatoren.

Kriterium	1.4 Freisetzungspfade
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt werden die präferenziellen Radionuklid-Freisetzungspfade im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Zur Ausbreitung der Nuklide tragen verschiedene Eigenschaften des Transportpfades bei, wie die Art und Verteilung der Transportpfade im Gestein (poröses oder geklüftetes Medium), die Ausbildung seines Porenraums («Channeling» = Fliesskanäle) sowie seine Länge und Transmissivität. Bei der Ausbreitung entlang von Rissen und Klüften im Gestein ist das Selbstabdichtungsvermögen zu berücksichtigen, welches wesentlich vom Tongehalt des Gesteins abhängt.
<i>Relevanz für die Sicherheit</i>	Günstig sind Transportpfade, die zu einer erheblichen Verzögerung der Radionuklidfreisetzung aus dem Wirtgestein bzw. dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich führen. Günstig ist dabei eine homogene Verteilung der Fliesswege im Gestein, im Gegensatz zu einer Konzentration des Flusses auf wenige Klüfte, Adern oder andere Inhomogenitäten. Je länger der Nuklidtransport im Gestein dauert, desto grösser ist der Anteil der Radionuklide, die im Gestein zerfallen und somit die Biosphäre nicht erreichen.

Fig. A-4: Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 1.4 «Freisetzungspfade»

A.4.1 Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums im WG

Begründung des Indikators (Relevanz für Langzeitsicherheit)

Die Art der Transportpfade und die Ausbildung des Porenraums im WG beeinflussen das Transportverhalten von Radionukliden im EG. Von besonderer Bedeutung für die Langzeitsicherheit sind Störungs- oder Kluftnetzwerke, die präferenzielle, advective Freisetzungspfade für Radionuklide bilden könnten.

Definition der Beurteilungsmethodik

Objekt der Beurteilung beim Indikator «Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums im WG» ist das Wirtgestein. Dieses liefert den Hauptbeitrag zur Rückhaltewirkung der natürlichen Barriere.

Die Beurteilung erfolgt anhand einer qualitativen Charakterisierung, welche die Art der Transportpfade und die Ausbildung des Porenraums sowie deren Bedeutung für den Radionuklidtransport erfasst. Hierzu wird unterschieden zwischen (äquivalent) porösen Medien und Kluftnetzwerken (kleinräumige Klüftung mit Kluftabständen im Dezi- bis Dekameterbereich).

Die Grundlage für diese qualitative Charakterisierung bilden mikrostrukturelle Untersuchungen an Kernproben aus den Tiefbohrungen. Dazu gehören Untersuchungen der Porengrössenverteilung, Porosität, spezifischen Oberfläche und das beobachtete Strukturinventar im Opalinuston. Auch Tracer-Profile und Diffusionsexperimente tragen zum Verständnis der Art der Transportpfade und der Ausbildung des Porenraums bei (Kap. 5.8 und 5.9 in Nagra 2024h).

Definition Bewertungsskala

Die Bewertungsskala basiert auf einer qualitativen Charakterisierung der Art der Transportpfade und der Ausbildung des Porenraums im Wirtgestein. Bei der Festlegung der Bewertungsstufen werden die Erfahrungen aus früheren Sicherheitsanalysen für homogen-poröse und geklüftete Wirtgesteine (Kap. A1.17 in Nagra 2008) berücksichtigt. Gemäss diesen Resultaten und Erfahrungen verringert sich die Wirkung der geologischen Barriere bezüglich Radionuklid-rückhaltung generell bei zunehmender Advektionsgeschwindigkeit sowie bei abnehmender Matrixdiffusion und Sorption.

Als *sehr günstig* werden deshalb Gesteine eingestuft, die sich als äquivalent-poröse Medien charakterisieren lassen. Solche Gesteine weisen einen grossen Transportquerschnitt mit niedrigen bis sehr niedrigen Advektionsgeschwindigkeiten auf und gewährleisten eine sehr gute Barriere-wirkung. Dazu gehören insbesondere intakter oder auch geklüfteter Opalinuston. Im Fall von geklüftetem Opalinuston (mit ausreichender Gesteinsüberdeckung) unterscheiden sich die Transporteigenschaften aufgrund des guten Selbstabdichtungsvermögens nur wenig von denjenigen der intakten Gesteinsmatrix.

Als *günstig* werden geklüftete Gesteine eingestuft, in denen die Wasserführung entlang von Diskontinuitäten mit beschränktem «Channeling» (beschränkte Advektionsgeschwindigkeiten) erfolgt, und welche günstige Bedingungen für die Matrixdiffusion von Radionukliden aufweisen. Im Falle des Opalinustons würde diese Bewertungsstufe nur dann verwendet, wenn eine Wasserführung in Klüften vorläge (z. B. aufgelockerter Opalinuston bei geringer Gesteinsüberdeckung).

Die Bewertungsskala ist für HAA und SMA identisch. Sie ist analog zu Etappe 2. Die Bewertungsstufen *bedingt günstig* und *ungünstig* werden für die Beurteilung der drei Standortgebiete in Etappe 3 nicht benötigt.

A.4.2 Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Selbstabdichtungsvermögen

Begründung des Indikators (Relevanz für Langzeitsicherheit)

Das Selbstabdichtungsvermögen des Opalinustons spielt für die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften eine zentrale Rolle, weil es eine Wasserführung entlang von Klüften und Störungen verhindert, bzw. deren hydraulische Transmissivität begrenzt. Das Selbstabdichtungsvermögen hat dadurch einen massgeblichen Einfluss auf die Radionuklidrückhaltung in der natürlichen Barriere.

Definition der Beurteilungsmethodik

Objekt der Beurteilung beim Indikator «Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Selbstabdichtungsvermögen» ist das Wirtgestein. Dieses liefert den Hauptbeitrag zur Rückhaltewirkung der natürlichen Barriere.

Die Beurteilung erfolgt auf der Grundlage von Messwerten des Tonmineralgehalts im Opalinuston (kombinierte Messungen aus Labortests an Kernproben und in-situ-Tests in Tiefbohrungen) und empirischen Korrelationen mit hydraulischen Tests. Das Selbstabdichtungsvermögen des Opalinustons wird primär durch den hohen Tonmineralgehalt bestimmt (insbesondere durch den Smektit-Gehalt). Weitere Einflussgrössen sind die effektiven Normalspannungen in Lagertiefe, der Quellindex, der Quelldruck, das Wasserangebot sowie die geomechanischen Eigenschaften von Opalinuston (insb. Steifigkeit). Der Tonmineralgehalt wird als Indikator für das Selbstabdichtungsvermögen verwendet (Kap. 5.7 in Nagra 2024h). Voraussetzung für die Selbstabdichtung ist, dass die effektiven Normalspannungen auf Trennflächen in Lagertiefe ausreichend gross sind. Dies wird in allen Standortgebieten durch eine Restüberdeckung der Lagerebene von mindestens 200 m gewährleistet (Kap. 5.7 in Nagra 2024h).

Definition Bewertungsskala

Die Bewertungsstufe *sehr günstig* gilt für einen Tonmineralgehalt >40 Gew.-%. In diesem Bereich findet eine ausgeprägte Selbstabdichtung von Trennflächen im Opalinuston statt (Fig. 4-1). Die Bewertungsstufe *günstig* gilt für einen Tonmineralgehalt zwischen 20 und 40 Gew.-%. In diesem Bereich findet noch eine signifikante Selbstabdichtung von Trennflächen statt, allerdings weniger ausgeprägt im Vergleich zum Bereich >40 Gew.-%.

Die Bewertungsskala ist für HAA und SMA identisch. Sie ist analog zu Etappe 2. Die Bewertungsstufen *bedingt günstig* und *ungünstig* werden für die Beurteilung der drei Standortgebiete in Etappe 3 nicht benötigt.

A.4.3 Störungstransmissivität im WG**Begründung des Indikators (Relevanz für Langzeitsicherheit)**

Die hydraulische Transmissivität bestimmt – zusammen mit der Anzahl an Störungen und dem vorherrschenden hydraulischen Gradienten – den Wasserfluss entlang diskreter tektonischer Elemente (Störungen) im Opalinuston. Ist die hydraulische Transmissivität diskreter tektonischer Elemente im Opalinuston gering, so ist auch im Bereich von solchen Elementen von einem diffusionsdominierten Radionuklidtransport auszugehen. Bei höheren Transmissivitäten wäre ein advektiv/diffusiver Radionuklidtransport zu betrachten. Die Transmissivität hat dadurch Einfluss auf die zeitliche Entwicklung der technischen Barrieren, auf die Radionuklidrückhaltung in den technischen und natürlichen Barrieren und auf die Radionuklidfreisetzung aus dem EG.

Definition der Beurteilungsmethodik

Objekt der Beurteilung beim Indikator «Störungstransmissivität im WG» ist das Wirtgestein. Dieses liefert den Hauptbeitrag zur Rückhaltewirkung der natürlichen Barriere.

Die Beurteilung erfolgt auf der Grundlage von in-situ-Messungen der Transmissivität des Opalinustons (insb. hydraulische Packer-Tests aus Tiefbohrungen für verschiedene Testintervalllängen, vgl. Kap. 5.6 in Nagra 2024h).

Definition Bewertungsskala

Die Bewertungsskala basiert auf «best estimate»-Messwerten für die Transmissivität T innerhalb des Opalinustons. Die Bewertungsstufen *sehr günstig* und *günstig* werden dann erreicht, wenn $T \leq 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ und $T \leq 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Dosisberechnungen für HAA für das alternative Szenarium mit einer unerkannten Störung (mit einer Transmissivität von $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$) innerhalb des HAA-Lagerfelds zeigen, dass die maximale Dosis das Schutzkriterium von 0.1 mSv/a um mehrere Größenordnungen unterschreitet (Kap. 6.1.3 in Nagra 2024k). Für geringere Transmissivitäten ($10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ oder weniger) sind nur noch marginale Dosisreduktionen zu erwarten.

Die Bewertungsskala ist für HAA und SMA identisch und entspricht derjenigen aus Etappe 2. Die Bewertungsstufen *bedingt günstig* und *ungünstig* werden für die Beurteilung der drei Standortgebiete in Etappe 3 nicht benötigt.

A.4.4 Zusammenfassung

Tab. A-4 enthält eine Zusammenfassung der für das Kriterium 1.4 «Freisetzungspfade» im Kontext der Etappe 3 beurteilten Aspekte und der dafür verwendeten Indikatoren und Bewertungsskalen.

Tab. A-4: Zu beurteilende Aspekte und verwendete Indikatoren mit ihren Bewertungsskalen für das SGT-Kriterium 1.4 «Freisetzungspfade»

Kriterien / zu beurteilende Aspekte	Indikatoren	Kennzahl	Bewertungsskala HAA	Bewertungsskala SMA
1.4 Freisetzungspfade				
Art des mikroskopischen Porenraums im intakten WG	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums im WG	Qualitative Beurteilung auf der Grundlage von Messwerten aus Kernproben im WG: Porengrössenverteilung, spezifische Oberfläche, anionenzugängliche Porosität, Diffusionskoeffizienten	<i>sehr günstig</i> : (äquivalent) poröses Medium <i>günstig</i> : Wasserführung in Diskontinuitäten mit beschränktem Channeling und günstigen Bedingungen für Matrixdiffusion <i>bedingt günstig / ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	
Art der Transportpfade entlang diskreter tektonischer Elemente im WG	Störungstransmissivität im WG	Messwerte aus Packer-Tests in Tiefbohrungen im WG («best estimate»-Werte)	<i>sehr günstig</i> : $T \leq 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ <i>günstig</i> : $T \leq 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ <i>bedingt günstig / ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	
Selbstabdichtungsvermögen im WG	Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Selbstabdichtungsvermögen	Messwerte des Tonmineralgehalts im WG	<i>sehr günstig</i> : ausgeprägtes Selbstabdichtungsvermögen (Tonmineralgehalt >40 Gew.-%) <i>günstig</i> : signifikantes Selbstabdichtungsvermögen (Tonmineralgehalt 20 – 40 Gew.-%) <i>bedingt günstig / ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	

A.5 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (Kriterium 2.1)

Die SGT-Vorgaben für das Kriterium «Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften» sind in Tab. A-6 wiedergegeben. Die zu beurteilenden Aspekte werden folgendermassen adressiert:

- Die Beurteilung des Potenzials der **Störung des Gesteinsverbandes im EG durch differenzielle Bewegungen (Neotektonik)** erfolgt anhand der Indikatoren «Seismizität» (Kap. A.5.1) und «Seismisch kartierte Störungen in kompetenten Formationen» (Kap. A.5.2). Während der Indikator «Seismizität» eine grossräumige Betrachtung erlaubt, adressiert der Indikator «Seismisch kartierte Störungen in kompetenten Formationen» die lokale Situation in der potenziellen Lagerzone.
- Für die Beurteilung der **Bildung neuer Wasser- und Gaswegsamkeiten durch geochemische Vorgänge** sind Lösungsprozesse, Karstbildung und Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen relevant (im Folgenden unter dem Begriff Lösungsprozesse subsummiert). Diese Aspekte werden mit drei separaten Indikatoren «Potenzial für Bildung von Wasserwegsamkeiten durch Lösungsprozesse oberhalb / innerhalb / unterhalb WG (im EG)» erfasst (Kap. A.5.3).
- Die Auswirkungen verkarsteter Gesteinseinheiten beim Bau, Betrieb und Verschluss der Zugangsbauwerke werden im Rahmen der bautechnischen Risikoanalyse beurteilt (vgl. Indikator «Nachweis der bautechnischen Machbarkeit der Lagerprojekte» im Kriterium 4.2).
- Seltene geologische Ereignisse im Zusammenhang mit starken Erdbeben und Vulkanismus sind in der Nordschweiz extrem unwahrscheinlich und werden von der Beurteilung ausgeschlossen (vgl. auch Hinweis in ENSI-Gutachten zu Etappe 1 (ENSI 2010)).

Kap. A.5.4 enthält eine Zusammenfassung der für das Kriterium 2.1 «Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften» im Kontext der Etappe 3 beurteilten Aspekte und der dafür verwendeten Indikatoren und Bewertungsskalen.

Kriterium	2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt wird die geologische Langzeitstabilität des Standortes und der Gesteinseigenschaften, insbesondere die Möglichkeit einer Beeinträchtigung und Veränderung des Isolationsvermögens des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches durch geologische Prozesse wie Störung des Gesteinsverbandes durch differenzielle Bewegungen (Zerschierung, Reaktivierung von Brüchen und Störungszonen, Bildung neuer Wasser- und Gaswegsamkeiten) verursacht durch neotektonische Aktivität (u. a. Seismizität), geochemische Vorgänge (Lösungsprozesse, Karstbildung, Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen) oder seltene geologische Ereignisse wie die Bruchbildung im Zusammenhang mit starken Erdbeben oder Vulkanismus.
<i>Relevanz für die Sicherheit</i>	Günstig sind Gebiete und Gesteine, die über den für die Sicherheitsbewertung zu betrachtenden Zeitraum die erforderliche Barrierenwirkung gewährleisten können. Günstig sind Gesteine mit einer geringen Neigung zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten und die bei Deformation eine Selbstabdichtung von Rissen/Klüften/Störungen aufweisen. Günstig sind geologische Situationen, bei denen differenzielle Bewegungen innerhalb des Lagerbereiches unwahrscheinlich sind.

Fig. A-5: Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 2.1 «Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften»

A.5.1 Seismizität

Begründung des Indikators (Relevanz für Langzeitsicherheit)

Differenzielle Bewegungen im geologischen Untergrund können z. B. durch Erdbeben ausgelöst werden. Für ein geologisches Tiefenlager können insbesondere Versätze an Störungen im Untergrund hinsichtlich Scherbewegungen im EG relevant sein. Der Indikator «Seismizität» dient der grossräumigen Beurteilung der Langzeitstabilität der geologischen Barriere gegenüber differenziellen Bewegungen innerhalb des Betrachtungszeitraums.

Definition der Beurteilungsmethodik

Aufgrund des vorhandenen Erdbebenkatalogs und von konzeptionellen Überlegungen können Zonen mit unterschiedlicher Häufigkeits-Magnituden-Verteilung in der Schweiz ausgeschieden werden (swissnuclear 2013-15). Dadurch kann die Erdbebenhäufigkeit grossräumig verglichen werden. Objekt der Beurteilung beim Indikator «Seismizität» ist entsprechend der gesamte Schichtstapel im Grossraum um das jeweilige Standortgebiet. Die Bewertung der Seismizität erfolgt anhand der modellierten Häufigkeitskarte von Erdbeben mit Magnituden ≥ 6 , wie sie aus dem Projekt PRP (swissnuclear 2013-15) unter Berücksichtigung der Angaben von vier verschiedenen Expertengruppen resultierte.

Definition Bewertungsskala

Als *günstig* werden Zonen ohne erhöhte Seismizität eingestuft, als *bedingt günstig* Zonen mit erhöhter Seismizität.

Die Bewertungsskala ist für HAA und SMA identisch. Sie wurde gegenüber derjenigen aus SGT-Etappe 2 geringfügig angepasst. Die Bewertungsstufen *sehr günstig* und *ungünstig* werden in Etappe 3 nicht verwendet.

A.5.2 Seismisch kartierte Störungen in kompetenten Formationen

Begründung des Indikators (Relevanz für Langzeitsicherheit)

Neotektonische Prozesse sind massgebliche Einflussfaktoren für die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften innerhalb des Betrachtungszeitraums. Im Fokus stehen zukünftige differenzielle Bewegungen des Gesteinsverbandes.

Definition der Beurteilungsmethodik

Die seismisch kartierten Störungen auf den kompetenten Schichten ober- und unterhalb des EG und der Platzreserven werden mittels eines Boxcounting (Kästchenzählung) quantitativ erfasst. Dazu wird die Fläche des EG und der Platzreserven gerastert (Boxgrösse 100 m $\times$ 100 m). Boxen, welche solche tektonischen Elemente enthalten, werden identifiziert, deren Flächen aufsummiert und durch die Gesamtfläche des EG und der Platzreserven geteilt. Dabei wird ein Abstand sowohl von 100 m als auch von 200 m zu den nächsten seismisch kartierten Störungen berücksichtigt. Transportmodellierungen bestätigen, dass bei entsprechenden lateralen Transportpfadlängen im Opalinuston die Radionuklidfreisetzung vernachlässigbar ist (Kap. 4.2 in Nagra 2024i). Der daraus berechnete, ungestörte Flächenanteil (in % der Gesamtfläche des EG und der Platzreserven) dient als Kennzahl F' für die qualitative Beurteilung der seismisch kartierten Störungen in kompetenten Formationen. Die Methodik ist analog zur Beurteilung der Flexibilität bei der Anordnung der Lagerfelder in Kriterium 1.1 (vgl. Kap. A.1.3).

Definition Bewertungsskala

Die Bewertungsstufe *sehr günstig* wird dann erreicht, wenn $75 \% < F' \leq 100 \%$. Damit weist der überwiegende Teil (mindestens 75 % der Fläche) in den kompetenten Formationen ober- und unterhalb des EG keine seismisch kartierten Störungen auf. Für die weiteren Bewertungsstufen beträgt der tektonisch ungestörte Flächenanteil $50 \% < F' \leq 75 \%$ (mehrheitlich ungestört = *günstig*) und $10 \% < F' \leq 50 \%$ (*bedingt günstig*).

Die Bewertungsskala ist für HAA und SMA identisch. Die Bewertungsstufe *ungünstig* wird für die Beurteilung der drei Standortgebiete nicht benötigt.

A.5.3 Potenzial für Bildung von Wasserwegsamkeiten im EG durch Lösungsprozesse**Begründung des Indikators (Relevanz für Langzeitsicherheit)**

Lösungsprozesse können unter spezifischen Bedingungen zur Bildung neuer, u.U. hoch transmissiver Wasserwegsamkeiten (Karströhren) und damit zu präferenziellen Freisetzungspfaden für Radionuklide führen. Die Indikatoren «Potenzial für Bildung von Wasserwegsamkeiten durch Lösungsprozesse oberhalb / innerhalb / unterhalb WG (im EG)» dienen damit der Beurteilung der Beständigkeit der Rückhaltewirkung des EG.

Definition der Beurteilungsmethodik

Die Beurteilung des Verkarstungspotenzials erfolgt für den ganzen Schichtstapel des EG, wird aber getrennt für die oberen Rahmengesteine, das Wirtgestein und die unteren Rahmengesteine im EG geführt. Als Verkarstungspotenzial wird die Neigung eines Gebirgsbereichs bezeichnet, unter gegebenen geologischen, geomorphologischen, hydrologischen und klimatischen Bedingungen einen Karstaquifer auszubilden (Kap. 2 in Filipponi et al. 2022).

Die Beurteilung der Verkarstungsfähigkeit einer Gesteinseinheit erfolgt auf der Grundlage des Gehalts an lösungsfähigen Mineralien sowie auf der Analyse von weiteren hydrogeologischen und hydrochemischen in-situ-Bedingungen, die erfüllt sein müssen, damit sich in einer verkarstungsfähigen Gesteinseinheit durch Lösungsprozesse Fliesswege entwickeln können (Kap. 3, 5.5 und 11.2 in de Waele & Gutiérrez 2022).

Für die Identifikation verkarstungsfähiger Gesteine werden Karbonatgehalt, Anhydrit-/Gipsgehalt sowie Halitgehalt betrachtet. Weiter wird geprüft, ob in der Gesteinseinheit oder in den unmittelbar angrenzenden Gesteinseinheiten bezüglich der lösungsfähigen Mineralien ungesättigte Fluide vorhanden oder im Betrachtungszeitraum zu erwarten sind. Und es wird geprüft, ob in der Gesteinseinheit oder in den unmittelbar angrenzenden Gesteinseinheiten eine relevante Grundwasserzirkulation besteht oder im Betrachtungszeitraum zu erwarten ist.

Bei der Beurteilung des Verkarstungspotenzials wird konservativ angenommen, dass innerhalb der Betrachtungszeiträume von 1 Mio. Jahre für HAA und 100'000 Jahre für SMA genügend Zeit für Lösungsprozesse vorhanden ist, d. h., die Zeit wird nicht als limitierender Faktor betrachtet.

Definition Bewertungsskala

Als *sehr günstig* wird eine Situation eingestuft, in der keine Verkarstung möglich ist. Als *günstig* wird eine Situation eingestuft, in der eine Verkarstung unter speziellen Bedingungen nicht vollständig auszuschliessen ist.

Die Bewertungsskala ist für HAA und SMA identisch und entspricht derjenigen aus Etappe 2. Die Bewertungsstufen *bedingt günstig* und *ungünstig* werden für die Beurteilung der drei Standortgebiete in Etappe 3 nicht benötigt.

A.5.4 Zusammenfassung

Tab. A-5 enthält eine Zusammenfassung der für das Kriterium 2.1 «Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften» im Kontext der Etappe 3 beurteilten Aspekte und der dafür verwendeten Indikatoren und Bewertungsskalen.

Tab. A-5: Zu beurteilende Aspekte und verwendete Indikatoren mit ihren Bewertungsskalen für das SGT-Kriterium 2.1 «Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften»

Kriterien / zu beurteilende Aspekte	Indikatoren	Kennzahl	Bewertungsskala HAA	Bewertungsskala SMA
2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften				
Störung des Gesteinsverbandes im EG durch differenzielle Bewegungen (Neotektonik)	Seismisch kartierte Störungen in kompetenten Formationen	ungestörter Flächenanteil in kompetenten Formationen im Bereich des EG und der Platzreserven (in %)	<i>sehr günstig</i> : 75 – 100% <i>günstig</i> : 50 – 75 % <i>bedingt günstig</i> : 10 – 50 % <i>ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	
	Seismizität	Seismische Aktivität: Definition von grossräumigen Zonen mit unterschiedlicher Häufigkeits-Magnituden-Verteilung von Erdbeben	<i>sehr günstig</i> : in E3 nicht verwendet <i>günstig</i> : keine erhöhte Seismizität <i>bedingt günstig</i> : erhöhte Seismizität <i>ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	
Bildung neuer Wasser- und Gaswegsamkeiten durch geochemische Vorgänge (Lösungsprozesse, Karstbildung, Wasser-Gesteins-Wechselwirkung)	Potenzial für Bildung von Wasserwegsamkeiten durch Lösungsprozesse • oberhalb WG (im EG) • im WG • unterhalb WG (im EG) (3 separate Indikatoren)	Verkarstungspotenzial (unter Berücksichtigung der hydrogeologischen und hydrochemischen in-situ-Bedingungen).	<i>sehr günstig</i> : Verkarstung ist nicht möglich <i>günstig</i> : Verkarstung ist unter speziellen Bedingungen nicht vollständig auszuschliessen <i>bedingt günstig / ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	

A.6 Erosion (Kriterium 2.2)

Die SGT-Vorgaben für das Kriterium «Erosion» sind in Fig. A-6 wiedergegeben. Die zu beurteilenden Aspekte werden folgendermassen adressiert:

- Die Auswirkungen sowohl der **nicht-glazialen Erosion** wie auch der **glazialen Tiefenerosion** auf die Barrierewirkung werden in einer systematischen Betrachtung mit dem Indikator «Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte» erfasst (Kap. A.6.1). Dabei werden auf Basis des heutigen Entwässerungsszenario und über den Betrachtungsraum massgeblichen Faktoren und Prozesse betrachtet und die Ungewissheiten miteinbezogen.

Kap. A.6.2 enthält eine Zusammenfassung der für das Kriterium 2.2 «Erosion» im Kontext der Etappe 3 beurteilten Aspekte und der dafür verwendeten Indikatoren und Bewertungsskalen.

Kriterium	2.2 Erosion
Zu beurteilende Aspekte	Beurteilt wird der Einfluss der Erosion, d. h. die massgeblichen Faktoren und Prozesse (Tiefenlage des Lagers, Hebungsrate, Erosionsrate und glaziale Tiefenerosion), die zu einer Beeinträchtigung der Barrierenwirkung des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (Verringerung der Gesteinsüberdeckung, Auflockerung des Wirtgesteins und Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit) oder zu einer Freilegung des Lagers innerhalb des Betrachtungszeitraumes führen könnten.
Relevanz für die Sicherheit	Günstig ist eine Situation (geringe Erosion und/oder grosse Tiefenlage), bei der die Barrierenwirkung des Wirtgesteins nicht oder möglichst spät beeinträchtigt wird.

Fig. A-6: Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 2.2 «Erosion»

A.6.1 Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte

Begründung des Indikators (Relevanz für Langzeitsicherheit)

Eine ausreichende Restüberdeckung der Lagerebene schützt vor Dekompaktionseffekten im EG, gewährleistet die für den Erhalt des Selbstabdichtungsvermögens im Opalinuston erforderliche effektive Normalspannung und beeinflusst damit die hydraulische Barrierewirkung des EG.

Definition der Beurteilungsmethodik

Die Beurteilung von Auswirkungen der Erosion basiert auf systematischen hybrid-probabilistischen Modellrechnungen zur Restüberdeckung des geologischen Tiefenlagers am Ende des Betrachtungszeitraums unter Einbezug der Ungewissheiten (Kap. 3 in Nagra 2024f). Es werden zwei verschiedene Modellansätze verwendet: «Flächenansatz» für das Lagerfeld gemäss heutiger Auslegung und «Punktansatz» für ausgewählte Punkte im Bereich des EG und der Platzreserven. Objekt der Beurteilung bzgl. Erosion ist der ganze Schichtstapel oberhalb der Lagerebene im Bereich des EG und der Platzreserven. Als Kennzahl wird die berechnete Restüberdeckung der Lagerebene am Ende des Betrachtungszeitraums verwendet, wobei der 5-Perzentilwert (P5-Wert) betrachtet wird. Der P5-Wert der Restüberdeckung wird in 95 % der Rechenfälle übertroffen bzw. in 5 % der Rechenfälle unterschritten. Der P5-Wert für das heutige Entwässerungsszenario wird in Kriterium 2.2 als pessimistischer (unterer) Eckwert der Restüberdeckung für die erwartete Langzeitentwicklung interpretiert.

Definition Bewertungsskala

Die Bewertungsstufe *sehr günstig* wird dann erreicht, wenn die Restüberdeckung (Bandbreite der P5-Werte) der Lagerebene am Ende des Betrachtungszeitraums mindestens 250 m beträgt. Damit liegt die Lagerebene am Ende des Betrachtungszeitraums in 95 % der betrachteten Szenarien mindestens 250 m unter der Geländeoberkante. Mit dieser Restüberdeckung bleiben die effektiven Normalspannungen bis zum Ende des Betrachtungszeitraums genügend gross, um das ausgeprägte Selbstabdichtungsvermögen und die äusserst geringen hydraulischen Durchlässigkeiten des Opalinustons bis zu dessen Obergrenze zu erhalten (Kap. 5.7.7 in Nagra 2024h).

Als *günstig* wird eine Situation eingestuft, wenn die Restüberdeckung (Bandbreite der P5-Werte) der Lagerebene am Ende des Betrachtungszeitraums zwischen 200 m und 250 m beträgt. Auch in dieser Situation bleibt das Selbstabdichtungsvermögen des Opalinustons weitgehend erhalten und die Wasserflüsse in den technischen Barrieren und im Opalinuston bleiben langfristig gering.

Als *bedingt günstig* wird eine Situation eingestuft, wenn die Restüberdeckung (Bandbreite der P5-Werte) der Lagerebene am Ende des Betrachtungszeitraums zwischen 50 m und 200 m beträgt. Damit bleibt die Obergrenze des Opalinustons bis zum Ende des Betrachtungszeitraums überdeckt. Auch in dieser Situation bleibt das Selbstabdichtungsvermögen des Opalinustons noch teilweise erhalten und die Wasserflüsse in den technischen Barrieren und im Opalinuston bleiben langfristig begrenzt.

Die Bewertungsskala ist für HAA und SMA identisch. Die Bewertungsstufe *ungünstig* wird für die Beurteilung der drei Standortgebiete in Etappe 3 nicht benötigt.

A.6.2 Zusammenfassung

Tab. A-6 enthält eine Zusammenfassung der für das Kriterium 2.2 «Erosion» im Kontext der Etappe 3 beurteilten Aspekte und der dafür verwendeten Indikatoren und Bewertungsskalen.

Tab. A-6: Zu beurteilende Aspekte und verwendeter Indikator mit zugehöriger Bewertungsskala für das SGT-Kriterium 2.2 «Erosion»

Kriterien / zu beurteilende Aspekte	Indikatoren	Kennzahl	Bewertungsskala HAA	Bewertungsskala SMA
2.2 Erosion				
Tiefenlage des Lagers, Hebungsrate, Erosionsrate (nicht-glaziale Erosion und Erosion mit glazialer Über-tiefung)	Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte	Bandbreite der berechneten P5-Werte für das Lagerfeld gemäss heutiger Auslegung sowie für ausgewählte Punkte innerhalb des Bereichs des EG und der Platzreserven	<i>sehr günstig</i> : Restüberdeckung der Lagerebene am Ende des BZR beträgt mindestens 250 m <i>günstig</i> : Restüberdeckung der Lagerebene am Ende des BZR beträgt 200 m bis 250 m <i>bedingt günstig</i> : Restüberdeckung der Lagerebene am Ende des BZR beträgt 50 m bis 200 m <i>ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	

A.7 Lagerbedingte Einflüsse (Kriterium 2.3)

Die SGT-Vorgaben für das Kriterium «Lagerbedingte Einflüsse» sind in Fig. A-7 wiedergegeben. Die zu beurteilenden Aspekte werden folgendermassen adressiert:

- Bei der Erstellung der Lagerkammern kommt es zur **Ausbildung einer Auflockerungszone** im angrenzenden Wirtgestein, was mit dem Indikator «Länge des Freisetzungspfads im intakten Wirtgestein» erfasst wird (Kap. A.7.1).
- Für die Beurteilung der Auswirkungen der thermischen Einflüsse sind vor allem die **Wärmeproduktionsraten** und die Eigenschaften relevant, welche den **Wärmetransport** in den technischen und natürlichen Barrieren bestimmen. Im HAA-Lager sind die Wärmeleistungen über einen längeren Zeitraum erhöht und führen zu einer Temperatur-Erhöhung in der Bentonitverfüllung und im Wirtgestein sowie zu Porenwasser-Überdrücken im Wirtgestein. Die Ergebnisse der Modellrechnungen zeigen, dass die erwarteten Temperaturen in der Bentonitverfüllung und im Wirtgestein die kritischen Temperaturen für irreversible Prozesse der Mineralumwandlung nicht übersteigen (Kap. 5.1.2 in Nagra 2024i). Der Fokus der Beurteilung liegt deshalb auf den Porenwasser-Überdrücken im Wirtgestein, welche mit dem Indikator «Thermisch bedingte Porenwasser-Überdrücke im WG» erfasst werden (Kap. A.7.2).
- Für die Beurteilung der Auswirkungen der gasbedingten Einflüsse sind vor allem die **Gasproduktionsraten** und die Eigenschaften relevant, welche die **Gasspeicherung** und den **Gastransport** in den technischen und natürlichen Barrieren bestimmen. Diese Aspekte werden mit dem Indikator «Gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG» erfasst (Kap. A.7.3).
- **Chemische Wechselwirkungen** im Wirtgestein (z. B. mineralogische Umwandlungsprozesse im Zusammenspiel mit gelöstem Zement oder Korrosionsprodukten) bleiben auf das unmittelbar angrenzende Wirtgestein (im Zentimeterbereich) begrenzt (Kap. 7.1.1 in Nagra 2024j). Für den Standortvergleich spielen chemische Wechselwirkungen im Wirtgestein deswegen keine Rolle.

Damit der Fokus im sicherheitstechnischen Vergleich auf den geologischen Standorteigenschaften liegt, sind die Grundzüge der Lagerauslegung in allen Standortgebieten vergleichbar.

Kap. A.7.4 enthält eine Zusammenfassung der für das Kriterium 2.3 «Lagerbedingte Einflüsse» im Kontext der Etappe 3 beurteilten Aspekte und der dafür verwendeten Indikatoren und Bewertungsskalen.

Kriterium	2.3 Lagerbedingte Einflüsse
Zu beurteilende Aspekte	Beurteilt werden die Auswirkungen des Lagers auf das Wirtgestein (Gasentwicklung der Abfälle und Gastransport, Wärmeeintrag und Wärmeempfindlichkeit, thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelte Prozesse, chemische Wechselwirkungen, Ausbildung der Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten, Reversibilität der Veränderungen, Selbstabdichtungsvermögen). Dabei sind das einzulagernde Abfallinventar und das dafür vorgesehene Lagerkonzept (z. B. Auslegung des Lagers, Materialwahl für die technischen Barrieren) zu berücksichtigen.
Relevanz für die Sicherheit	Günstig sind Wirtgesteine, bei welchen lagerinduzierte Prozesse zu keiner wesentlichen Beeinträchtigung ihrer Barrierenwirkung führen. Günstig sind Gesteine, die ein Selbstabdichtungsvermögen von Rissen und Klüften aufweisen und die im Bereich der zu erwartenden Temperaturen wenig wärmeempfindlich bezüglich ihrer hydraulischen, stofflichen und felsmechanischen Eigenschaften sind.

Fig. A-7: Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 2.3 «Lagerbedingte Einflüsse»

A.7.1 Länge des Freisetzungspfads im intakten WG

Begründung des Indikators (Relevanz für Langzeitsicherheit)

Die Ausbildung einer Auflockerungszone beim Bau und Betrieb der Lagerkammern kann das Transportverhalten der Radionuklide in der natürlichen Barriere beeinflussen. Dabei spielt die Verkürzung des Radionuklid-Freisetzungspfads im intakten Wirtgestein eine wichtige Rolle. Ein günstiges Verhältnis aus Mindest-Transportpfadlänge und verkürzter Transportpfadlänge im intakten Wirtgestein gewährleistet den langfristigen Erhalt der Barriereigenschaften im Wirtgestein.

Definition der Beurteilungsmethodik

Objekt der Beurteilung ist das Wirtgestein, da sich die Ausdehnung der Auflockerungszone auf das unmittelbar an die Lagerkammern angrenzende Gestein beschränkt. Die Beurteilung des Indikators «Länge des Freisetzungspfads im intakten WG» stützt sich auf Ergebnisse von probabilistischen Modellrechnungen zum felsmechanischen Systemverhalten beim Bau der Lagerkammern und auf felsmechanische Experimente (Kap. 5.1.1 in Nagra 2024i). Die Modellrechnungen erfassen alle Prozesse, welche zur Bildung einer Auflockerungszone im angrenzenden Gestein und damit zu einer Verkürzung des Radionuklidfreisetzungspfads im intakten Wirtgestein führen.

Für die Beurteilung der Ausdehnung der Auflockerungszone wird die *normierte* Länge des Radionuklid-Transportpfads im intakten Wirtgestein verwendet (Kennzahl RPL, «reduced path length in the intact host rock»). Die Kennzahl ist gleich dem Quotienten aus Mindest-Transportpfadlänge und verkürzter Transportpfadlänge im intakten Wirtgestein. Als *Mindest-Transportpfadlänge* wurden 35 m für HAA und 20 m für SMA berücksichtigt (unter Vernachlässigung der Beiträge der Rahmengesteine zur Barrierewirkung, vgl. Kap. 5.1.1 in Nagra 2024i). Für diese Werte wird das Schutzkriterium von 0.1 mSv/a deutlich unterschritten. Die *verkürzte Transportpfadlänge* entspricht der halben Mächtigkeit des Opalinustons abzgl. Radius der Lagerkammer, Mächtigkeit der EDZ sowie – bei SMA – eines weiteren Abzugs aufgrund der horizontalen Ausrichtung der Lagerkavernen in fallender Schichtneigung des Opalinustons (Kap. 5.1.1 in Nagra 2024i).

Definition Bewertungsskala

Die Bewertungsstufe *sehr günstig* wird erreicht, wenn $RPL \leq 0.7$. In diesem Bereich beträgt die Mindest-Transportpfadlänge weniger als 70 % der verkürzten Transportpfadlänge im intakten Wirtgestein. Für *günstig* gilt $0.7 < RPL \leq 0.9$.

Die Bewertungsskala ist für HAA und SMA identisch. Die Bewertungsstufen *bedingte günstig* und *ungünstig* werden für die Beurteilung der drei Standortgebiete in Etappe 3 nicht benötigt.

A.7.2 Thermisch bedingte Porenwasser-Überdrücke im WG

Begründung des Indikators (Relevanz für Langzeitsicherheit)

Die Wärmeproduktion im Tiefenlager kann die mechanische Integrität des EG und das Transportverhalten der Radionuklide in den technischen und natürlichen Barrieren beeinflussen. Dabei spielen thermische Porenwasser-Überdrücke eine wichtige Rolle. Die Begrenzung solcher thermisch bedingter Prozesse gewährleistet den langfristigen Erhalt der Barriereigenschaften im Wirtgestein.

Definition der Beurteilungsmethodik

Objekt der Beurteilung beim Indikator «Thermisch bedingte Porenwasser-Überdrücke im WG» ist das Wirtgestein, da sich die höchsten Temperaturen in den Lagerkammern und im angrenzenden Gestein einstellen und nach aussen hin kontinuierlich abnehmen.

Die Beurteilung des Indikators «Thermisch bedingte Porenwasser-Überdrücke im WG» stützt sich auf probabilistische Modellrechnungen zum Systemverhalten unter dem Einfluss der im HAA-Lager produzierten Wärme (Kap. 5.1.2 in Nagra 2024i). Die Modellrechnungen erfassen alle Prozesse, welche die Temperatur in der Bentonitverfüllung und im Wirtgestein beeinflussen und welche zu thermisch bedingten Porenwasser-Überdrücken im Wirtgestein führen könnten.

Die thermisch bedingten Porenwasser-Überdrücke werden an einem repräsentativen Punkt im Wirtgestein erfasst, in vorliegendem Fall 20 m oberhalb eines HAA-Lagerstollens in der Mitte des Lagerfelds. Für die Beurteilung wird die Kennzahl FPI («Failure potential of intact host rock») verwendet, welche die berechneten thermisch bedingten Porenwasserdrücke ins Verhältnis zum definierten Grenzdruck setzt. Der Grenzdruck hängt ab von den standortspezifischen Gebirgsverhältnissen (insb. Gebirgsspannungen in Lagertiefe) und den felsmechanischen Eigenschaften des Wirtgesteins (insb. Festigkeiten, Steifigkeit). Bei Überschreiten des Grenzdrucks kann eine Bildung von thermisch bedingten Rissen im intakten Gestein nicht mehr ausgeschlossen werden (Kap. 5.1.2 in Nagra 2024i). In Kriterium 2.3 wird die Kennzahl FPI für den Referenzfall betrachtet.

Definition Bewertungsskala

Die Bewertungsstufe *sehr günstig* wird erreicht, wenn $FPI \leq 0.7$. In diesem Bereich beträgt der erwartete thermisch bedingte Porenwasser-Überdruck höchstens 70 % des Grenzdrucks, ab welchem eine Bildung von thermisch bedingten Rissen im Opalinuston nicht mehr ausgeschlossen werden kann (grosse Sicherheitsmarge). Eine Situation wird als *günstig* eingestuft, wenn $FPI \leq 1$, d. h. wenn der Grenzdruck nicht überschritten wird (kleine Sicherheitsmarge). Ab $FPI > 1$ wird die Situation als *bedingt günstig* eingestuft, weil die Bildung von thermisch bedingten Spannungsrissen im Wirtgestein nicht mehr ausgeschlossen werden kann und Anpassungen an der Lagerauslegung zu erwägen wären.

Die Bewertungsskala ist für HAA und SMA identisch. Die Bewertungsstufe *ungünstig* wird für die Beurteilung der drei Standortgebiete in Etappe 3 nicht benötigt.

A.7.3 Gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG

Begründung des Indikators (Relevanz für Langzeitsicherheit)

Die Gasproduktion im Tiefenlager kann die mechanische Integrität des EG und das Transportverhalten der Radionuklide in den technischen und natürlichen Barrieren beeinflussen. Dabei spielen gasbedingte Porenwasser-Überdrücke eine wichtige Rolle. Die Begrenzung solcher gasbedingter Prozesse gewährleistet den langfristigen Erhalt der Barriereigenschaften im Wirtgestein.

Definition der Beurteilungsmethodik

Objekt der Beurteilung beim Indikator «Gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG» ist das Wirtgestein, da sich die höchsten Gasdrücke in den Lagerkammern und im angrenzenden Gestein einstellen und nach aussen hin kontinuierlich abnehmen.

Die Beurteilung des Indikators «Gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG» stützt sich auf probabilistische Modellrechnungen zum Systemverhalten unter dem Einfluss von im Tiefenlager produzierten Gasen und auf Felslaborexperimente (Kap. 5.1.3 in Nagra 2024i). Die Modellrechnungen erfassen alle Prozesse, welche zu gasbedingten Überdrücken in den Lagerkammern und im angrenzenden Gestein führen könnten.

Die gasbedingten Überdrücke werden an einem repräsentativen Punkt in der Verfüllung der Lagerkammer erfasst (z. B. für HAA: in der Mitte der Bentonitverfüllung oberhalb eines Endlagerbehälters). Für die Beurteilung wird die Kennzahl FPI («Failure potential of intact host rock») verwendet, welche die gasbedingten Überdrücke ins Verhältnis zum definierten Grenzdruck setzt. Der Grenzdruck hängt von den standortspezifischen Gebirgsverhältnissen (insb. Gebirgsspannungen in Lagertiefe) und den felsmechanischen Eigenschaften des Wirtgesteins (insb. Festigkeiten, Steifigkeit) ab. Bei Überschreiten des Grenzdrucks kann eine Bildung von Gaspfaden im intakten Gestein nicht mehr ausgeschlossen werden (Kap. 5.1.3 in Nagra 2024i). In Kriterium 2.3 wird die Kennzahl FPI für den Referenzfall betrachtet.

Definition Bewertungsskala

Die Bewertungsstufe *sehr günstig* wird erreicht, wenn $FPI \leq 0.7$. In diesem Bereich beträgt der gasbedingte Überdruck höchstens 70 % des definierten Grenzdrucks, ab welchem eine Bildung von Gaspfaden im Opalinuston nicht mehr ausgeschlossen werden kann (grosse Sicherheitsmarge). Eine Situation wird als *günstig* eingestuft, wenn $FPI \leq 1$, d. h. wenn der Grenzdruck nicht überschritten wird (kleine Sicherheitsmarge). Ab $FPI > 1$ wird die Situation als *bedingt günstig* eingestuft, weil die Bildung von gasbedingten Spannungsrissen im Wirtgestein nicht mehr ausgeschlossen werden kann und Anpassungen an der Lagerauslegung zu erwägen wären.

Die Bewertungsskala ist für HAA und SMA identisch. Die Bewertungsstufe *ungünstig* wird für die Beurteilung der drei Standortgebiete in Etappe 3 nicht benötigt.

A.7.4 Zusammenfassung

Tab. A-7 enthält eine Zusammenfassung der für das Kriterium 2.3 «Lagerbedingte Einflüsse» im Kontext der Etappe 3 beurteilten Aspekte und der dafür verwendeten Indikatoren und Bewertungsskalen.

Tab. A-7: Zu beurteilende Aspekte und verwendete Indikatoren mit ihren Bewertungsskalen für das SGT-Kriterium 2.3 «Lagerbedingte Einflüsse»

Kriterien / zu beurteilende Aspekte	Indikatoren	Kennzahl	Bewertungsskala HAA	Bewertungsskala SMA
2.3 Lagerbedingte Einflüsse				
Auflockerungszone	Länge des Freisetzungspfads im intakten Wirtgestein	RPL (normierte Länge des RN-Transportpfads im intakten Wirtgestein)	<i>sehr günstig</i> : $RPL \leq 0.7$ <i>günstig</i> : $0.7 < RPL \leq 0.9$ <i>bedingt günstig / ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	
Thermisch bedingte Effekte im EG	Thermisch bedingte Porenwasser-Überdrücke im WG	FPI (Failure potential for intact host rock) für den Referenzfall	<i>sehr günstig</i> : $FPI \leq 0.7$ <i>günstig</i> : $0.7 < FPI \leq 1$ <i>bedingt günstig</i> : $FPI > 1$ <i>ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	
Gasbedingte Effekte im EG	Gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG			

A.8 Nutzungskonflikte (Kriterium 2.4)

Die SGT-Vorgaben für das Kriterium «Nutzungskonflikte» sind in Fig. A-8 wiedergegeben. Ein Nutzungskonflikt entsteht einerseits, wenn die Nutzung von vorhandenen Ressourcen durch das Tiefenlager verunmöglicht wird, oder wenn eine erhebliche Wahrscheinlichkeit des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Tiefenlager bzw. eine Verletzung des Barrierensystems durch menschliche Aktivität besteht. Die zu beurteilenden Aspekte werden folgendermassen adressiert:

- Für die Beurteilung allfälliger Nutzungskonflikte mit **Rohstoffvorkommen** werden Situationen betrachtet, in denen das Wirtgestein selbst ein nutzungswürdiger Rohstoff ist, oder wenn nutzungswürdige Rohstoffe ober- oder unterhalb des Wirtgesteins vorkommen.
- Bei der Beurteilung allfälliger Nutzungskonflikte mit **geothermischen und weiteren energiebezogenen Nutzungen des Untergrunds** liegt der Fokus auf Gesteinsschichten unterhalb des Wirtgesteins, aus denen sich Wärme entziehen lässt oder die sich für die Speicherung von Erdgas oder CO₂ eignen.
- Für die Beurteilung allfälliger Nutzungskonflikte im Zusammenhang mit **Mineralquellen und Thermen** wird geprüft, ob in den potenziellen Lagerzonen Quellen mit Nutzungspotenzial vorhanden sind.

Um aus Sicht der Langzeitsicherheit allfällige Situationen zu identifizieren, in denen nutzungswürdige Ressourcen in einem besonderen Masse vorkommen, wird für alle Indikatoren eine einheitliche Beurteilungsmethodik und Bewertungsskala angewandt: Gemäss SGT (BFE 2008) und im Einklang mit den ENSI-Vorgaben zur SGT-Etappe 3 (ENSI 2018) werden allfällige Ressourcenvorkommen anhand des Nutzungspotenzials aus heutiger Sicht eingeschätzt und bewertet (Fig. A-9): Für die Identifikation des *Nutzungspotenzials* wird geprüft, ob eine Ressource vorkommt und ob das allfällige Vorkommen aus heutiger Sicht wirtschaftlich nutzungswürdig ist. Dabei werden aktive Nutzungen und geplante oder laufende Explorationsvorhaben mitbetrachtet. Weiter wird geprüft, ob die Ressourcenvorkommen in *einem für die Schweiz besonderen Masse* vorhanden sind.

Kriterium	2.4 Nutzungskonflikte
Zu beurteilende Aspekte	Beurteilt werden die nutzungswürdigen Rohstoffe und die sich daraus allfällig ergebenden Nutzungskonflikte. Insbesondere wird beurteilt, ob im oder unterhalb des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches aus heutiger Sicht wirtschaftlich nutzungswürdige Rohstoffe (z. B. Salz, Kohlenwasserstoffe, Geothermie, Mineralquellen und Thermen) im besonderen Masse vorkommen. Beurteilt wird ferner, ob die Erschliessung und Nutzung der Rohstoffe die Barrierenwirkung des Wirtgesteins beeinträchtigen (Schichtverletzung) oder das Lager direkt treffen könnte.
Relevanz für die Sicherheit	Günstig ist, wenn keine Rohstoffe, deren Nutzung die Barrierenwirkung des Wirtgesteins signifikant beeinträchtigen würde, in besonderem Masse innerhalb des Standortgebietes vorkommen.

Fig. A-8: Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 2.4 «Nutzungskonflikte»

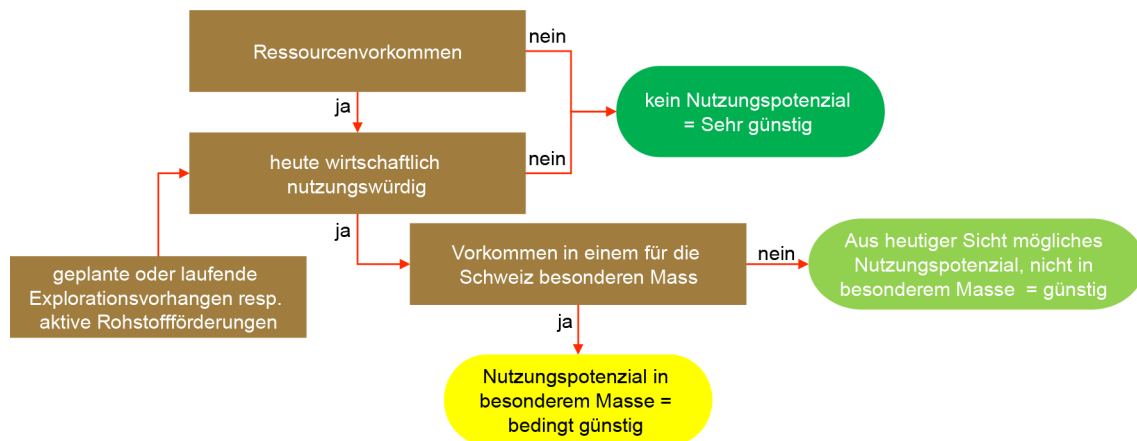


Fig. A-9: Schematische Darstellung zur qualitativen Beurteilung des Nutzungspotenzials für das SGT-Kriterium 2.4 «Nutzungskonflikte»

Als *sehr günstig* wird eine Situation eingestuft, in der kein Nutzungspotenzial identifiziert wurde. Dies ist der Fall, wenn entweder keine Ressourcenvorkommen bekannt sind oder wenn solche aus heutiger Sicht wirtschaftlich nichtutzungswürdig sind.

Als *günstig* wird eine Situation eingestuft, in der aus heutiger Sicht ein mögliches Nutzungspotenzial besteht, die Ressource aber nicht in einem für die Schweiz besonderen Masse vorkommt. Dies bedeutet, dass Ressourcen auch anderweitig wirtschaftlich genutzt und Nutzungskonflikte mit dem geologischen Tiefenlager vermieden werden können.

Die Bewertungsskala ist für HAA und SMA identisch. Sie wurde entsprechend der Beurteilungsmethodik in Etappe 3 gegenüber derjenigen aus Etappe 2 angepasst und für alle Indikatoren vereinheitlicht. Die Bewertungsstufen *bedingt günstig* und *ungünstig* für ein Nutzungspotenzial in besonderem Masse werden für die Beurteilung der drei Standortgebiete in Etappe 3 nicht benötigt.

In folgenden Kapiteln werden die Indikatoren weiter spezifiziert:

- «Rohstoffvorkommen oberhalb / innerhalb / unterhalb des WG» (Kap. A.8.1).
- «Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds» (Kap. A.8.2).
- «Mineral- und Thermalwassernutzungen» (Kap. A.8.3).

Kap. A.8.4 enthält eine Zusammenfassung der für das Kriterium 2.4 «Nutzungskonflikte» im Kontext der Etappe 3 beurteilten Aspekte und der dafür verwendeten Indikatoren und Bewertungsskalen.

A.8.1 Rohstoffvorkommen

Begründung der Indikatoren (Relevanz für Langzeitsicherheit)

Sondierbohrungen und der Abbau von Rohstoffen können die Barrierewirkung direkt oder indirekt beeinträchtigen, beispielsweise durch Reduktion der Überdeckung, durch Eindringen in den EG oder in das Lager selbst, oder durch induzierte Bewegungen.

Definition der Beurteilungsmethodik

Objekt bei der Beurteilung von Rohstoffvorkommen ist der ganze Gesteinsstapel in der potenziellen Lagerzone. Damit werden alle Rohstoffvorkommen berücksichtigt, deren Nutzung die Barrierewirkung des EG potenziell beeinträchtigen könnten. Die Beurteilung erfolgt getrennt für Rohstoffvorkommen ober-, inner- und unterhalb des Wirtgesteins.

Die Beurteilung der Rohstoffvorkommen erfolgt gemäss der einleitend beschriebenen Methodik (Kap. A.8).

Definition Bewertungsskala

Die Bewertung der Rohstoffvorkommen erfolgt gemäss der einleitend beschriebenen Skala (Kap. A.8).

A.8.2 Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrundes

Begründung des Indikators (Relevanz für Langzeitsicherheit)

Bohrungen für die Exploration oder die Nutzung von Erdwärme oder zur Speicherung von CO₂- und Erdgas können zu einer Verletzung des Barrierensystems führen.

Definition der Beurteilungsmethodik

Objekt bei der Beurteilung des Potenzials für Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen ist der ganze Gesteinsstapel in der potenziellen Lagerzone. Damit werden alle Ressourcen berücksichtigt, deren Nutzung die Barrierewirkung des EG potenziell beeinträchtigen könnten.

Die Beurteilung dieser Ressourcen erfolgt gemäss der einleitend beschriebenen Methodik (Kap. A.8).

Definition Bewertungsskala

Die Bewertung dieser Ressourcen erfolgt gemäss der einleitend beschriebenen Skala (Kap. A.8).

A.8.3 Mineral- und Thermalwassernutzungen

Begründung des Indikators (Relevanz für Langzeitsicherheit)

Bohrungen für die Exploration und Nutzung von Mineral- und Thermalwasser können zu einer Verletzung des Barrierensystems führen.

Definition der Beurteilungsmethodik

Objekt bei der Beurteilung des Potenzials von Mineral- und Thermalwassernutzungen ist der ganze Gesteinsstapel in der potenziellen Lagerzone. Damit werden alle Mineral- und Thermalwassernutzungen berücksichtigt, deren Nutzung die Barrierewirkung des EG potenziell beeinträchtigen könnten. Beurteilt wird, ob in den potenziellen Lagerzonen Quellen mit Nutzungspotenzial, resp. ob und in welchem Ausmass wirtschaftlich nutzungswürdige Mineral- oder Thermalwässer vorhanden sind.

Die Beurteilung dieser Ressourcen erfolgt gemäss der einleitend beschriebenen Methodik (Kap. A.8).

Definition Bewertungsskala

Die Bewertung dieser Ressourcen erfolgt gemäss der einleitend beschriebenen Skala (Kap. A.8).

A.8.4 Zusammenfassung

Tab. A-8 enthält eine Zusammenfassung der für das Kriterium 2.4 «Nutzungskonflikte» im Kontext der Etappe 3 beurteilten Aspekte und der dafür verwendeten Indikatoren und Bewertungsskalen.

Tab. A-8: Zu beurteilende Aspekte und verwendete Indikatoren mit ihren Bewertungsskalen für das SGT-Kriterium 2.4 «Nutzungskonflikte»

Kriterien / zu beurteilende Aspekte	Indikatoren	Qualitatives Merkmal	Bewertungsskala HAA	Bewertungsskala SMA
2.4 Nutzungskonflikte				
Nutzungswürdige Rohstoffe	Rohstoffvorkommen • oberhalb WG • innerhalb WG • unterhalb WG (3 Indikatoren)	Nutzungspotenzial von Rohstoffen in der potenziellen Lagerzone	<i>sehr günstig</i> : kein identifiziertes Nutzungspotenzial <i>günstig</i> : mögliches Nutzungspotenzial, aber nicht in einem für die Schweiz besonderen Masse <i>bedingt günstig / ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	
Nutzungswürdige Ressourcen (Geothermie und weitere energiebezogene Ressourcen)	Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds	Nutzungspotenzial für Geothermie, CO ₂ - und Erdgas-speicherung in der potenziellen Lagerzone		
Mineralquellen und Thermen	Mineral- und Thermalwassernutzungen	Nutzungspotenzial für Mineral- und Thermalwasser in der potenziellen Lagerzone		

A.9 Charakterisierbarkeit der Gesteine (Kriterium 3.1)

Die SGT-Vorgaben für das Kriterium «Charakterisierbarkeit der Gesteine» sind in Fig. A-10 wiedergegeben. Beurteilt wird die Charakterisierbarkeit der Gesteinsabfolgen im EG im Hinblick auf die Rückhaltewirkung des EG. Somit wird auch die Zuverlässigkeit der entsprechenden Aussagen aus Kriteriengruppe 1 (insbesondere hinsichtlich Kr 1.3 und 1.4) bewertet. Die zu beurteilenden Aspekte werden folgendermassen adressiert::

- Die Auswirkungen nicht reduzierbarer Ungewissheiten bzgl. der standortspezifischen Ausprägung der **Fazies-Variabilität** und der **sicherheitsrelevanten Strömungs- und Transporteigenschaften** des Opalinustons auf die Rückhaltewirkung des EG werden mit dem Indikator «Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften im Opalinuston» erfasst.
- Die Auswirkungen nicht reduzierbarer Ungewissheiten bzgl. der standortspezifischen Ausprägung der **Fazies-Variabilität** und der **sicherheitsrelevanten Strömungs- und Transporteigenschaften** der Rahmengesteine auf die Rückhaltewirkung des EG werden mit dem Indikator «Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften in den Rahmengesteinen» separat erfasst.

Da den beiden Indikatoren dieselbe Bewertungsmethodik zugrunde gelegt wird, werden sie nachfolgend zusammen begründet (Kap. A.9.1).

Kap. A.9.2 enthält eine Zusammenfassung der für das Kriterium 3.1 «Charakterisierbarkeit der Gesteine» im Kontext der Etappe 3 beurteilten Aspekte und der dafür verwendeten Indikatoren und Bewertungsskalen.

Kriterium	3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt werden die Möglichkeiten der Charakterisierung der Beschaffenheit des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches und der Erfassung der sicherheitsrelevanten Gesteinseigenschaften (Homogenität/Heterogenität der Gesteinsbeschaffenheit, Existenz und Art der Architekturelemente, Variabilität der sicherheitsrelevanten Eigenschaften). Es wird geprüft, ob die benötigten Daten mit genügender Zuverlässigkeit gewonnen werden können.
<i>Relevanz für die Sicherheit</i>	Günstig ist, wenn die Wirtgesteinseigenschaften möglichst homogen sind und ohne übermässig destruktive Untersuchungen ermittelt werden können (keine wesentliche Beeinträchtigung der Barrierenwirkung des Wirtgesteins durch Schicht verletzende Untersuchungen). Für die Beurteilung ist es vorteilhaft, wenn relevante Erfahrungen und Kenntnisse über das Wirtgestein oder über vergleichbare Gesteine national und international bereits vorhanden sind.

Fig. A-10: Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 3.1 «Charakterisierbarkeit der Gesteine»

A.9.1 Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften im Opalinuston / in den Rahmengesteinen

Begründung des Indikators (Relevanz für Langzeitsicherheit)

Die Variabilität der Transporteigenschaften im EG und die Möglichkeiten für ihre zuverlässige Erfassung (Charakterisierbarkeit) beeinflussen die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen zur Barrierewirkung der Gesteinsabfolgen im EG und damit auch die Belastbarkeit der Aussagen zur Langzeitsicherheit.

Definition der Beurteilungsmethodik

Die Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften im Opalinuston und in den Rahmengesteinen wird mittels separater Indikatoren betrachtet. In beiden Fällen wird der Einfluss auf die Barrierewirkung des EG analysiert, Objekt der Beurteilung ist somit für beide Indikatoren der EG.

Die Beurteilung der beiden Indikatoren zu den Auswirkungen der Variabilität im Opalinuston und in den Rahmengesteinen stützt sich auf Ergebnisse von probabilistischen Modellrechnungen zum Stofffrachtaustrag aus dem EG für einen konservativen Tracer (Kap. 5.2.1 in Nagra 2024i). Die Modellrechnungen erfassen die Variabilität der wichtigsten Transporteigenschaften im EG, insb. die effektiven Diffusionskoeffizienten. Für die Beurteilung wird die Kennzahl NTF («Normierte Tracer-Freisetzung») verwendet, welche den Stofffrachtaustrag aus dem EG ins Verhältnis zur Freisetzungsrate des Tracers aus den Endlagerbehältern setzt. Die Kennzahl NTF wird nur für die EG HAA berechnet; als konservativer Tracer wird das Radionuklid ^{129}I betrachtet. Die NTF für die EG SMA fallen deutlich kleiner aus als für die EG HAA, weshalb auf eine detaillierte Analyse verzichtet wird.

Für die Bewertung wird der 95-Perzentilwert (P95) der Kennzahl NTF betrachtet (auch als $\text{NTF}_{95\%}$ bezeichnet). Der P95-Wert wird in 5 % der Rechenfälle übertroffen bzw. in 95 % der Rechenfälle unterschritten. Er wird als pessimistischer (oberer) Eckwert der Bandbreite des Stofffrachtaustrags interpretiert.

Definition Bewertungsskala

Die Bewertungsstufe *sehr günstig* wird dann erreicht, wenn $\text{NTF} \leq 0.001$. Diese Stofffrachten entsprechen Dosisraten, die mehr als drei Größenordnungen unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/a liegen. Die Bewertungsstufe *günstig* gilt für $0.001 < \text{NTF} \leq 0.01$ (Dosisraten mindestens zwei Größenordnungen unterhalb des Schutzkriteriums).

Die Bewertungsskala ist für HAA und SMA identisch. Die Bewertungsstufen *bedingt günstig* und *ungünstig* werden in Etappe 3 nicht verwendet.

A.9.2 Zusammenfassung

Tab. A-9 enthält eine Zusammenfassung der für das Kriterium 3.1 «Charakterisierbarkeit der Gesteine» im Kontext der Etappe 3 beurteilten Aspekte und des dafür verwendeten Indikators und Bewertungsskala.

Tab. A-9: Zu beurteilende Aspekte und verwendeter Indikator mit Bewertungsskala für das SGT-Kriterium 3.1 «Charakterisierbarkeit der Gesteine»

Kriterien / zu beurteilende Aspekte	Indikatoren	Kennzahl	Bewertungsskala HAA	Bewertungsskala SMA
3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine				
Auswirkungen von nicht reduzierbaren Ungewissheiten bzgl. der standortspezifischen Ausprägung der Fazies-Variabilität und der sicherheitsrelevanten Strömungs- und Transporteigenschaften des Opalinustons und der Rahmengesteine	Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften im Opalinuston	Normierter Stofffrachtaustrag aus dem EG (NTF): P95-Wert der berechneten Bandbreite	<i>sehr günstig</i> : $NTF \leq 0.001$ <i>günstig</i> : $0.001 < NTF \leq 0.01$ <i>bedingt günstig / ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	
	Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften in den Rahmengesteinen			

A.10 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (Kriterium 3.2)

Die SGT-Vorgaben für das Kriterium «Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse» sind in Fig. A-11 wiedergegeben. Beurteilt wird die Robustheit der Aussagen zu den räumlichen geologischen Verhältnissen in Anbetracht der verbleibenden, mit erdwissenschaftlichen Untersuchungen nicht reduzierbaren Ungewissheiten. Die zu beurteilenden Aspekte werden folgendermassen adressiert:

- Die **Zugänglichkeit für Untersuchungen von der Erdoberfläche aus** ist in allen Standortgebieten gegeben: Die angestrebten Untersuchungen konnten erfolgreich durchgeführt werden. Es liegt für alle potenziellen Lagerzonen eine standortspezifische Datengrundlage vor und die Daten weisen generell eine hohe Qualität auf.
- Die **räumlichen geologischen Verhältnisse** in den potenziellen Lagerzonen konnten zum Zweck des sicherheitstechnischen Vergleichs ausreichend gut exploriert werden, dies auch in Zonen mit reduzierter Abbildungsqualität (Kap. 5.1 in: (Nagra 2024a), (Nagra 2024b), (Nagra 2024c)). Die Relevanz der verbleibenden nicht reduzierbaren Ungewissheiten hinsichtlich diverser Kriterien wird in Kap. 4.3.2 betrachtet.
- Eine mit erdwissenschaftlichen Untersuchungen nicht mehr weiter reduzierbare Ungewissheit zur **räumlichen Konstanz der lithologischen Beschaffenheit** verbleibt hinsichtlich der hydrogeologischen Ausprägung des Keuper-Aquifers (Kap. 4.5.3 in Nagra 2024h). Da der Keuper-Aquifer die EG im Liegenden begrenzt, wird der Einfluss dieser Ungewissheit auf die Geometrie (Mächtigkeit) der EG mit dem Indikator «Auswirkungen der Ungewissheiten zu den EG-begrenzenden Aquiferen» erfasst (Kap. A.10.1).

Kriterium	3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt werden die geologisch-tektonische Komplexität und die Explorierbarkeit der räumlichen geologischen Verhältnisse (Lagerungsverhältnisse, Ausdehnung und Kontinuität der Schichten, räumliche Konstanz der lithologischen Beschaffenheit, Wirtgesteinsgrenzen, Lage von regionalen Störungszonen, kleinräumige Störungen, etc.). Massgebend ist auch die Zugänglichkeit für Untersuchungen von der Erdoberfläche aus (Quartärbedeckung, topographische Verhältnisse, dichte Besiedlung, Bewaldung etc.).
<i>Relevanz für die Sicherheit</i>	Günstig ist, wenn die Lagerungsverhältnisse und die Geometrie des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs einfach und von der Erdoberfläche aus gut explorierbar sind (z. B. mit Reflexionsseismik). Günstig ist, wenn die Beobachtungen bzw. Untersuchungen der sicherheitsrelevanten Eigenschaften räumlich inter- und extrapolierbar sind. Günstig ist auch, wenn keine erschwerenden Verhältnisse an der Erdoberfläche vorliegen (z. B. mächtige Quartärablagerungen, schwierige Topographie, ausgedehnte dichte Siedlungsräume, dichte Bewaldung).

Fig. A-11: Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 3.2 «Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse»

A.10.1 Auswirkungen der Ungewissheiten zu den EG-begrenzenden Aquifere

Begründung des Indikators (Relevanz für Langzeitsicherheit)

Die Möglichkeiten der zuverlässigen Erfassung der Aquifere (Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse) beeinflussen die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen zur Barrierewirkung im EG und damit auch die Belastbarkeit der Aussagen zur Langzeitsicherheit.

Definition der Beurteilungsmethodik

Objekt der Beurteilung sind die EG-begrenzenden Aquifere. Im Fokus der Betrachtung stehen konzeptuelle Ungewissheiten in der Konstanz der lithologischen Beschaffenheit dieser Aquifere.

Analysiert wird das Potenzial für zusätzliche Rahmengesteine. Als Kennzahl wird die über die laterale Ausdehnung des EG und die Platzreserven gemittelte vertikale Mächtigkeit des potenziell erweiterten EG betrachtet (in m, analog wie in Kriterium 1.1). Der Rangierung wird nur die Mächtigkeit der potenziell zusätzlichen Rahmengesteine zugrunde gelegt, um eine Doppelbewertung mit Kriterium 1.1 zu vermeiden.

Definition Bewertungsskala

Die Bewertungsskala ist identisch wie in Kriterium 1.1.

A.10.2 Zusammenfassung

Tab. A-10 enthält eine Zusammenfassung der für das Kriterium 3.2 «Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse» im Kontext der Etappe 3 beurteilten Aspekte und des dafür verwendeten Indikators und Bewertungsskala.

Tab. A-10: Zu beurteilende Aspekte und verwendeter Indikator mit Bewertungsskala für das SGT-Kriterium 3.2 «Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse»

Kriterien / zu beurteilende Aspekte	Indikator	Kennzahl	Bewertungsskala HAA	Bewertungsskala SMA
3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse				
Vertikale Ausdehnung des EG	Auswirkungen der Ungewissheiten zu den EG-begrenzenden Aquiferen	Mächtigkeit EG über den Bereich des EG und der Platzreserven gemittelt (in m), mit potenziell zusätzlichen uRG	Identisch wie bei Indikator «Mächtigkeit EG» in Kriterium 1.1	

A.11 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen (Kriterium 3.3)

Die SGT-Vorgaben für das Kriterium «Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen» sind in Fig. A-12 wiedergegeben. Die zu beurteilenden Aspekte werden folgendermassen adressiert:

Diskutiert wird die Langzeitentwicklung der Nordschweiz in Kap. 6 in Nagra (2024h). Der Einfluss vieler Entwicklungen (z.B. Hydrogeologie und Hydrochemie) auf die Barrierewirkung bleibt über den Betrachtungszeitraum klein (Kap. 6.5 und 6.6.1 in 2024h). Einige der zu beurteilenden Aspekte sind denn aufgrund der ausgereiften Datenbasis bereits in die Beurteilung der KG 1 und 2 eingeflossen (z.B. Seismizität, unabhängige Evidenzen, siehe Anhang B für Projektunterschiede zur Etappe 2). Für andere Aspekte (z.B. Effekte der zukünftigen tektonischen Entwicklung auf die Barrierewirkung) ist die Prognostizierbarkeit zwischen den Standortgebieten vergleichbar mit der Bewertung in KG 1 oder 2 abgedeckt: So wird z.B. für alle Standortgebiete erwartet, dass eine allfällige Reaktivierung bevorzugt an regionalen Störungszonen erfolgt (Kap. 6.2.4 in Nagra 2024h). Sollte es zu einer zukünftigen Neubildung von Störungen im EG kommen, dürften deren Länge und Versätze in allen Standortgebieten eher klein ausfallen (Kap. 6.2.4 in Nagra 2024h) und das Selbstabdichtungsvermögen der tonmineralreichen Gesteine in allen EG ausreichend wirksam sein (siehe Kriterium 2.1, Kap. 4.2.1.2; und Kap. 5.7 in Nagra 2024h).

In Kriterium 3.3 mittels Indikatoren bewertet wird die Robustheit der in den Kriterien 2.2 und 2.3 gemachten Aussagen zu folgenden Aspekten der Langzeitveränderungen:

- Nicht reduzierbare Ungewissheiten hinsichtlich Prognostizierbarkeit der Auswirkungen der **geologischen Langzeitentwicklungen** (insb. die Auswirkungen der Klimaentwicklung und der Erosion) werden mit dem bereits in Kriterium 2.2 (vgl. Anhang A.6) eingesetzten Indikator «Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte» erfasst (Kap. A.11.1)
- Nicht reduzierbare Ungewissheiten hinsichtlich der Auswirkungen von **lagerbedingten Einflüssen** auf die Barrierewirkung unter **pessimistischen Annahmen zu Gesteinseigenschaften** werden mit den bereits in Kriterium 2.3 (vgl. Anhang A.7) eingesetzten Indikatoren «Gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG» und «Thermisch bedingte Porenwasser-Überdrücke im WG» erfasst (Kap. A.11.2).

Kap. A.11.3 enthält eine Zusammenfassung der für das Kriterium 3.3 «Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen» im Kontext der Etappe 3 beurteilten Aspekte und der dafür verwendeten Indikatoren und Bewertungsskalen.

Kriterium	3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt wird die Prognostizierbarkeit der möglichen Langzeitveränderungen (z. B. durch Modellvorstellungen zur Klimaentwicklung und Geodynamik, Hinweise auf rezente Bewegungen, Seismizität), die im Betrachtungszeitraum einen Einfluss auf das Einschlussvermögen des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches haben können. Beurteilt werden ferner unabhängige Evidenzen des Langzeiteinschlusses (z. B. alte Porenwässer, natürliche Tracerstoffe und ihre Verteilung).
<i>Relevanz für die Sicherheit</i>	Günstig ist, wenn die sicherheitsrelevanten Eigenschaften und die Geometrie des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches über die erforderlichen Zeiträume genügend zuverlässig prognostizierbar sind. Günstig sind Wirtgesteine mit unabhängigen Evidenzen der Langzeitisolation (z. B. der Einschluss alter Porenwässer) oder die Anwesenheit/Verteilung natürlicher Tracerstoffe, die auf eine langfristig geringe Wasserzirkulation schliessen lassen.

Fig. A-12: Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 3.3 «Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen»

A.11.1 Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte

Begründung des Indikators (Relevanz für Langzeitsicherheit)

Der Indikator entspricht dem zur Beurteilung des Kriterium 2.2 verwendeten Indikator (Kap. A.6.1).

Sein Einsatz im Kriterium 3.3 dient der Überprüfung der im Kriterium 2.2 für die erwartete Langzeitentwicklung formulierten Bewertung auch unter Berücksichtigung der verbleibenden, mit erdwissenschaftlichen Untersuchungen nicht weiter reduzierbaren Ungewissheiten.

Definition der Beurteilungsmethodik

Die Beurteilungsmethodik ist analog Kr 2.2 (Kap. A.6.1) definiert.

Anstelle des in Kr 2.2 für die erwartete Langzeitentwicklung betrachteten heutigen Entwässerungsszenarios werden der Bewertung des Indikators in Kr 3.3 pessimistische Annahmen für die geologische Langzeitentwicklung zugrunde gelegt. Für JO werden dazu alternative Entwässerungsszenarien betrachtet, die sich aus der lokalen Topographie ergeben könnten, während für NL und ZNO ein hypothetischer Flussverlauf direkt über der Lagerebene angenommen wird. Analog zu Kr 2.2 wird der P5-Wert für die alternativen bzw. abdeckenden Entwässerungsszenarien als pessimistischer (unterer) Eckwert der Restüberdeckung auch für ungünstige Langzeitentwicklung interpretiert.

Definition Bewertungsskala

Die Bewertungsskala ist identisch zu derjenigen in Kr 2.2 (Kap. A.6.1).

A.11.2 Thermisch und gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG

Begründung des Indikators (Relevanz für Langzeitsicherheit)

Die Indikatoren entsprechen den zur Beurteilung des Kriteriums 2.3 verwendeten Indikatoren (Kap. A.7.2 und A.7.3).

Ihr Einsatz im Kriterium 3.3 dient der Überprüfung der mittels Kriterium 2.3 für die erwarteten Parameterwerte formulierten Bewertung unter Berücksichtigung der verbleibenden, mit erdwissenschaftlichen Untersuchungen nicht weiter reduzierbaren Ungewissheiten. Damit wird die Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderung analysiert.

Definition der Beurteilungsmethodik

Die Beurteilungsmethodik ist analog Kr 2.3 (Kap. A.7.2 und A.7.3) definiert.

Anstelle des in Kr 2.3 für die erwartete Langzeitentwicklung betrachteten Referenzfalls werden der Bewertung der Indikatoren in Kr 3.3 pessimistische Annahmen zu den relevanten Gesteinseigenschaften zugrunde gelegt. Zu diesem Zweck wird der 95-Perzentilwert der Kennzahl FPI verwendet (auch als $FPI_{95\%}$ bezeichnet). Der P95-Wert wird in 5 % der Rechenfälle übertroffen bzw. in 95 % der Rechenfälle unterschritten. Er wird als pessimistischer (oberer) Eckwert der Bandbreite der thermisch und gasbedingten Überdrücke interpretiert.

Definition Bewertungsskala

Die Bewertungsskala ist identisch zu derjenigen in Kr 2.3 (Kap. A.7.4).

A.11.3 Zusammenfassung

Tab. A-11 enthält eine Zusammenfassung der für das Kriterium 3.3 «Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen» im Kontext der Etappe 3 beurteilten Aspekte und der dafür verwendeten Indikatoren und Bewertungsskalen.

Tab. A-11: Zu beurteilende Aspekte und verwendete Indikatoren mit ihren Bewertungsskalen für das SGT-Kriterium 3.3 «Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen»

Kriterien / zu beurteilende Aspekte	Indikatoren	Kennzahl	Bewertungsskala HAA	Bewertungsskala SMA
3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen				
Nicht reduzierbare Ungewissheiten bzgl. geologischer Langzeitentwicklungen	Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte	Bandbreite der berechneten P5-Werte für das Lagerfeld gemäss heutiger Auslegung sowie für ausgewählte Punkte innerhalb des Bereichs des EG und der Platzreserven	Identisch wie bei Kriterium 2.2 «Erosion»	
Nicht reduzierbare Ungewissheiten bzgl. lagerbedingter Einflüsse: • Temperatur • Gas	Thermisch bedingte Porenwasser-Überdrücke im WG	FPI (Failure potential for intact host rock): P95-Wert der berechneten Bandbreite	Identisch wie bei Kriterium 2.3 «Lagerbedingte Einflüsse»	
	Gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG			

A.12 Bautechnische Eignung (Kriteriengruppe 4)

Die SGT-Vorgaben für die beiden Kriterien sind in Fig. A-13 und Fig. A-14 wiedergegeben. Die zu beurteilenden Aspekte werden folgendermassen adressiert:

- Die bautechnische Eignung wird auf der Grundlage einer integralen Bewertung der felsmechanischen Eigenschaften und Bedingungen im Wirtgestein sowie der geotechnischen und hydrogeologischen Verhältnisse in den überlagernden Gesteinsformationen analysiert und mit dem Indikator «Nachweis der bautechnischen Machbarkeit der Lagerprojekte» und einer einheitlichen Bewertungsskala erfasst. Um Doppelbewertungen bei den Kriterien 4.1 und 4.2 zu vermeiden, wird in Anlehnung an die Beschreibung der Kriteriengruppe 4 im Konzeptteil des SGT eine räumliche Abgrenzung der zu bewertenden Bauwerke vorgenommen (Fig. A-15).
- In Kriterium 4.1 werden die **felsmechanischen Bedingungen und Eigenschaften** für den Bau des geologischen Tiefenlagers beurteilt, unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf den Betrieb, die Überwachung und den Verschluss des geologischen Tiefenlagers. Im Fokus der Beurteilung stehen hier die Lagerkammern der Haupt- und Pilotlager sowie die Lagerfeldzugänge inkl. der Lagerfeldversiegelungen auf Lagerebene.
- Analog werden in Kriterium 4.2 die **bautechnischen und hydrogeologischen Verhältnisse** für die Zugänge zum geologischen Tiefenlager in den Phasen Bau, Betrieb, Überwachung und Verschluss beurteilt. Im Fokus der Beurteilung stehen hier die Zugangsbauwerke, der Zentrale Bereich, die Testbereiche sowie die Lagerfeldzugänge (inkl. Kontrollstollen des Pilotlagers) bis hin zu den Lagerfeldversiegelungen.

Kap. A.12.2 enthält eine Zusammenfassung der für die beiden Kriterien 4.1 und 4.2 im Kontext der Etappe 3 beurteilten Aspekte und der dafür verwendeten Indikatoren und Bewertungsskalen.

<i>Kriterium</i>	4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt werden die felsmechanischen Eigenschaften und Bedingungen für Bau, Betrieb, Überwachung und Verschluss des geologischen Tiefenlagers (u. a. Gesteins- und Gebirgsfestigkeiten, Verformungseigenschaften der Gesteine, Tiefenlage und Gebirgsspannungen, Stabilität der Hohlräume, natürliche Gasführung).
<i>Relevanz für die Machbarkeit</i>	Günstig sind bautechnisch einfach beherrschbare Verhältnisse, bei denen sich durch die Tiefenlage keine extremen Anforderungen bei der Erstellung, beim Betrieb, bei der Überwachung (inkl. einer eventuellen Rückholung) oder beim Verschluss des Lagers ergeben. Günstig ist, wenn der Verschluss der Lagerteile ohne technische Probleme mit der erforderlichen Abdichtung realisiert werden kann.

Fig. A-13: Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 4.1 «Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen»

<i>Kriterium</i>	4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt werden die Bedingungen für die Erschliessung der Lagerkavernen und -stollen, insbesondere die bautechnischen und hydrogeologischen Verhältnisse für Erstellung, Betrieb und Unterhalt der Zugangsbauwerke zu den Lagerkavernen und -stollen, inkl. natürlicher Gasführung.
<i>Relevanz für die Machbarkeit</i>	Günstig ist, wenn keine wesentlichen hydrogeologischen und geotechnischen Probleme oberhalb der Lagerebene zu erwarten sind.

Fig. A-14: Zu beurteilende Aspekte für das SGT-Kriterium 4.2 «Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung»

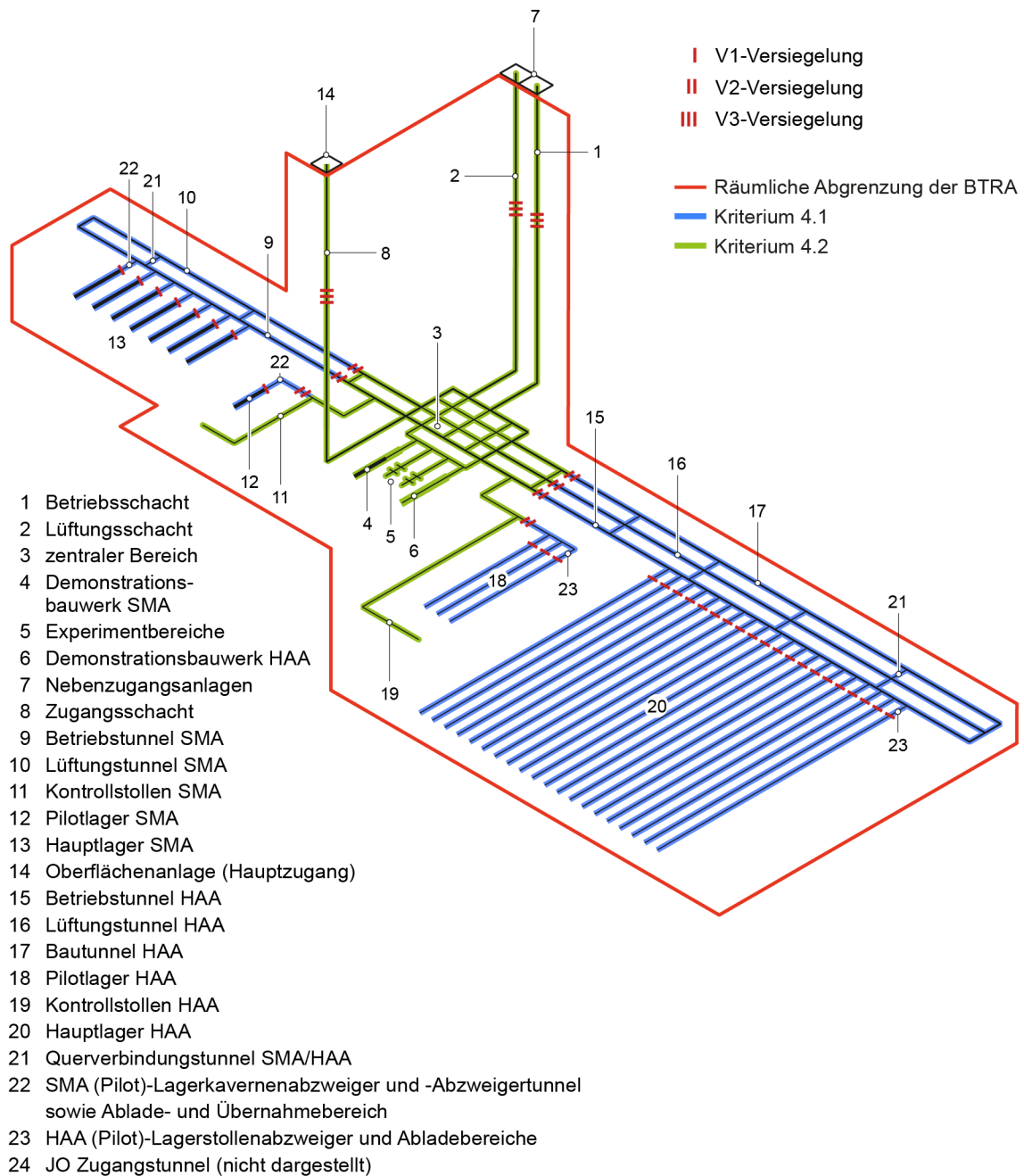


Fig. A-15: Systemskizze mit Visualisierung der räumlichen Abgrenzung der bautechnischen Risikoanalyse zwischen den Kriterien 4.1 und 4.2

Kopie der Fig. 1-1 in Band 9 in (Nagra 2023).

A.12.1 Nachweis der bautechnischen Machbarkeit der Lagerprojekte

Begründung des Indikators

Die felsmechanischen Eigenschaften und Bedingungen im Wirtgestein sowie die geotechnischen und hydrogeologischen Verhältnisse in den überlagernden Gesteinsformationen bestimmen die anwendbaren bautechnischen Mittel (Ausbruchquerschnitt, Ausbruchsicherung, Wahl der Bauverfahren etc.), um das geologische Tiefenlager – unter Berücksichtigung der sicherheitstechnischen Anforderungen – zuverlässig und sicher erstellen, betreiben, verfüllen und versiegeln zu können. Der ordnungsgemässe Verschluss bildet den Startpunkt für die Langzeitentwicklung des Tiefenlagers.

Definition der Beurteilungsmethodik

Objekt der Beurteilung der bautechnischen Eignung sind die im EG erarbeiteten, beispielhaften Lagerprojekte. Mit deren Projektierung wurde der Nachweis erbracht, dass für die *erwarteten Gebirgsverhältnisse* ein geologisches Tiefenlager mit bekannten und im Untertagebau erprobten Baumassnahmen gebaut werden kann. Die bautechnische Risikoanalyse liefert den Nachweis, dass die bautechnischen Risiken auch bei *abweichenden Gebirgsverhältnissen* mit im Untertagebau bekannten und erprobten Massnahmen auf ein akzeptiertes Mass reduziert werden können. Mit diesen beiden Elementen wird der Nachweis der bautechnischen Machbarkeit erbracht.

Die beispielhaften Lagerprojekte sowie das detaillierte Vorgehen und die Ergebnisse der bautechnischen Risikoanalyse für HAA-, SMA- und Kombilager in den drei Standortgebieten sind im bautechnischen Dossier dokumentiert (Band 9 in Nagra 2023).

Definition Bewertungsskala

Für die Beurteilung der Kriterien 4.1 und 4.2 gelangt eine einheitliche Bewertungsskala zur Anwendung. Es werden zwei Bewertungsstufen unterschieden:

- Als *günstig* wird eine Situation bezeichnet, in welcher der Nachweis der bautechnischen Machbarkeit für erwartete und für abweichende Verhältnisse möglich ist
- Als *ungünstig* wird eine Situation bezeichnet, in der dieser Nachweis nicht möglich ist.

Die Bewertungsskala ist für das HAA-, SMA- und Kombilager identisch. Die Bewertungsstufen *sehr günstig* und *bedingt günstig* werden in Etappe 3 nicht verwendet.

A.12.2 Zusammenfassung

Tab. A-12 enthält eine Zusammenfassung der für die Kriterien 4.1 «Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen» und 4.2 «Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung» im Kontext der Etappe 3 beurteilten Aspekte und des dafür verwendeten Indikators und der Bewertungsskala.

Tab. A-12: Zu beurteilende Aspekte und verwendeter Indikator mit Bewertungsskala für die SGT-Kriterien 4.1 «Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen» und 4.2 «Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung»

Kriterien / zu beurteilende Aspekte	Indikator	Merkmal	Bewertungsskala HAA	Bewertungsskala SMA
4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen				
Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen für Bau, Betrieb, Überwachung und Verschluss des geologischen Tiefenlagers	Nachweis der bautechnischen Machbarkeit der Lagerprojekte	Nachweis erbracht / nicht erbracht	<i>sehr günstig:</i> in E3 nicht verwendet <i>günstig:</i> Nachweis der bautechnischen Machbarkeit für erwartete und für abweichende Verhältnisse möglich <i>bedingt günstig:</i> in E3 nicht verwendet <i>ungünstig:</i> Nachweis der bautechnischen Machbarkeit für erwartete und für abweichende Verhältnisse nicht möglich	
4.2 «Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung»				
Bautechnische und hydrogeologische Verhältnisse für Erstellung, Betrieb und Unterhalt der Zugangsbauwerke zu den Lagerkavernen und -stollen	Identisch wie bei Kriterium 4.1	Identisch wie bei Kriterium 4.1	Identisch wie bei Kriterium 4.1	

A.13 Zusammenstellung der Bewertungsskalen

Tab. A-13: SGT-Kriterien, zu beurteilende Aspekte und zugeordnete Indikatoren mit ihren Bewertungsskalen für HAA und SMA

Kriterien / zu beurteilende Aspekte	Indikatoren	Kennzahlen / qualitative Merkmale	Bewertungsskala HAA	Bewertungsskala SMA
1.1 Räumliche Ausdehnung				
Laterale Ausdehnung EG	Platzangebot untertage	Fläche des EG und der Platzreserven (in km ²)	<i>sehr günstig</i> : >6 km ² <i>günstig</i> : 3 – 6 km ² <i>bedingt günstig / ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	<i>sehr günstig</i> : >3.6 km ² <i>günstig</i> : 1.8 – 3.6 km ² <i>bedingt günstig / ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet
Vertikale Ausdehnung EG	Mächtigkeit EG	Mächtigkeit EG über den Bereich des EG und der Platzreserven gemittelt (in m)	<i>sehr günstig</i> : >150 m <i>günstig</i> : 100 – 150 m <i>bedingt günstig / ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	
Flexibilität bei Anordnung Lagerfelder	Seismisch kartierte Störungen an Wirtgesteinsgrenzen	Ungestörter Flächenanteil der Wirtgesteinsgrenzen im Bereich des EG und der Platzreserven (in %)	<i>sehr günstig</i> : 75 – 100 % <i>günstig</i> : 50 – 75 % <i>bedingt günstig / ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	
1.2 Hydraulische Barrierewirkung				
Hydraulische Barrierenfunktion	Darcy-Fluss im EG	Messwerte der erwarteten vertikalen hydraulischen Durchlässigkeit (harmonisches Mittel K_v über gesamten Schichtstapel des EG; hydr. Gradient i_v zwischen Aquiferen aufgespannt); Darcy-Fluss $v_D = K_v i_v$	<i>sehr günstig</i> : $v_D \leq 10^{-12}$ m/s (diffusionsdominierter Radionuklid-Transport) <i>günstig</i> : $v_D \leq 10^{-11}$ m/s <i>bedingt günstig / ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	
Transportbarrierenfunktion	Tracer-Fluss im EG	Messwerte der effektiven Diffusionskoeffizienten (harmonisches Mittel D_e über Schichtstapel von der Lagerebene bis Obergrenze EG bzw. bis Untergrenze EG)	<i>sehr günstig</i> : $D_e \leq 10^{-11}$ m ² /s (diffusionsdominierter Radionuklid-Transport) <i>günstig</i> : $D_e \leq 10^{-10}$ m ² /s <i>bedingt günstig / ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	

Kriterien / zu beurteilende Aspekte	Indikatoren	Kennzahlen / qualitative Merkmale	Bewertungsskala HAA	Bewertungsskala SMA
Regionale hydro-geologische Situation	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation	Evidenz für hohes Alter der Porenwässer im Opalinuston und für hohe Verweilzeiten der Grundwässer in den Aquiferen ober- und unterhalb des EG	<i>sehr günstig:</i> Zusätzlich zum hohen Alter der Porenwässer im Opalinuston belegen Evidenzen einen hohen Anteil an altem Grundwasser (bzw. die Abwesenheit jüngerer Grundwasserkomponenten) auch in den nächsten Aquiferen ober- und unterhalb des EG. <i>günstig:</i> Evidenzen belegen das hohe Alter der Porenwässer im Opalinuston. <i>bedingt günstig / ungünstig:</i> in E3 nicht verwendet	
1.3 Geochemische Bedingungen				
Mineralogie im EG	Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Sorptionsvermögen	Messwerte des Tonmineralgehalts im WG	<i>sehr günstig:</i> >40 Gew.-% <i>günstig:</i> <40 Gew.-% <i>bedingt günstig / ungünstig:</i> in E3 nicht verwendet	
Porenwasserchemie im EG	Salinität im WG	Messwerte der Ionenstärke des Porenwassers im WG	<i>sehr günstig:</i> <0.01 mol/l <i>günstig:</i> 0.01 – 0.7 mol/l <i>bedingt günstig / ungünstig:</i> in E3 nicht verwendet	
1.4 Freisetzungspfade				
Art des mikroskopischen Porenraums im intakten WG	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums im WG	Qualitative Beurteilung auf der Grundlage von Messwerten aus Kernproben im WG: Porengrößenverteilung, spezifische Oberfläche, anionenzugängliche Porosität, Diffusionskoeffizienten	<i>sehr günstig:</i> (äquivalent) poröses Medium <i>günstig:</i> Wasserführung in Diskontinuitäten mit beschränktem Channeling und günstigen Bedingungen für Matrixdiffusion <i>bedingt günstig / ungünstig:</i> in E3 nicht verwendet	
Art der Transportpfade entlang diskreter tektonischer Elemente im WG	Störungstransmissivität im WG	Messwerte aus Packer-Tests in Tiefbohrungen im WG («best estimate»-Werte)	<i>sehr günstig:</i> $T \leq 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ <i>günstig:</i> $T \leq 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ <i>bedingt günstig / ungünstig:</i> in E3 nicht verwendet	
Selbstabdichtungsvermögen im WG	Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Selbstabdichtungsvermögen	Messwerte des Tonmineralgehalts im WG	<i>sehr günstig:</i> ausgeprägtes Selbstabdichtungsvermögen (Tonmineralgehalt >40 Gew.-%) <i>günstig:</i> signifikantes Selbstabdichtungsvermögen (Tonmineralgehalt 20 – 40 Gew.-%) <i>bedingt günstig / ungünstig:</i> in E3 nicht verwendet	

Kriterien / zu beurteilende Aspekte	Indikatoren	Kennzahlen / qualitative Merkmale	Bewertungsskala HAA	Bewertungsskala SMA
2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften				
Störung des Gesteinsverbandes im EG durch differenzielle Bewegungen (Neotektonik)	Seismisch kartierte Störungen in kompetenten Formationen	ungestörter Flächenanteil in kompetenten Formationen im Bereich des EG und der Platzreserven (in %)	<i>sehr günstig</i> : 75 – 100 % <i>günstig</i> : 50 – 75 % <i>bedingt günstig</i> : 10 – 50 % <i>ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	
	Seismizität	Seismische Aktivität: Definition von grossräumigen Zonen mit unterschiedlicher Häufigkeits-Magnituden-Verteilung von Erdbeben	<i>sehr günstig</i> : in E3 nicht verwendet <i>günstig</i> : keine erhöhte Seismizität <i>bedingt günstig</i> : erhöhte Seismizität <i>ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	
Bildung neuer Wasser- und Gaswegsamkeiten durch geochemische Vorgänge (Lösungsprozesse, Karstbildung, Wasser-Gesteins-Wechselwirkung)	Potenzial für Bildung von Wasserwegsamkeiten durch Lösungsprozesse • oberhalb WG (im EG) • im WG • unterhalb WG (im EG) (3 separate Indikatoren)	Verkarstungspotenzial (unter Berücksichtigung der hydrogeologischen und hydrochemischen in-situ-Bedingungen).	<i>sehr günstig</i> : Verkarstung ist nicht möglich. <i>günstig</i> : Verkarstung ist unter speziellen Bedingungen nicht vollständig auszuschliessen. <i>bedingt günstig / ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	
2.2 Erosion				
Tiefenlage des Lagers, Hebungsrates, Erosionsrate (nicht-glaziale Erosion und Erosion mit glazialer Über-tiefung)	Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte	Bandbreite der berechneten P5-Werte für das Lagerfeld gemäss heutiger Auslegung sowie für ausgewählte Punkte innerhalb des Bereichs des EG und der Platzreserven	<i>sehr günstig</i> : Restüberdeckung der Lagerebene am Ende des BZR beträgt mindestens 250 m <i>günstig</i> : Restüberdeckung der Lagerebene am Ende des BZR beträgt 200 m bis 250 m <i>bedingt günstig</i> : Restüberdeckung der Lagerebene am Ende des BZR beträgt 50 m bis 200 m <i>ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	
2.3 Lagerbedingte Einflüsse				
Auflockerungszone	Länge des Freisetzungspaths im intakten Wirtgestein	RPL (normierte Länge des RN-Transportpfads im intakten Wirtgestein)	<i>sehr günstig</i> : $RPL \leq 0.7$ <i>günstig</i> : $0.7 < RPL \leq 0.9$ <i>bedingt günstig / ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	
Thermisch bedingte Effekte im EG	Thermisch bedingte Porenwasser-Überdrücke im WG	FPI (Failure potential for intact host rock) für den Referenzfall	<i>sehr günstig</i> : $FPI \leq 0.7$ <i>günstig</i> : $0.7 < FPI \leq 1$ <i>bedingt günstig</i> : $FPI > 1$ <i>ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	
Gasbedingte Effekte im EG	Gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG			

Kriterien / zu beurteilende Aspekte	Indikatoren	Kennzahlen / qualitative Merkmale	Bewertungsskala HAA	Bewertungsskala SMA
2.4 Nutzungskonflikte				
Nutzungswürdige Rohstoffe	Rohstoffvorkommen • oberhalb WG • innerhalb WG • unterhalb WG (3 Indikatoren)	Nutzungspotenzial von Rohstoffen in der potenziellen Lagerzone	<i>sehr günstig</i> : kein identifiziertes Nutzungspotenzial <i>günstig</i> : mögliches Nutzungspotenzial, aber nicht in einem für die Schweiz besonderen Masse <i>bedingt günstig / ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	
Nutzungswürdige Ressourcen (Geothermie und weitere energiebezogene Ressourcen)	Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds	Nutzungspotenzial für Geothermie, CO ₂ - und Erdgas-speicherung in der potenziellen Lagerzone		
Mineralquellen und Thermen	Mineral- und Thermalwassernutzungen	Nutzungspotenzial für Mineral- und Thermalwasser in der potenziellen Lagerzone		
3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine				
Auswirkungen von nicht reduzierbaren Ungewissheiten bzgl. der standort-spezifischen Ausprägung der Fazies-Variabilität und der sicherheitsrelevanten Strömungs- und Transporteigenschaften des Opalinustons und der Rahmengesteine	Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften im Opalinuston	Normierter Stofffrachtaustrag aus dem EG (NTF): P95-Wert der berechneten Bandbreite	<i>sehr günstig</i> : NTF ≤ 0.001 <i>günstig</i> : 0.001 < NTF ≤ 0.01 <i>bedingt günstig / ungünstig</i> : in E3 nicht verwendet	
	Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften in den Rahmengesteinen			
3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse				
Vertikale Ausdehnung des EG	Auswirkungen der Ungewissheiten zu den EG-begrenzenden Aquiferen	Mächtigkeit EG über den Bereich des EG und der Platzreserven gemittelt (in m), mit potenziell zusätzlichen uRG	Identisch wie bei Indikator «Mächtigkeit EG» in Kriterium 1.1	

Kriterien / zu beurteilende Aspekte	Indikatoren	Kennzahlen / qualitative Merkmale	Bewertungsskala HAA	Bewertungsskala SMA
3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen				
Nicht reduzierbare Ungewissheiten bzgl. geologischer Langzeitentwicklungen	Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktions-effekte	Bandbreite der berechneten P5-Werte für das Lagerfeld gemäss heutiger Auslegung sowie für ausgewählte Punkte innerhalb des Bereichs des EG und der Platz-reserven	Identisch wie bei Kriterium 2.2 «Erosion»	
Nicht reduzierbare Ungewissheiten bzgl. lagerbedingter Einflüsse: • Temperatur • Gas	Thermisch bedingte Porenwasser-Überdrücke im WG	FPI (Failure potential for intact host rock): P95-Wert der berechneten Bandbreite	Identisch wie bei Kriterium 2.3 «Lagerbedingte Einflüsse»	
	Gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG			
4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen				
Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen für Bau, Betrieb, Überwachung und Verschluss des geologischen Tiefenlagers	Nachweis der bautechnischen Machbarkeit der Lagerprojekte	Nachweis erbracht / nicht erbracht	<i>sehr günstig:</i> in E3 nicht verwendet <i>günstig:</i> Nachweis der bautechnischen Machbarkeit für erwartete und für abweichende Verhältnisse möglich <i>bedingt günstig:</i> in E3 nicht verwendet <i>ungünstig:</i> Nachweis der bautechnischen Machbarkeit für erwartete und für abweichende Verhältnisse nicht möglich	
4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung				
Bautechnische und hydrogeologische Verhältnisse für Erstellung, Betrieb und Unterhalt der Zugangsbauwerke zu den Lagerkavernen und -stollen	Identisch wie bei Kriterium 4.1	Identisch wie bei Kriterium 4.1	Identisch wie bei Kriterium 4.1	

Anhang B Gegenüberstellung der in Etappe 2 und 3 verwendeten Indikatoren

Tab. B-1: Überprüfung der Indikatoren in SGT-Etappe 3

Indikatoren und Nummerierung aus Etappe 2 gemäss Tab. 2.3-7 in (Nagra 2014b)

Nr.	Indikatoren Etappe 2	Überprüfung / Präzisierung / Änderungsbedarf	Indikatoren Etappe 3
1.1 Räumliche Ausdehnung			
8	Platzangebot untertags	In E2 wurde ein standortspezifischer Richtwert für den Platzbedarf für das umhüllende Abfallinventar berechnet (u. B. von Ungewissheiten bzgl. Störungsvorkommen, tektonischer Überprägung, Tiefenlage, Mächtigkeit, Neigung etc.), als Messlatte für die Bewertung des Platzangebots; vgl. S. 240 und Kap. 4.4.3 in Nagra (2014b). Die Datengrundlage in E3 bestätigt, dass alle Standortgebiete über grossräumige potenzielle Lagerzonen verfügen, u. a. auch weil die maximale Tiefe in E3 nicht mehr begrenzend ist, siehe unten. In E3 definiert die Nagra anhand der Lagerprojekte für alle Standortgebiete einen einheitlichen Platzbedarf pro Lagertyp sowie einheitliche Platzreserven, die ein Mehrfaches davon betragen. Zudem wird in der qualitativen Bewertung neben der Grösse des Platzangebots auch die Flexibilität bei der Anordnung der Lagerfelder unter Berücksichtigung der seismisch kartierten Störungen an den Wirtgesteinsgrenzen verglichen.	Platzangebot untertag Seismisch kartierte Störungen an Wirtgesteinsgrenzen
5	Mächtigkeit	In E2 wurde die «nutzbare» Mächtigkeit des EG standortspezifisch bewertet (d. h. barrierewirksame Gesteine mit langfristig genügender Überdeckung zur Vermeidung einer Gesteins-Dekompaktion); vgl. Kap. 4.4.3 in Nagra (2014b). In E3 wird eine zeitliche Entflechtung der Anfangsbedingung und der erwarteten Langzeitentwicklung zwischen den KG 1 und 2 vorgenommen. Entsprechend wird in KG 1 die Mächtigkeit des EG zu Beginn der Nachverschlussphase betrachtet. Die integrale Beurteilung der Erosion ist Thema von Kriterien 2.2 und 3.3.	Mächtigkeit EG
1,2, 3,4	Tiefenlage	In E2 wurde die Tiefenlage anhand von 4 Indikatoren hinsichtlich min. Anforderungen (aus Sicht Langzeitentwicklung/Schutz vor Erosion und Gesteins-Dekompaktion) sowie max. Anforderungen (aus Sicht bautechnischer Machbarkeit) formuliert. In E3 wird die Tiefenlage bei der Definition der Bewertungsobjekte berücksichtigt (Nagra 2024d) und fliesst in die integrale Beurteilung der entsprechenden Themen in den KG 2, 3 und 4 ein.	Tiefenlage wird in Kriterien 2.2, 2.3, 3.3 und in Kriteriengruppe 4 bei verschiedenen Indikatoren berücksichtigt.

Nr.	Indikatoren Etappe 2	Überprüfung / Präzisierung / Änderungsbedarf	Indikatoren Etappe 3
1.2 Hydraulische Barrierewirkung			
9	Hydraulische Durchlässigkeit	In E2 wurde die hydraulische Durchlässigkeit der Wirtgesteine als Einzelaspekt bewertet (unabhängig von hydraulischer Gesamtsituation); vgl. Kap. 3.3 in Nagra (2014b). In E3 liegt nun eine verbesserte, standortspezifische Datengrundlage vor. Deshalb wird eine quantitative Betrachtung der hydraulischen Barrierewirkung des EG bzgl. Wasserfluss und Tracer-Transport durchgeführt.	Darcy-Fluss im EG Tracer-Fluss im EG
2	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion	In E2 wurde die Tiefenlage unter Terrain als Einzelaspekt standortspezifisch bewertet (im Hinblick auf eine langfristig genügende Überdeckung zur Vermeidung einer Gesteins-Dekompaktion); vgl. S. 240 und Kap. 4.4.3 in Nagra (2014b). In E3 wird in KG 1 neu der Zeitpunkt zu Beginn der Nachverschlussphase betrachtet (zeitliche Entflechtung der Anfangsbedingung und der erwarteten Langzeitentwicklung). Die integrale Beurteilung der Erosion ist Thema der Kriterien 2.2 und 3.3.	In Kriterien 2.2 und 3.3 berücksichtigt
10	Grundwasserstockwerke	In E2 wurde eine qualitative Beurteilung des Grundwasserstockwerkbaus pro Standortgebiet durchgeführt (als indirekte Evidenz für die hydraulische Barrierewirkung des EG); vgl. Kap. 4.4.3 in Nagra (2014b). In E3 wurden in allen Tiefbohrungen Porenwasseruntersuchungen durchgeführt und die Isotopenzusammensetzung der Porenwasser des EG und der Grundwässer der nächstliegenden Aquifere bestimmt. Mittels verfeinerter Methoden wurden auch die Verweilzeiten des Grundwassers in den Aquiferen weiter eingegrenzt und zur Beurteilung der Fließdynamik verwendet. Deshalb wird der Indikator «unabhängige Evidenzen für die Langzeitisolation» in E3 zur Beurteilung der regionalen hydrogeologischen Situation in Kr 1.2 anstatt wie in E2 in Kr 3.3 zur Beurteilung der Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen eingesetzt. Damit entfällt eine separate Beurteilung des Indikators «Grundwasserstockwerke».	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation
1.3 Geochemische Bedingungen			
11	Mineralogie	In E2 wurden diese Aspekte für die verschiedenen Wirtgesteine mit unterschiedlichen Eigenschaften getrennt beurteilt. Unterschiede in den geochemischen Bedingungen wurden vor allem bei den Wirtgesteinen Effinger Schichten und den Mergel-Formationen festgestellt; vgl. Kap. 3.3 in Nagra (2014b). In E3 ist der Opalinuston als Wirtgestein für beide Lager-typen gesetzt; die standortspezifischen Untersuchungen der geochemischen Bedingungen in Etappe 3 zeigen, dass Opalinuston in vergleichbarer Qualität in allen Standortgebieten vorliegt (Nagra 2024h). In Etappe 3 wird deshalb auf eine separate Beurteilung der Indikatoren	Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Sorptionsvermögen
12	pH		In E3 werden diese Indikatoren nicht mehr verwendet, da sehr günstige Verhältnisse im Opalinuston bestätigt
13	Redox-Bedingungen		
14	Salinität		Salinität im WG
15	Mikrobielle Prozesse		In E3 werden diese Indikatoren nicht mehr

Nr.	Indikatoren Etappe 2	Überprüfung / Präzisierung / Änderungsbedarf	Indikatoren Etappe 3
16	Kolloide	«pH», «Redox-Bedingungen» und «Mikrobielle Prozesse» verzichtet. Kolloide sind im Opalinuston immobil, der Indikator entfällt somit. Die Salinität ist in JO leicht verringert, weshalb die sicherheitstechnische Relevanz bewertet und verglichen wird. Der Indikator «Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Sorptionsvermögen» wird wegen seiner grossen Bedeutung für die Radionuklid-Rückhaltung anstelle des Indikators «Mineralogie» weiterhin betrachtet.	verwendet, da sehr günstige Verhältnisse im Opalinuston bestätigt
1.4 Freisetzungspfade			
17	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums	In E2 wurden diese Aspekte wirtgesteinspezifisch beurteilt; vgl. Kap. 3.3 in Nagra (2014b). In E3 ist der Opalinuston als Wirtgestein für beide Lagertypen gesetzt; er erbringt den Hauptbeitrag zur Rückhaltewirkung der natürlichen Barriere. Entsprechend dieser zentralen Rolle werden seine Eigenschaften auch in E3 verglichen. Der Einfluss der standortspezifischen Ausprägung der Faziesvariabilität und der Transporteigenschaften des Opalinustons und der Rahmengesteine im EG wird in E3 in Kr 3.2 quantifiziert. Entsprechend entfällt der Indikator «Homogenität des Gesteinsaufbaus».	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums im WG
20	Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade		Störungstransmissivität im WG
22	Selbstabdichtungsvermögen		Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Selbstabdichtungsvermögen
18	Homogenität des Gesteinsaufbaus		Siehe Kriterium 3.1
19	Länge der massgebenden Freisetzungspfade	In E2 bezog sich der Indikator auf die für die Barrierenwirkung massgebenden vertikalen Beiträge zur Transportpfadlänge (im massgebenden Fall nur innerhalb des Wirtgesteins sensu stricto) und wurde wirtgesteinspezifisch bewertet; vgl. Kap. 3.3 in Nagra (2014b). In E3 erfolgt die Bewertung der Länge der Freisetzungspfade neu im Kontext der Kriterien 1.1 (Mächtigkeit EG), 1.2 (quantitative Beurteilung des Darcy-Flusses und des Tracer-Flusses, unter Berücksichtigung des Abstands zu den nächstliegenden Aquiferen ober- und unterhalb des Opalinustons), 2.3 (lagerbedingte Einflüsse/EDZ) und 3.2 (verbleibende Ungewissheiten zur Begrenzung des EG). Dabei wird das Verhalten des Gesamtsystems auf der Grundlage standortspezifischer Daten und Systemanalysen bewertet.	Siehe Kriterien 1.1, 1.2 2.3, 3.2

Nr.	Indikatoren Etappe 2	Überprüfung / Präzisierung / Änderungsbedarf	Indikatoren Etappe 3
2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften			
23	Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)	In E2 wurde das tektonische Regime auf Ebene Grossraum qualitativ bewertet (Tafeljura und nordöstliches Molassebecken, Vorfaltenzone, östliche Subjurassische Zone, Alpen). Massgebende Prozesse für Bewertung des Kriteriums 2.1: Alpiner Fernschub, transpressive/kompressive Reaktivierung Permokarbondrog, tektonische Überprägung; vgl. S. 252 – 253 in Nagra (2014b). Dabei wurde sowohl eine Reaktivierung bestehender Störungen als auch eine Neubildung von Störungen in Betracht gezogen. In E3 liegt nun eine verbesserte Datengrundlage mit geringeren Ungewissheiten vor, inkl. verbessertes Verständnis der Gebirgsspannungsverhältnisse und Geodynamik. Die Bewertung der Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung wurde deshalb neu überdacht und es wird ein neuer, quantitativer Indikator eingeführt. Die seismisch kartierten Störungen in den kompetenten Formationen ober- und unterhalb des EG fungieren als Indikator für zukünftige, differenzielle Bewegungen des Gesteinsverbands. Dies, weil in E3 von einer Reaktivierung bestehender Störungen ausgegangen und die Bildung neuer Störungen nicht erwartet wird. Die kartierten Störungen an den Wirtgesteinsgrenzen werden im Kr 1.1 als Indikator für bestehende Beanspruchungen im EG bewertet.	Seismisch kartierte Störungen in kompetenten Formationen
24	Seismizität	In E3 wird analog wie in E2 verfahren.	Seismizität
27	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	In E2 erfolgte die Bewertung des Verkarstungspotenzials wirtgesteinspezifisch anhand des Karbonatgehalts bzw. bestehender Kalkbänke und der hydrogeologischen Gesamtsituation; vgl. Kap. 3.3 in Nagra (2014b). In E3 liegt nun eine verbesserte Datengrundlage vor, auf deren Basis eine differenziertere Beurteilung des Verkarstungspotenzials i) innerhalb des WG und ii) in den oberen und unteren Rahmengesteinen erfolgt.	Potenzial für Bildung von Wasserwegsamkeiten durch Lösungsprozesse: • oberhalb WG (im EG) • im WG • unterhalb WG (im EG)
2.2 Erosion			
28	Erosion im Betrachtungszeitraum	In E2 wurde dieser Indikator anhand der grossräumigen Hebungsrate bewertet; vgl. Fig. 4.2-2 in Nagra (2014b). In E3 entfällt die Bewertung dieses Einzelaspekts zugunsten eines verfeinerten methodischen Ansatzes zur integralen Bewertung der Erosion (vgl. unten).	Ist neu Teil der integralen Bewertung der Erosion (vgl. unten).
3	Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen	In E2 erfolgte eine standortspezifische Bewertung der Tiefenlage der WG-Obergrenze unter lokaler Erosionsbasis und Tiefenlage der WG-Obergrenze unter Fels (als Messgrössen für den Schutz des Wirtgesteins vor neuen Rinnen und vor den Auswirkungen glazialer	Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte

Nr.	Indikatoren Etappe 2	Überprüfung / Präzisierung / Änderungsbedarf	Indikatoren Etappe 3
4	Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion	Tiefenerosion); vgl. auch Tab. 4.4-1 und Kap. 4.4.3 in Nagra (2014b). In E3 wird die Tiefenlage bei der Definition der Bewertungsobjekte berücksichtigt und die Datengrundlage bzgl. erosiver Prozesse in der Vergangenheit wurde gegenüber E2 erheblich verbessert. Die Beurteilung der Erosion erfolgt anhand systematischer hybrid-probabilistischer Modellrechnungen, unter integraler Berücksichtigung aller relevanten Eigenschaften und Prozesse (Tiefenlage, Hebungs- und Erosionsraten, Vergletscherung, glaziale Tiefenerosion, Bildung neuer Rinnen, Erosionsresistenz etc.). Ergebnis dieser Modellrechnungen sind Dichteverteilungen der Restüberdeckung der Lagerebene am Ende des Betrachtungszeitraums, welche in die Beurteilung von Dekompaktionseffekten einfließen.	
2.3 Lagerbedingte Einflüsse			
29	Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten	In E2 erfolgte die Beurteilung der Auflockerungszone wirtgesteinspezifisch und überwiegend qualitativ. Aufgrund der begrenzten Tiefenlage (600 m u. T. für SMA und 700 m u. T. für HAA) wurde festgehalten, dass die Auflockerungszone (im Bereich der Lagerkammen und der Versiegelungen) durch geeignete technische Massnahmen kontrolliert werden kann und nach Lagerverschluss weitgehend selbstabgedichtet wird; vgl. Kap. 3.3 in Nagra (2014b). In E3 wird die Tiefenlage der Lagerebene im Gegensatz zu E2 aufgrund der verbesserten Datenlage mit verringerten Ungewissheiten und angepassten Ausbaukonzepten nicht mehr beschränkt. Die Beurteilung der Auflockerungszone erfolgt standort- und lagertypspezifisch mittels felsmechanischer, probabilistischer Modellrechnungen. Als massgebender Indikator für die Ausdehnung der EDZ wird die Länge des Freisetzungspfads im intakten Opalinuston berechnet.	Länge des Freisetzungspfads im intakten WG
30	Chemische Wechselwirkungen	In E2 erfolgte die Beurteilung der chemischen Wechselwirkungen zwischen technischen und natürlichen Barrieren wirtgesteinspezifisch und qualitativ. Im Fokus standen Langzeitauswirkungen von alkalischen Zementporenwässern und die Oxidation des Wirtgesteins während der Bau- und Betriebsphase. Diese Auswirkungen sind auf das Nahfeld (stollennahes Gestein) begrenzt und wurden als sicherheitstechnisch unbedeutend eingestuft; vgl. Kap. 3.3 in Nagra (2014b). Modellrechnungen in E3 bestätigen, dass chemische Wechselwirkungen auf das unmittelbar angrenzende Wirtgestein (im Zentimeterbereich) begrenzt bleiben (Nagra 2024j). Für den Standortvergleich spielen chemische Wechselwirkungen im Wirtgestein deswegen keine Rolle und der Indikator entfällt.	In E3 wird dieser Indikator nicht mehr verwendet, da sehr günstige Verhältnisse im Opalinuston bestätigt.

Nr.	Indikatoren Etappe 2	Überprüfung / Präzisierung / Änderungsbedarf	Indikatoren Etappe 3
31	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas	In E2 erfolgte die Beurteilung der gasbedingten Auswirkungen wirtgesteinsspezifisch und überwiegend quantitativ. Im Fokus standen Langzeitauswirkungen von Korrosions- und Degradationsgasen auf das Wirtgestein (Gasdruckaufbau und -freisetzung). Durch geeignete technische Massnahmen können die gasbedingten Auswirkungen begrenzt werden. Sie wurden in E2 zwar insgesamt als bedingt günstig, aber nicht als sicherheitstechnisch relevant für die Langzeitsicherheit eingestuft; vgl. Kap. 3.3 in Nagra (2014b). In E3 ist eine verbesserte Datenlage mit verringerten Ungewissheiten bzgl. Gasbildung, Gesteinsparametern für die Gasfreisetzung und Gebirgsspannungen verfügbar. Die Beurteilung der erwarteten gasbedingten Einflüsse erfolgt neu quantitativ für die standortspezifischen Lagerprojekte. Als massgebender Indikator wird der erwartete gasbedingte Porenwasser-Überdruck in den technischen Barrieren und im angrenzenden Wirtgestein anhand gekoppelter, probabilistischer Modellrechnungen ermittelt.	Gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG
32	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur	In E2 erfolgte die Beurteilung der thermischen Auswirkungen wirtgesteinsspezifisch und überwiegend quantitativ (nur für HAA-Lager). Im Fokus standen Auswirkungen erhöhter Porenwasserdrücke und Temperaturen auf das Wirtgestein. Durch geeignete technische Massnahmen können die thermischen Auswirkungen begrenzt werden. Sie wurden in E2 zwar insgesamt als bedingt günstig, aber nicht als sicherheitstechnisch relevant für die Langzeitsicherheit des HAA-Lagers eingestuft; vgl. Kap. 3.3 in Nagra (2014b). In E3 ist eine verbesserte Datenlage mit verringerten Ungewissheiten bzgl. Quellterm, Gesteinsparametern und Gebirgsspannungen verfügbar. Die Beurteilung der erwarteten thermischen Einflüsse erfolgt neu quantitativ für die standortspezifischen Lagerprojekte. Als massgebender Indikator wird der erwartete thermisch bedingte Porenwasser-Überdruck im Wirtgestein anhand gekoppelter, probabilistischer Modellrechnungen ermittelt.	Thermisch bedingte Porenwasser-Überdrücke im WG
2.4 Nutzungskonflikte			
33, 34, 35	Rohstoffvorkommen oberhalb / innerhalb / unterhalb des Wirtgesteins (3 Indikatoren)	In E2 erfolgte die Bewertung nutzungswürdiger Ressourcenvorkommen mittels indikatorspezifischer Bewertungsmethoden und -skalen; vgl. Nagra (2014b). Die so identifizierten Unterschiede zu den Nutzungskonflikten wurden aus Sicht Langzeitsicherheit nicht als entscheidend relevant betrachtet.	Rohstoffpotenzial oberhalb / innerhalb / unterhalb WG (3 Indikatoren)
37	Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds	Darauf aufbauend wurde in E3 eine einheitliche Beurteilungsmethodik und Bewertungsskala für alle Indikatoren des Kr 2.4 angewandt. Ziel ist, aus Sicht der Langzeitsicherheit allfällige Situationen zu identifizieren, in denen nutzungswürdige Ressourcen in einem besonderen Masse vorkommen und somit ein erhöhtes Potenzial für Nutzungskonflikte sowie eine damit verbundene Verletzung des Barriersystems besteht.	Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds

Nr.	Indikatoren Etappe 2	Überprüfung / Präzisierung / Änderungsbedarf	Indikatoren Etappe 3
36	Mineral- und Thermalwassernutzungen	Vgl. Ausführungen zu Rohstoffvorkommen, Geothermie und weiteren energiebezogenen Nutzungen des Untergrunds. In E2 wurden mit diesem Indikator auch bedeutende Mineral- und Thermalwassernutzungen ausserhalb der Standortgebiete bewertet, welche durch die Bauten auf Lagerebene oder durch die Zugänge nach Untertage beeinträchtigt werden könnten; vgl. Fig. 4.4-8 in Nagra (2014b). In E3 wurden allfällige hydraulische Verbindungen zu bedeutsamen Quellen und Wasservorkommen im Rahmen der Umweltverträglichkeit des Projektes beurteilt. Somit wurden in E3 solche allfälligen hydraulischen Wechselwirkungen nicht mehr im Rahmen des Sicherheitstechnischen Vergleichs der Standortgebiete betrachtet.	Mineral- und Thermalwassernutzungen
3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine			
39	Variabilität der Gesteinseigenschaften i.H. auf ihre Charakterisierbarkeit	In E2 erfolgte die Bewertung dieses Indikators wirtge-steinsspezifisch anhand der Merkmale Lagerungsverhältnisse, Homogenität bzw. Heterogenität der Gesteinsbeschaffenheit (inkl. harte Bänke), Variabilität der Gesteinseigenschaften, Existenz und Art von Diskontinuitäten als Folge der tektonischen Überprägung; vgl. Kap. 3.3 in Nagra (2014b). In E3 liegt nun eine verbesserte, standortspezifische Datengrundlage vor. Die benötigten Daten konnten mit hoher Zuverlässigkeit gewonnen und die Bandbreite der Gesteinsvariabilität reduziert werden. Deshalb wird eine integrale Betrachtung der verbleibenden Ungewissheiten anhand von probabilistischen Modellrechnungen zu Stofffrachten durchgeführt. Damit werden die sicherheitstechnischen Auswirkungen von nicht reduzierbaren Ungewissheiten bzgl. der standort-spezifischen Ausprägung der Faziesvariabilität und der Transporteigenschaften des Opalinustons und seiner Rahmengesteine quantifiziert.	Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften im Opalinuston Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften in den Rahmengesteinen
40	Erfahrungen	In E2 erfolgte die Bewertung dieses Indikators wirtge-steinsspezifisch anhand der Erfahrungen, die bei Entsorgungsprojekten in der Schweiz (SGT-Etappe 1, Projekt Entsorgungsnachweis, Projekt Wellenberg, Felslabor Mont Terri etc.), mit vergleichbaren Wirtgesteinen im Ausland (z. B. Callovo-Oxfordian-Tonsteine in F) sowie mittels Analogieschlüssen gesammelt wurden. In E3 liegt nun eine verbesserte, standortspezifische Datengrundlage vor. Die geologischen Kenntnisse sind in allen Standortgebieten gleichwertig und werden mittels Modellrechnungen betrachtet (vgl. oben). Damit entfällt eine separate Beurteilung dieses Indikators.	In E3 wird dieser Indikator nicht mehr verwendet, da nun eine robuste standort-spezifische Datengrundlage für die qualitative Bewertung vorliegt.

Nr.	Indikatoren Etappe 2	Überprüfung / Präzisierung / Änderungsbedarf	Indikatoren Etappe 3
3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse			
43	Explorations- verhältnisse im geologischen Untergrund	In E2 erfolgte die Bewertung dieses Indikators wirtgesteinsspezifisch anhand der Existenz von seismischen Markerhorizonten im oder in der Nähe des Wirtgesteins sowie anhand der Homogenität des Wirtgesteins (inkl. lateraler Korrelationslängen), unter Berücksichtigung der Möglichkeit, grössere Störungen (mit detektierbaren Schichtversätzen) zu lokalisieren; vgl. Kap. 3.3 in Nagra (2014b). In E3 liegt nun eine verbesserte, standortspezifische Datengrundlage vor. Die benötigten Daten konnten mit hoher Zuverlässigkeit gewonnen und die Bandbreite der Ungewissheiten reduziert werden. Die verbleibenden Ungewissheiten zur Tiefenlage und Schichtmächtigkeit sind in den Standortgebieten vergleichbar gering. Die verbleibenden, konzeptuellen Ungewissheiten zur hydrogeologischen Ausprägung des Keuper-Aquifers - und damit insbesondere zur unteren Begrenzung des EG in NL - werden mit einem spezifischen Indikator erfasst.	Auswirkungen der Ungewissheiten zu den EG-begrenzenden Aquiferen
44	Explorations- bedingungen an Oberfläche	In E2 erfolgte die Bewertung dieses Indikators standortspezifisch anhand der seismischen Abbildungsqualität (mögliche Einschränkungen an der Oberfläche, Existenz mächtiger Quartärfüllungen und weitere Störeinflüsse wie Fluglärm etc.); vgl. Kap. 4.4.3 in Nagra (2014b). In E3 wurden in allen Standortgebieten 3D-seismische Untersuchungen und Tiefbohrungen erfolgreich durchgeführt. Damit entfällt eine separate Beurteilung dieses Indikators.	In E3 wird dieser Indikator nicht mehr verwendet, da nun eine robuste standort-spezifische Datengrundlage für die qualitative Bewertung vorliegt.
3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen			
23	Modellvorstellung en zur Langzeit- entwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)	In E2 wurde das tektonische Regime auf Ebene Grossraum qualitativ bewertet (Tafeljura und nordöstliches Molassebecken, Vorfaltenzone, östliche Subjurassische Zone, Alpen, vgl. Kr 2.1), unter Berücksichtigung weiterer standortspezifischer Langzeitveränderungen (insb. Möglichkeit der Bildung von Durchbruchsrinnen in Kr 3.3); vgl. Kap. 4.4.2 und 4.4.3 in Nagra (2014b). In E3 werden in Kr 3.3 die Auswirkungen von Ungewissheiten bzgl. Langzeitentwicklungen auf die Barrierewirkung beurteilt. Dazu gehören alternative und abdeckende Entwicklungsszenarien bzgl. Erosion und pessimistische Annahmen zu den relevanten Gesteinseigenschaften hinsichtlich lagerbedingter Einflüsse.	In E3 werden die Auswirkungen von Ungewissheiten bzgl. Langzeitentwicklungen auf die Barrierewirkung anhand von probabilistischen Modellrechnungen beurteilt (gleiche Indikatoren wie in Kr 2.2 für Erosion und Kr 2.3 für thermische und gasbedingte Effekte).

Nr.	Indikatoren Etappe 2	Überprüfung / Präzisierung / Änderungsbedarf	Indikatoren Etappe 3
46	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation	In E2 erfolgte die Bewertung dieses Indikators wirtgesteinsspezifisch anhand der Existenz von unabhängigen Evidenzen, welche die Qualität der Wirtgesteine bzgl. Langzeitisolation bestätigen: Gehalt an salinen Wässern und deren Verweilzeiten, durch Diffusion geprägte Tracer-Profile, hydrochemische Zonierung, hydraulische Unterdrücke etc. In E3 liegen neu standortspezifische Daten zur Isotopenzusammensetzung der Poren- und Grundwässer aus allen Tiefbohrungen vor. In E3 werden deshalb unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation zur Bewertung der regionalen hydrogeologischen Situation im Kriterium 1.2 eingesetzt.	Indikator wird neu in Kriterium 1.2 betrachtet
4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen			
47	Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften	In E2 wurde eine individuelle Beurteilung von Einzelaspekten zur bautechnischen Eignung vorgenommen. Auf der Grundlage einer pessimistischen Beurteilung der bestehenden Ungewissheiten bzgl. Gesteinsfestigkeiten und Gebirgsdrücken wurde die bevorzugte Tiefenlage für die Lagerebene auf 600 m u. T. (SMA) und 700 m u. T. (HAA) begrenzt. Die Bewertung erfolgte standortspezifisch; vgl. S. 239 – 240 und Kap. 4.4.3 in Nagra (2014b). In E3 liegt der Fokus auf einer integralen Beurteilung aller bautechnisch relevanten Aspekte (Lagerprojektierung inkl. bautechnischer Risikoanalyse der standortspezifischen Lagerprojekte). Es wird nachgewiesen, dass die bautechnische Machbarkeit gegeben ist und die Tiefenlage der Lagerebene dank des verbesserten felsmechanischen Kenntnisstands und angepasster Bauverfahren / Ausbaukonzepte nicht mehr beschränkt werden muss.	Nachweis der bautechnischen Machbarkeit der Lagerprojekte
1	Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit		
4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung			
48	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen	In E2 wurde eine qualitative Beurteilung von Einzelaspekten der untertägigen Erschliessung vorgenommen. In E3 liegt der Fokus auf einer integralen Beurteilung aller bautechnisch relevanten Aspekte (Lagerprojektierung inkl. einer bautechnischen Risikoanalyse der standortspezifischen Lagerprojekte). Es wird nachgewiesen, dass die bautechnische Machbarkeit gegeben ist.	Nachweis der bautechnischen Machbarkeit der Lagerprojekte
49	Natürliche Gasführung im Wirtgestein	In E2 wurde dieser Aspekt für die verschiedenen Typen von Wirtgesteinen getrennt beurteilt. Insb. konnte eine natürliche Gasführung in den Mergel-Formationen nicht ausgeschlossen werden. In E3 ist der Opalinuston als Wirtgestein gesetzt; eine natürliche Gasführung im Wirtgestein kann deshalb ausgeschlossen werden.	In E3 wird dieser Indikator nicht mehr verwendet.

Anhang C Beschrieb der verwendeten Bewertungsmethoden

In der qualitativen Bewertung in Etappe 3 werden mit Blick auf die Auswahl des besten Standorts je für HAA und SMA drei verschiedene Methoden der multikriteriellen Entscheidungsfindung angewandt (Kap. 3.2, 4 und 5). Einerseits werden die Bewertungsobjekte anhand einer Nutzwertanalyse im Raster der Indikatoren bewertet. In der zweiten Methode werden die Bewertungsobjekte auf der Grundlage der standortspezifischen Daten auf Stufe Indikator rangiert (Ranking-Methode). Die dritte Methode basiert auf einem datenbasierten paarweisen Vergleich der Bewertungsobjekte auf Stufe Indikator (Outranking-Methode). Im Vergleich mit der Nutzwertanalyse erlauben die letzteren beiden Methoden feiner abgestufte Bewertungen der Vor- und Nachteile der drei Standortgebiete.

Diese drei Bewertungsmethoden werden nachfolgend beschrieben.

C.1 Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse ist ein einfaches, vielseitig einsetzbares Verfahren, mit dessen Hilfe sowohl quantitative als auch qualitative Kriterien in die Entscheidungsfindung einbezogen werden können. Die verwendete Methode lässt sich wie folgt charakterisieren:

- Hierarchischer Kriterienkatalog mit 4 Kriteriengruppen und 13 Kriterien gemäss SGT Tabelle 1 (BFE 2008) mit den zu beurteilenden Aspekten sowie zugehörigen Indikatoren (vgl. Anhang A).
- Bewertungsskala pro Indikator: Bewertungsskalen basieren wo immer möglich auf Messwerten, ansonsten auf «expert judgement»; die Darstellung der Bewertungen erfolgt anhand diskreter Bewertungsstufen gemäss SGT-Vorgabe: *sehr günstig*, *günstig*, *bedingt günstig*, *ungünstig* mit abgestufter Farbgebung und unter Angabe der Nutzwerte (nur Klassenmittelwerte der Bewertungsstufen).
- Aggregation der Nutzwerte: Gleichgewichtete arithmetische Mittelung aller einem SGT-Kriterium zugehörigen Indikatoren und weiter aller 13 SGT-Kriterien zur Gesamtbewertung. Es ist grundsätzlich möglich, die Sensitivität der Bewertungen bezüglich alternativer Gewichtungen zu prüfen (insbesondere Aufzeigen der Robustheit der Bewertungen, Einfluss wichtiger Kriterien und Indikatoren etc.).
- Innerhalb einer jeden Gruppe von aggregierten Indikatoren und Kriterien wird volle Kompensation zugelassen, d. h., eine schlechte Bewertung kann durch eine gute Bewertung innerhalb der gleichen Gruppe voll kompensiert werden.

Das in SGT-Etappe 2 verwendete mathematische Modell für die Nutzwertanalyse ist in (Nagra 2014b), Anhang D.1 dokumentiert (wobei dort eine dreistufige Aggregation zur Anwendung gelangte: Indikator → Kriterien → Kriteriengruppe → Gesamtbewertung). In SGT-Etappe 3 werden die Nutzwerte analog wie in Etappe 2 berechnet, wobei einerseits eine zweistufige Aggregation (Indikator → Kriterien → Gesamtbewertung) und andererseits eine einstufige Aggregation (Indikator → Gesamtbewertung) vorgenommen wird.

C.2 Ranking-Methode

Die von der Nagra verwendete Ranking-Methode dient in der Etappe 3 dem Ziel, eindeutige Vorteile von Standortgebieten zu identifizieren (Positivwahl). Die Methode lässt sich wie folgt charakterisieren:

- Kriterien- und Indikatoren-Katalog: Die Ranking-Methode kann grundsätzlich auf alle Indikatoren angewendet werden, für die quantitative Daten oder rangierbare, qualitative Merkmale für den Vergleich zur Verfügung stehen.
- Festlegung einer Rangfolge der Standortgebiete bezüglich eines Indikators anhand der vorliegenden Daten oder rangierbarer, qualitativer Merkmale. Ein erster Rang eines Standortgebiets wird als Hinweis auf einen eindeutigen Vorteil gegenüber schlechter rangierten Standortgebieten bzgl. dieses Indikators betrachtet.
- Die Rangfolge der Standortgebiete bezüglich eines SGT-Kriteriums erfolgt anhand der summierten Rangpunkte für die zugehörigen Indikatoren. Bei diesem Aggregationsschritt wird daher volle Kompensation zugelassen, d. h., ein schlechterer Rang bezüglich eines Indikators kann durch einen besseren Rang bezüglich eines anderen Indikators innerhalb des gleichen Kriteriums kompensiert werden. Ein erster Rang eines Standortgebiets bzgl. eines SGT-Kriteriums wird als eindeutiger Vorteil gegenüber schlechter rangierten Standortgebieten bzgl. dieses Kriteriums bewertet.
- Die Rangfolge der Standortgebiete auf der Stufe Gesamtbewertung erfolgt anhand Summation der Rangpunkte aller SGT-Kriterien oder – als Variante – anhand Summation der Rangpunkte aller Indikatoren. Bei beiden Aggregationsschritten wird volle Kompensation zugelassen, d. h., ein schlechterer Rang bezüglich eines Kriteriums oder Indikators kann durch einen besseren Rang bezüglich eines anderen Kriteriums oder Indikators kompensiert werden. Ein erster Rang eines Standortgebiets wird als eindeutiger Vorteil gegenüber schlechter rangierten Standortgebieten in der Gesamtbewertung bewertet.

C.3 Outranking-Methode

Analog zur «Ranking-Methode» dient auch die von der Nagra verwendete «Outranking-Methode» dem Ziel, eindeutige Vorteile von Standortgebieten zu identifizieren (Positivwahl). Die Methode lässt sich wie folgt charakterisieren:

- Kriterien- und Indikatoren-Katalog: Die Outranking-Methode kann grundsätzlich auf alle Indikatoren angewendet werden, für die quantitative Daten oder rangierbare, qualitative Merkmale für den Vergleich zur Verfügung stehen. Auf ein Outranking anhand der Nutzwerte (wie noch in SGT-Etappe 2 angewandt) wird hier verzichtet, da sich die standortspezifischen Unterschiede nur in wenigen Fällen in den Nutzwerten manifestieren.
- Der paarweise Vergleich der Standortgebiete bezüglich eines Indikators erfolgt anhand der Wertedifferenz ihrer Daten durch Anwendung einer Präferenzfunktion (stetige Funktion mit definierten Knickpunkten, vgl. Beispiel in Fig. C-1). Die «Outranking-Methode» zeigt relative Unterschiede zwischen Standortgebieten auf und weist auf Unvergleichbarkeiten hin. Hohe Werte für den Stärke-Präferenzfluss eines Standortgebiets werden als Hinweis auf einen eindeutigen Vorteil gegenüber den anderen Standortgebieten betrachtet. Grosse negative Werte für den Schwäche-Präferenzfluss eines Standortgebiets werden als Hinweis auf einen eindeutigen Nachteil gegenüber den anderen Standortgebieten betrachtet.

- Der paarweise Vergleich der Standortgebiete bezüglich eines SGT-Kriteriums erfolgt durch (normierte) Summation der Präferenzwerte für die zugehörigen Indikatoren. Bei diesem Aggregationsschritt wird keine volle Kompensation zugelassen, d. h., eine schlechte Bewertung bezüglich eines Indikators kann nicht vollständig durch eine gute Bewertung bezüglich eines anderen Indikators innerhalb des gleichen Kriteriums kompensiert werden (Geldermann & Schöbel 2011).
- Der paarweise Vergleich der Standortgebiete auf der Stufe Gesamtbewertung erfolgt anhand (normierter) Summation der Präferenzwerte aller SGT-Kriterien oder – als Variante – anhand (normierter) Summation der Präferenzwerte aller Indikatoren. Bei beiden Aggregationsschritten wird ebenfalls keine vollständige Kompensation der Bewertungen zugelassen.

Das in SGT-Etappe 2 verwendete mathematische Modell für die Outranking-Methode Nutzwertanalyse ist in (Nagra 2014b), Anhang D.3 dokumentiert (wobei dort die Analyse auf der Grundlage der Nutzwerte erfolgte und eine einstufige Aggregation zur Anwendung gelangte: entscheidrelevante Indikatoren → entscheidrelevante Merkmale). In SGT-Etappe 3 gelangt eine analoge Berechnungsmethode zur Anwendung. Im Unterschied zu Etappe 2 erfolgt die Berechnung der Stärke- und Schwäche-Präferenzflüsse auf der Grundlage standortspezifischer Daten oder rangierbarer qualitativer Merkmale für die Indikatoren. Ferner wird eine Variante mit zweistufiger Aggregation (Indikator → Kriterien → Gesamtbewertung) und eine Variante mit einstufiger Aggregation vorgenommen (Indikator → Gesamtbewertung).

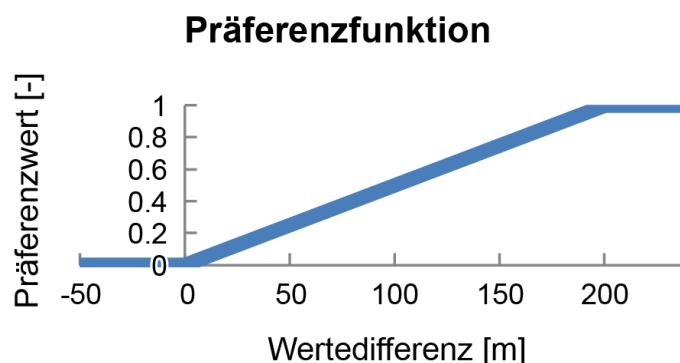


Fig. C-1: Präferenzfunktion zur Bestimmung des Präferenzwerts eines Standortgebiets im paarweisen Vergleich

Die Figur zeigt als Beispiel die Präferenzfunktion für den Indikator «Mächtigkeit EG».

Anhang D Berücksichtigung der für die SGT-Kriterien zu beurteilenden Aspekte in der qualitativen Bewertung

Tab. D-1: Übersicht über die Berücksichtigung der zu beurteilenden Aspekte in der qualitativen Bewertung der SGT-Kriterien

Zusammenfassung davon, wie die zu beurteilenden Aspekte gemäss Tabelle A1-1 bis A1-13 (Anhang I in BFE 2008) in die qualitative Bewertung der Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit eingeflossen sind. Erläuterungen finden sich insbesondere in Anhang A dieses Berichts sowie, wo angegeben, in weiteren Referenzen.

SGT-Kriterien / zu beurteilende Aspekte	Art der Berücksichtigung	Indikator oder Referenz
KG 1: Eigenschaften des EG	Fokus auf die Wirksamkeit der natürlichen Barriere zu Beginn der Nachverschlussphase	
1.1 Räumliche Ausdehnung		
laterale Ausdehnung EG / Verbreitung	mittels Indikator in Kr 1.1 bewertet	Platzangebot untertag (Kr 1.1)
vertikale Ausdehnung EG / Mächtigkeit	mittels Indikator in Kr 1.1 bewertet	Mächtigkeit EG (Kr 1.1)
Tiefenlage des WG/EG	fliesst als Datensatz in die Definition der Bewertungsobjekte ein	Kap 3.1.1 in Nagra (2024d)
	fliesst als Datensatz in die integrale Beurteilung der Erosion (Kr 2.2 und 3.3), der lagerbedingten Einflüsse (Kr 2.3 und 3.3) und in die bautechnische Risikoanalyse (Kr 4.1 und 4.2) ein	Indikatoren: siehe Kr 2.2, 2.3, 3.3, 4.1, 4.2
regionale geologisch-tektonische Verhältnisse (z.B. regionale Störungszonen, glazial übertiefte Talrinnen, Fremdgesteinseinschlüsse)	regionale Störungszonen, Zonen mit erhöhter tektonischer Komplexität und bedeutende lokale Störungen werden als Datensätze in der Ermittlung der potenziellen Lagerzone berücksichtigt	Kap 3.1.1 in Nagra (2024d)
	seismisch kartierte Störungen in der potenziellen Lagerzone werden mittels Indikatoren in Kr 1.1 (heutige geologische Verhältnisse) und Kr 2.1 (allfällige Reaktivierung) bewertet	Seismisch kartierte Störungen an Wirtgesteinsgrenzen (Kr 1.1) Seismisch kartierte Störungen in kompetenten Formationen (Kr 2.1)
	glazial übertiefte Talrinnen fliessen als Datensatz in die integrale Beurteilung der geologischen Langzeitentwicklung ein (Kr 2.2 und 3.3)	Indikatoren: siehe Kr 2.2, 3.3
	in SGT Etappe 2 wurden Fremdgesteinseinschlüsse im Zusammenhang mit den Mergel-Formationen des Helvetikums (Standort Wellenberg) beurteilt; in den in Etappe 3 untersuchten Standortgebieten mit ihren WG/EG sind keine vergleichbaren Fremdgesteinseinschlüsse bekannt.	Nagra (2014b)

SGT-Kriterien / zu beurteilende Aspekte	Art der Berücksichtigung	Indikator oder Referenz
Platzbedarf des Tiefenlagers (inkl. Reserve) und Platzangebot	mittels Indikator in Kr 1.1 bewertet	Platzangebot untertag (Kr 1.1)
Flexibilität bei der Anordnung der Lagerfelder	mittels Indikator in Kr 1.1 bewertet	Seismisch kartierte Störungen an Wirtgesteinsgrenzen (Kr 1.1)
1.2 Hydraulische Barrierenwirkung		
Wasserführung (hydraulische Durchlässigkeit, hydraulischer Gradient) und hydraulische Barrierenfunktion	mittels Indikator in Kr 1.2 bewertet	Darcy-Fluss im EG (Kr 1.2)
Stofftransport, vorherrschende Transportprozesse (Advektion, Diffusion) und Transportbarrieren-Funktion	mittels Indikator in Kr 1.2 bewertet	Tracer-Fluss im EG (Kr 1.2)
Regionale hydrogeologische Situation (generelle hydrochemische Gliederung, Grundwasserstockwerke, Isotopen-Signaturen, Verweilzeiten der Tiefenwässer)	mittels Indikator in Kr 1.2 bewertet	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation (Kr 1.2)
1.3 Geochemische Bedingungen		
Beurteilung bezüglich Langzeitverhalten der technischen Barrieren	In den in Etappe 3 untersuchten Standortgebieten sind die geochemischen Bedingungen im Opalinuston ähnlich, so dass keine standortspezifischen Auswirkungen auf das Langzeitverhalten der technischen Barrieren zu erwarten sind	Anhang A in Nagra (2014b)
Beurteilung bezüglich Rückhaltung und Verzögerung der Radionuklide:	In Kr 1.3 liegt Fokus auf dem Wirtgestein, welches den Hauptbeitrag zur Barrierewirkung der natürlichen Barrieren liefert. Betrachtungen zu den Transporteigenschaften im EG sind Bestandteil des Kr 3.1	Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften in den Rahmengesteinen (Kr 3.1)
Mineralogie, Wasser-Gesteinswechselwirkungen	für das WG mittels Indikator in Kr 1.3. bewertet	Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Sorptionsvermögen (Kr 1.3)
Salinität, Porenwasserchemie	für das WG mittels Indikator in Kr 1.3 bewertet	Salinität im WG (Kr 1.3)
pH, Redox-Bedingungen, mikrobielle Prozesse, Kolloide	in Gegenüberstellung zu Indikatoren der Etappe 2 adressiert	Anhang B

SGT-Kriterien / zu beurteilende Aspekte	Art der Berücksichtigung	Indikator oder Referenz
1.4 Freisetzungspfade		
Art und Ausbildung des mikroskopischen Porenraums (poröses oder geklüftetes Medium)	für das WG mittels Indikatoren in Kr 1.4 bewertet Fokus auf das Wirtgestein, welches den Hauptbeitrag zur Barrierewirkung der natürlichen Barrieren liefert. Betrachtungen zu den Transporteigenschaften im EG sind Bestandteil des Kr 3.1.	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums im WG (Kr 1.4)
Art, Verteilung und Eigenschaften der Transportpfade entlang diskreter tektonischer Merkmale (Channeling, Transmissivität)		Störungstransmissivität im WG (Kr 1.4)
Selbstabdichtungsvermögen		Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Selbstabdichtungsvermögen (Kr 1.4)
		Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften in den Rahmengesteinen (Kr 3.1)
Länge der Transportpfade	die Bewertung der Länge der Freisetzungspfade erfolgt im Kontext der Indikatoren Mächtigkeit EG (Kr 1.1), Darcy-Fluss im EG (Kr 1.2), Tracer-Fluss im EG (Kr 1.2), Länge des Freisetzungspfads im intakten Wirtgestein (Kr 2.3), Auswirkungen der Ungewissheiten zu den EG-begrenzenden Aquiferen (Kr 3.2)	Indikatoren: siehe Kr 1.1, 1.2, 2.3 und 3.2
KG 2: Langzeitstabilität	Fokus auf den Erhalt der Barriereeigenschaften über den Betrachtungszeitraum	
2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften		
Störung des Gesteinsverbandes im EG durch differenzielle Bewegungen (Neotektonik, Zerschierung, Reaktivierung von Brüchen und Störungszonen)	regionale Störungszonen, Zonen mit erhöhter tektonischer Komplexität und bedeutende lokale Störungen werden als Datensätze in der Ermittlung der potenziellen Lagerzone berücksichtigt	Kap 3.1.1 in Nagra (2024d)
	seismisch kartierte Störungen in der potenziellen Lagerzone werden mittels Indikatoren in Kr 1.1 hinsichtlich heutiger geologischer Verhältnisse und in Kr 2.1 hinsichtlich allfälliger zukünftiger Reaktivierung bewertet	Seismisch kartierte Störungen an Wirtgesteinsgrenzen (Kr 1.1) Seismisch kartierte Störungen in kompetenten Formationen (Kr 2.1)
Neotektonische Aktivität (u.a. Seismizität)	mittels Indikator in Kr 2.1 bewertet	Seismizität (Kr 2.1)

SGT-Kriterien / zu beurteilende Aspekte	Art der Berücksichtigung	Indikator oder Referenz
Bildung neuer Wasser- und Gaswegsamkeiten durch geochemische Vorgänge (Lösungsprozesse, Karstbildung, Wasser-Gesteins-Wechselwirkung)	mittels Indikatoren in Kr 2.1 bewertet	Potenzial für Bildung von Wasserwegsamkeiten durch Lösungsprozesse: • oberhalb WG (im EG) • im WG • unterhalb WG (im EG) (drei separate Indikatoren Kr 2.1)
	die Rolle verkarsteter Gesteinseinheiten während Bau, Betrieb und Verschluss der Zugangsbauwerke wird im Rahmen der bautechnischen Risikoanalyse beurteilt (Kr 4.2)	vgl. Indikator in Kr 4.2
Seltene geologische Ereignisse (Bruchbildung in Zusammenhang mit starken Erdbeben oder Vulkanismus)	in Kr 2.1 diskutiert	Anhang A.5
2.2 Erosion		
Massgebliche Faktoren und Prozesse (Tiefenlage des Lagers, Hebungsrate, Erosionsrate und glaziale Tiefenerosion)	Die Auswirkungen der Erosion auf die Barrierewirkung des EG werden systematisch betrachtet: Die Verringerung der Gesteinsüberdeckung durch Erosion wird anhand der Restüberdeckung am Ende des Betrachtungszeitraums bewertet. Dekompaktionseffekte (Auflockerung des Wirtgesteins, Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit, etc) fließen in die Definition der zugehörigen Bewertungsskala ein. In den zugrundeliegenden Modellrechnungen betrachtet werden die massgeblichen Faktoren und Prozesse sowohl zur fluviatilen wie auch zur Erosion mit glazialer Übertiefung. In Kr 2.2 werden die Auswirkungen der erwarteten geologischen Langzeitentwicklung auf die Barrierewirkung des EG bewertet. In Kr 3.3 werden die Auswirkungen von pessimistischen Annahmen zu geologischen Langzeitentwicklungen (insb. Entwässerungsszenarien) auf die Barrierewirkung des EG mittels des gleichen Indikators wie in Kr 2.2 bewertet.	Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte (Kr 2.2, Kr 3.3)
Beeinträchtigung der Barrierewirkung (Verringerung der Gesteinsüberdeckung, Auflockerung des Wirtgesteins, Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit)		
Freilegung des Lagers innerhalb des Betrachtungszeitraumes	Im Indikator "Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte" enthalten. Weiter diskutiert im Rahmen der Sicherheitsanalysen für den Standortvergleich.	Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte (Kr 2.2, Kr 3.3) Kap 4.4 in Nagra (2025)

SGT-Kriterien / zu beurteilende Aspekte	Art der Berücksichtigung	Indikator oder Referenz
2.3 Lagerbedingte Einflüsse		
Berücksichtigung des einzulagernden Abfallinventars und des dafür vorgesehenen Lagerkonzepts	Vergleich der Auswirkungen der lagerbedingten Einflüsse auf das Wirtgestein (lagerbedingte Einflüsse sind auf das Nahfeld begrenzt) bei gleicher Lagerauslegung für HAA resp. für SMA in allen Standortgebiete mittels folgender Indikatoren:	
Ausbildung Auflockerungszone	mittels Indikator in Kr 2.3 bewertet	Länge des Freisetzungspaths im intakten WG (Kr 2.3)
Wärmeeintrag und Wärmeempfindlichkeit, THM-gekoppelte Prozesse	mittels Indikator in Kr 2.3 bewertet für den Referenzfall. Auswirkungen auf das WG unter pessimisitischen Annahmen zu Gesteinseigenschaften werden in Kr 3.3 mittels derselben Indikatoren bewertet	Thermisch bedingte Porenwasser-Überdrücke im WG (Kr 2.3, 3.3)
Gasentwicklung der Abfälle und Gastransport		Gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG (Kr 2.3, 3.3)
Reversibilität der Veränderungen, Selbstabdichtungsvermögen	in Kr 2.3 diskutiert und mittels Indikator in Kr 1.4 bewertet	Tonmineralgehalt im WG hinsichtlich Selbstabdichtungsvermögen (Kr 1.4)
Chemische Wechselwirkungen	in Kr 2.3 und in Gegenüberstellung zu Indikatoren der Etappe 2 diskutiert	Anhang A.7 und Anhang B
2.4 Nutzungskonflikte		
Vorkommen aus heutiger Sicht wirtschaftlich nutzungswürdiger Rohstoffe in besonderem Masse (z.B. Salz, Kohlenwasserstoffe; Geothermie, Mineralquellen und Thermen)	Bewertung des Nutzungspotenzials verschiedener Ressourcen innerhalb der potenziellen Lagerzonen mittels Indikatoren in Kr 2.4	Rohstoffvorkommen • oberhalb WG • innerhalb WG • unterhalb WG (3 separate Indikatoren in Kr 2.4)
Beeinträchtigung der Barrierewirkung des WG resp. Treffer des Lagers durch Erschliessung und Nutzung der Rohstoffe		Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrundes (Kr 2.4)
		Mineral- und Thermalwassernutzungen (Kr 2.4)
KG 3 : Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen	Fokus auf die Auswirkungen der nicht reduzierbaren Ungewissheiten auf die Barrierewirkung	
3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine		
Möglichkeit der Charakterisierung der Beschaffenheit des WG/EG und der Erfassung der sicherheitsrelevanten Gesteinseigenschaften (Homogenität/Heterogenität der Gesteinsbeschaffenheit, Existenz und Art der Architekturelemente, Variabilität der sicherheitsrelevanten Eigenschaften). Es wird geprüft, ob die Daten mit genügender Zuverlässigkeit gewonnen werden konnten	Die sicherheitstechnischen Auswirkungen der nicht reduzierbaren Ungewissheiten bezüglich der Beschaffenheit des EG werden mittels Indikatoren bewertet. Betrachtet wird die standortspezifische Charakterisierung der Faziesvariabilität und der Transporteigenschaften der Schichten im EG. Der Stofffrachtaustrag aus dem EG wird mittels probabilistischer Modellrechnungen in Bezug zum Schutzkriterium gesetzt und damit auch die Zuverlässigkeit der entsprechenden Aussagen aus KG 1 bewertet.	Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften im Opalinuston (Kr 3.1) Auswirkungen der Variabilität der Transporteigenschaften in den Rahmengesteinen (Kr 3.1)

SGT-Kriterien / zu beurteilende Aspekte	Art der Berücksichtigung	Indikator oder Referenz
3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse		
Geologisch-tektonische Komplexität und Explorierbarkeit der räumlichen geologischen Verhältnisse (Lagerungsverhältnisse, Ausdehnung und Kontinuität der Schichten, ... , Wirtgesteinsgrenzen, Lage von regionalen Störungszonen, ..., etc.)	In Kr 3.2 diskutiert	Kap. 4.3.2 und Anhang A.10
(... räumliche Konstanz der lithologischen Beschaffenheit...)	Die Auswirkungen der räumlichen Konstanz der lithologischen Beschaffenheit des Keuper-Aquifers wird mittels Indikator in Kr 3.2 bewertet	Auswirkungen der Ungewissheiten zu den EG-begrenzenden Aquiferen (Kr 3.2)
(...kleinräumige Störungen, ...)	Subseismische Störungen werden mittels Indikator in Kr 1.4 adressiert	Störungstransmissivität im WG (Kr 1.4)
Massgebend ist auch die Zugänglichkeit für Untersuchungen von der Erdoberfläche aus (Quartärbedeckung, topographische Verhältnisse, dichte Besiedlung, Bewaldung, etc.)	in Kr 3.2 und in Gegenüberstellung zu Indikatoren der Etappe 2 diskutiert	Kap. 4.3.2 und Anhang A.10 sowie Anhang B
3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen		
Prognostizierbarkeit der möglichen Langzeitveränderungen (z.B. durch Modellvorstellungen zur Klimaentwicklung und Geodynamik, Hinweise auf rezente Bewegungen, Seismizität), die im Betrachtungszeitraum einen Einfluss auf das Einschlussvermögen des WG/EG haben können.	Mögliche (erwartete) Langzeitveränderungen werden in der KG 2 beurteilt. Z.B: - Seismizität wird mittels Indikator in Kr 2.1 beurteilt - Hinweise auf rezente Bewegungen und Modellvorstellung zur Geodynamik haben zur Definition des Indikators "seismisch kartierte Störungen in kompetenten Formationen" (Kr 2.1) geführt - Modellvorstellungen zur Klimaentwicklung, Erosion und Geodynamik fließen als Grundlage in die integrale Beurteilung der Erosion in Kr 2.2 ein	Seismizität (Kr 2.1) Seismisch kartierte Störungen in kompetenten Formationen (Kr 2.1) Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte (Kr 2.2)
	Die Prognostizierbarkeit der möglichen Langzeitveränderungen, die im Betrachtungsraum einen Einfluss auf das Einschlussvermögen des WG/EG haben könnten, werden in KG 3 anhand der Auswirkungen von nicht reduzierbaren Ungewissheiten mittels Indikatoren bewertet:	
	In Kr 3.3 werden die Auswirkungen von pessimistischen Annahmen zu geologischen Langzeitentwicklungen (insb. Entwässerungsszenarien) auf die Barrierewirkung des EG bewertet.	Restüberdeckung im Hinblick auf Dekompaktionseffekte in Kr 3.3 (gleicher Indikator wie in Kr 2.2)

SGT-Kriterien / zu beurteilende Aspekte	Art der Berücksichtigung	Indikator oder Referenz
	In Kr 3.3 werden die Auswirkungen der lagerbedingten Einflüsse auf die Barrierewirkung unter pessimistischen Annahmen zu Gesteinseigenschaften bewertet	Thermisch bedingte Porenwasser-Überdrücke im WG in Kr 3.3 (gleicher Indikator wie in Kr 2.3) Gasbedingte Porenwasser-Überdrücke im WG in Kr 3.3 (gleicher Indikator wie in Kr 2.3)
Unabhängige Evidenzen des Langzeiteinschlusses (z.B. alte Porenwasser, natürliche Tracerstoffe und ihre Verteilung)	natürliche Evidenzen werden beim Kr 1.2 mittels Indikator bewertet und in Gegenüberstellung zu Indikatoren der Etappe 2 diskutiert	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation (Kr 1.2) und Anhang B
KG 4: Bautechnische Eignung		
4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen		
Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen für Bau, Betrieb, Überwachung und Verschluss des geologischen Tiefenlagers (u.a. Gesteins- und Gebirgsfestigkeiten, Verformungseigenschaften der Gesteine, Tiefenlage und Gebirgsspannungen, Stabilität der Hohlräume, natürliche Gasführung)	In Kr 4.1 werden die felsmechanischen Bedingungen und Eigenschaften für den Bau des geologischen Tiefenlagers beurteilt, unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf den Betrieb, die Überwachung und den Verschluss des geologischen Tiefenlagers. Im Fokus der Beurteilung stehen hier die Lagerkammern der Haupt- und Pilotlager sowie die Lagerfeldzugänge inkl. der Lagerfeldversiegelungen auf Lagerebene.	Nachweis der bautechnischen Machbarkeit der Lagerprojekte (Kr 4.1)
4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung		
Bautechnische und hydrogeologische Verhältnisse für Erstellung, Betrieb und Unterhalt der Zugangsbauwerke zu den Lagerkavernen und -stollen, inkl. natürlicher Gasführung	In Kr 4.2 werden die bautechnischen und hydrogeologischen Verhältnisse für die Zugänge zum geologischen Tiefenlager in den Phasen Bau, Betrieb, Überwachung und Verschluss beurteilt. Im Fokus der Beurteilung stehen hier die Zugangsbauwerke, der Zentrale Bereich, die Testbereiche sowie die Lagerfeldzugänge (inkl. Kontrollstollen des Pilotlagers) bis hin zu den Lagerfeldversiegelungen.	Nachweis der bautechnischen Machbarkeit der Lagerprojekte (Kr 4.2)